



Katja Pilke, Senja Söderholm

# Gadoliniumpohjaisten tehosteaineiden vaikutukset vesistöihin

Kuvaileva kirjallisuuskatsaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Röntgenhoitaja (AMK)

Radiografia ja sädehoito, SXM21K2

Opinnäytetyö

24.11.2023

Tekijä	Katja Pilke, Senja Söderholm
Otsikko	Gadoliniumpohjaisten tehosteaineiden vaikutukset vesistöihin
Sivumäärä	33 sivua + 1 liite
Aika	24.11.2023
Tutkinto	Röntgenhoitaja (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Radiografia ja sädehoito
Ohjaajat	Lehtori Heli Patanen Lehtori Ulla Nikupaavo
<p>Magneettitutkimusten määrä kasvaa jatkuvasti ja samaan tahtiin kasvaa myös niissä käytettävien tehosteaineiden käyttömäärät. Gadolinium on alkuaine, joka ominaisuuksiltaan sopii erittäin hyvin tehosteaineeksi magneettitutkimuksiin. Tehosteaineena oleva gadolinium on kelaattimuodossa, jotta se on ihmiselle turvallinen. Jätevesien kautta vesistöihin ajautuvat tehosteaineet rasittavat vesiekosysteemiä. Ympäristön rasitusaste on kaiken kaikkiaan jo nyt huomattava ja on tärkeä pyrkiä lisäämään tietoisuutta ekologisesti kestävästä toimintatavoista. Tutkimme mitä vaikutuksia gadoliniumpohjaisilla tehosteaineilla on vesistöihin ja miten niitä voidaan vähentää.</p> <p>Opinnäytetyömme on toteutettu kuvailevana kirjallisuuskatsauksena. Aineisto on kerätty systemaattisella tiedonhaulla ja se on analysoitu kvalitatiivisella menetelmällä. Valitut tieteelliset tutkimusartikkelit ovat vertaisarvioituja, ajantasaisia ja kansainvälisiä.</p> <p>Jätevesien käsittelylaitosten kyvyttömyys puhdistaa gadolinium jätevesistä johtuu gadoliniumin omista ominaisuuksista. Tämän takia gadolinium päätyy pinta- ja pohjavesiin, joiden kautta se kulkeutuu juomaveteen ja sieltä ihmisten ruokaketjuun. Vaikka tehosteaineena gadolinium on turvallinen, sen käyttäytymismekanismeja ei vielä tunneta kunnolla ja on selvittämättä, kuinka vaarallista se on suun kautta nautittuna. Yksi keino poistaa gadoliniumia vesistöistä on biosuodatus makrolevien avulla. Makrolevät ovat tehokkaita biosuodattimia, ne kykenevät poistamaan 85 % gadoliniumista. Vielä tehokkaampi tapa vähentää vesistörasitusta on estää tehosteaineen joutuminen viemäristöön keräämällä tehosteainetta saaneiden potilaiden virtsa talteen.</p> <p>Kestävä kehitys on ajankohtainen ja tärkeä aihe. Opinnäytetyömme lisää röntgenhoitajien tietämystä ympäristöasioista ja valmistaa mahdollisiin tuleviin muutoksiin, joilla radiologian ekologista kestävyttä voidaan parantaa. Muutoksien aikaansaaminen vaatii röntgenhoitajilta positiivista asennetta ja kiinnostusta aiheeseen, jotta oma toiminta saadaan sopeutettua ekosysteemin kestäkyvyn mukaan.</p>	
Avainsanat	gadolinium, magneettikuvantaminen, jätevesi, juomaveden kontaminaatio

Author	Katja Pilke, Senja Söderholm
Title	Effects of gadolinium-based contrast agents on aquatic environments
Number of Pages	33 pages + 1 appendix
Date	24 November 2023
Degree	Bachelor of Health Care
Degree Programme	Radiography and radiotherapy
Instructors	Heli Patanen, Senior Lecturer Ulla Nikupaavo, Senior Lecturer
<p>Magnetic resonance imaging (MRI) is a growing research method and in corresponding pace the use of contrast agents is also increasing. Gadolinium is an element that is highly suitable for use as a contrast agent in MRI due to its properties. The gadolinium used as a contrast agent is in chelated form to ensure its safety for humans. Contrast agents that end up in aquatic environments through wastewater can stress the aquatic ecosystem. The overall environmental impact is already significant, making it important to increase awareness of ecologically sustainable practices. We research the effects of gadolinium-based contrast agents on aquatic environments and how they can be reduced.</p> <p>Our thesis is implemented as a descriptive literature review. The material has been collected through systematic information retrieval and analysed using a qualitative method. The selected scientific research articles are peer-reviewed, up-to-date and international.</p> <p>The inability of wastewater treatment plants to remove gadolinium from wastewater is due to gadolinium's inherent properties. As a result, gadolinium ends up in surface and groundwater, ultimately entering drinking water and subsequently the human food chain. While gadolinium is safe as a contrast agent, its behaviour mechanism is not yet fully understood and the potential risks of oral consumption remain to be determined. One method for removing gadolinium from water bodies is through biosorption using macroalgae. Macroalgae are efficient biosorbents and can remove up to 85 % of gadolinium. An even more effective way to reduce aquatic pollution is to prevent the contrast agent from entering the sewage system by collecting the urine of patients who have received the contrast agent.</p> <p>Sustainable development is a current and crucial topic. Our thesis enhances the knowledge of radiographers regarding environmental issues and prepares them for potential future changes aimed at improving the ecological sustainability of radiology. Bringing about these changes requires a positive attitude and a genuine interest from radiographers to adapt their practices in alignment with the ecosystem's carrying capacity.</p>	
Keywords	gadolinium, magnetic resonance imaging, wastewater, contamination of drinking water

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Gadolinium	2
2.1	Magneettikuvantaminen	2
2.2	Gadolinium	3
2.2.1	Käyttö kuvantamisessa	3
2.2.2	Alkuaineesta tehosteaineeksi	4
3	Ekologinen kestävyys radiografiassa	5
3.1	Terveysthuollon jätteet	6
3.2	Jäteveden kiertokulku	7
4	Opinnäytetyön tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset	8
5	Opinnäytetyön menetelmät	8
5.1	Kuvaileva kirjallisuuskatsaus	8
5.2	Aineiston keruumenetelmä	9
5.3	Aineiston analysointimenetelmä	12
5.4	Aineiston analyysi	12
6	Tulokset	15
6.1	Vaikutukset vesistöihin	15
6.1.1	Kiertokulku	15
6.1.2	Päästömäärät maailmalla	16
6.1.3	Paluu ruokaketjuun	19
6.2	Miten vaikutuksia voidaan vähentää	21
6.2.1	Biologinen suodatus	21
6.2.2	Virtsan kerääminen	22
7	Pohdinta	24
7.1	Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	24
7.2	Luotettavuus ja eettisyys	25
7.3	Jatkotutkimusehdotukset	26
7.4	Ammatillinen kasvu	27
	Lähteet	29
	Liitteet	
	Liite 1. Tutkimusartikkelit	

# 1 Johdanto

Magneettitutkimusten kuvausmäärät ovat suuria ja noususuhteisia. Vuoden 2018 ja 2021 välissä on tapahtunut 15 % kasvu (Ruonala 2022). Magneettitutkimuksissa käytetään gadoliniumpohjaisia tehosteaineita, joita kyseisissä kuvauksissa käytetään usein (Sequeiros & Lundbom 2017). Tehosteaineiden käytön jatkuvasti lisääntyessä on tärkeä tiedostaa, kuinka lääkejätteet, kuten gadolinium, jatkavat matkaansa potilaista jätevesiin ja sieltä vesistöihin.

Gadoliniumia esiintyy luonnossa sekä alkuaineena että ihmisen muokkaamana. Näistä jälkimmäinen saattaa päätyä pohjavesiin ja sieltä takaisin osaksi ruokaketjuamme, osittain vaaralliseen ionimuotoonsa palautuneena. Vaikka tehosteaineena gadolinium on turvallista, ei vieläkään tiedetä mitä kaikkia vaaroja sen nauttiminen suun kautta aiheuttaa, siksi ennaltaehkäisevät toimet ovat tärkeitä.

Opinnäytetyömme on kuvaileva kirjallisuuskatsaus, jossa tutkimme minkälaisia vaikutuksia magneettikuvantamisessa käytettävillä tehosteaineilla on vesistöihin. Selvitämme myös mitä mahdollisuuksia gadoliniumpäästöjen vähentämiseksi on. Tavoittelemme kyseisten ympäristövaikutusten tiedon lisäämistä röntgenhoitajien keskuudessa, jotta me ja tulevat kollegamme voimme paremmin ymmärtää aiheen tärkeyden ja siihen luontevana jatkona ottaa ympäristöasiat huomioon ja omalla toiminnallamme vähentää vesistöjen kuormitusta.

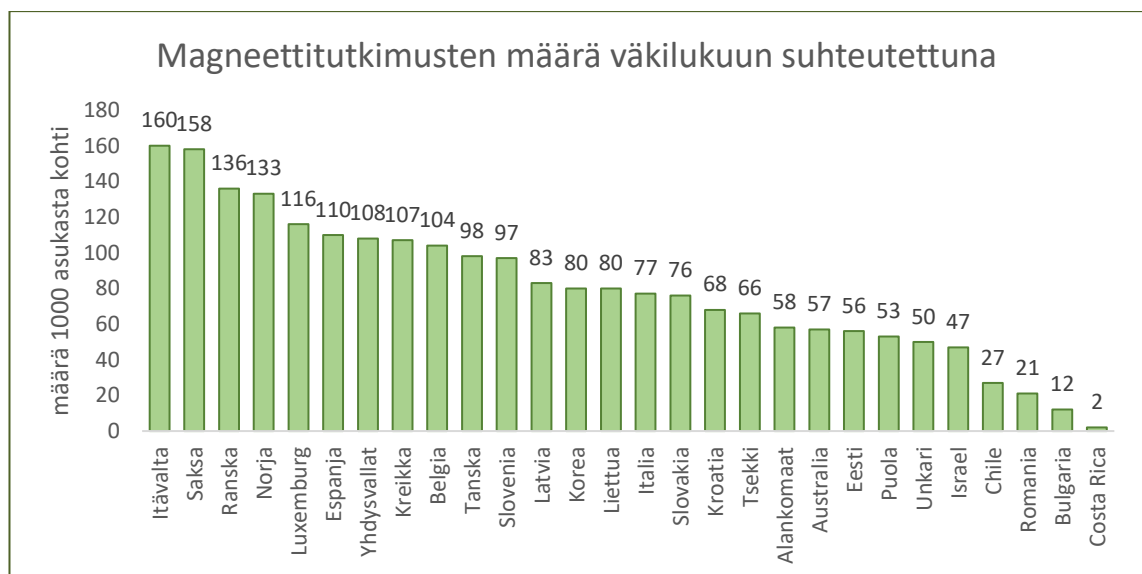
Lähtökohtaisesti rajasimme ulkopuolelle merkkiaineet sekä radiologisissa toimenpiteissä käytettävät tehosteaineet, jottei työ olisi liian laaja. Alkuperäisen suunnitelman mukaan meidän piti käsitellä sekä jodipitoisia että gadoliniumpohjaisia tehosteaineita, mutta analysoidessamme aineistohaun tuottamia artikkeleita havaitsimme, että meidän kannattaa keskittyä gadoliniumpohjaisiin tehosteaineisiin. Ympäristö on käsitteenä varsin monitahoinen ja olemme valinneet jätevedet kiinnostuksen kohteeksi siksi, että sairaaloiden alueella jätevesissä on todettu korkeampia määriä lääkejätteitä. Mikkelin alueella jätevesistä tehtyjen mittausten mukaan sairaalan lääkejätteistä huomattava osa on tehosteaineita. (Tuominen & Salmi & Viitala 2022: 17–25.) Jätevedet puolestaan vaikuttavat omassa kiertokulussaan vesistöihin ja isommassa mittakaavassa ympäristöön. Ympäristöasioiden tiedostamisessa ja kestäväen kehityksen tavoittelussa ei enää teoreettisuus riitä vaan on toimittava niiden mukaisesti käytännössä.

## 2 Gadolinium

### 2.1 Magneettikuvantaminen

Magneettikuvauksen avulla saadaan halutusta anatomiasta hyvinkin tarkkaa kuvaa melkein mistä tahansa suunnasta. Kuvausmenetelmän etuja on tarkkuus, kontrastien määrä ja ionisoimattoman säteilyn puuttuminen. Kuvaus käyttää kolmea eri magneettikenttää; staattista, gradienttia ja RF-kenttää. Näiden kolmen kentän avulla viritetään kehon vetyatomeja, palautetaan ne omaan luonnolliseen tilaansa ja vastaanotetaan palautumisesta saatu data, jonka perusteella kuva muodostuu. (Lammentausta 2017.)

Magneettikuvantamisen kuvausmäärät ovat nousussa: vuonna 2021 magneettitutkimuksia tehtiin Suomessa hieman yli 450 000, jossa oli 15 % kasvua vuoteen 2018 verrattuna. (Ruonala 2022.) Tarkasteltaessa muualla maailmassa vuonna 2021 tehtyjen magneettitutkimusten määrää, nousee odotetusti esiin maat, joissa on korkeatasoinen terveydenhuoltojärjestelmä. Suurimmat kuvausmäärät väkimäärään suhteutettuna on Itävallassa (160 tutkimusta 1000 asukasta kohden). Vuonna 2021 on tilastoitu kuvausmäärät 28 maasta, joista vain 6 on Euroopan ulkopuolella (kuvio 1). (OECD 2021a.) Tuntemattomasta syystä Japanin kuvausmääriä ei ole mukana ja sen puuttuminen tekee loven totuudenmukaiseen tilastoon, sillä Japanissa on maailman eniten magneettikuvauslaitteita väkimäärään suhteutettuna, 55,21 laitetta miljoonaa asukasta kohden. Seuraavana on Yhdysvallat (40,44 laitetta) ja Saksa (34,71 laitetta). Noin 29 laitetta miljoonaa asukasta kohden löytyy Koreasta, Kreikasta ja Suomesta. (OECD 2021b.)



Kuvio 1. Magneettitutkimusten määrä väkilukuun suhteutettuna (OECD 2021a)

Magneettikuvaus on turvallista pääosin, koska siinä ei käytetä ionisoivaa säteilyä. Kuvaushuoneen magneettisuus aiheuttaa riskejä, jotka ovat parhaiten vältettävissä hyvin koulutetun hoitohenkilökunnan toiminnalla. Kaikkien metalliesineiden poistaminen jokaiselta huoneeseen menijältä, niin potilailta ja heidän saattajiltaan kuin hoitajilta ja lääkäreiltä, on tärkeää turvallisuuden kannalta. Koneen pitämää meteliä varten on huoneessa kuvauksen aikana käytettävä kuulosuojaimia. Itse kuvaus saattaa aiheuttaa pientä lämpenemistä kudoksissa. (Lammentausta 2017.)

## 2.2 Gadolinium

### 2.2.1 Käyttö kuvantamisessa

Tehosteaineet korostavat kudosten eri osia ja tarjoavat tarkempia kuvia kehon toiminnasta tai toimintahäiriöistä (Goergen). Tehosteaineet annetaan suonensisäisesti laskimoon. Magneettikuvauksissa on käytössä gadoliniumpohjaiset tehosteaineet. Niillä voidaan tehostaa kudosten erottumista, mutta niiden toimintatapa on erilainen kuin muissa röntgentutkimuksissa käytettyjen tehosteaineiden. (Aronen & Niemi & Dean 2017.) Magneettikuvantaminen perustuu kehon vetyatomien protonien magneettikenttien muokkaukseen radiotaajuuden pulssin avulla. Pulssi virittää protonit tietylle taajuudelle, josta ne palautuvat alkuperäiseen tilaansa. Palautumista kutsutaan relaksaatioajaksi, jonka aikana kuva muodostuu. (Sequeiros & Lundbom 2017). Gadolinium vaikuttaa paikallisesti vesimolekyyleihin aiheuttaen muutoksia magneettikentässä, minkä seurauksena relaksaatioajat lyhenevät. Näin ollen tehosteaineen vaikutukset, ei itse aine, luo kuviin toivotun kontrastin. (Aronen ym. 2017.)

Magneettikuvaus tarjoaa lähtökohtaisesti hyvän pehmytkudoskontrastin. Kudosten havainnointia voidaan helpottaa käyttämällä tehosteainetta, joka nimensä mukaisesti tehostaa kudosten erottumista toisistaan. (Aronen ym. 2017.) Tehosteainetta käytetään varsinkin verisuonten ja tuumoreiden kuvantamisessa. Kuvausindikaation perusteella valittujen kuvausohjelmien antama informaatio täydentyy tehosteaineella ja sitä kautta tuo lisävarmuutta diagnoosiin. (Parviainen & Ovissi & Helanterä 2018.)

Kiinnostuksen kohteena oleva alue kuvataan ensin halutulla ohjelmalla, sen jälkeen annetaan tehosteaine ja uusitaan kuvaus samoilla asetuksilla. Näin saadaan vertailukelpoisia kuvasarjoja, joiden avulla tehostumista voidaan arvioida ja tulkita. (Vaara & Syväranta & Peltonen 2021.)

Tehosteaineen käytöstä päättää radiologi, joka lähetetekstin perusteella määrittelee käytettävän kuvausprotokollan (Parviainen ym. 2018). Magneettikuvantamisessa käytettyjen tehosteaineiden vaikuttavana aineena on gadoteerihappo. Annostus on potilaan painon mukaan: suositeltu annos aikuisille on 0,2 ml/kg. (Pharmaca Fennica 2019.) Maailmanlaajuisesti gadoliniumia käytetään tehosteaineena vuodessa noin 1000 tonnia. Kuvauslaitetta kohti käyttömäärä on noin 2,7 kiloa. (Ognard ym. 2021). Kuvausmäärien jatkaessa kasvuaan, lisääntyy tehosteaineen käyttömäärätkin.

### 2.2.2 Alkuaineesta tehosteaineeksi

Gadolinium on alkuaine, jonka järjestysnumero on 64 ja kemiallinen merkki Gd. Se kuuluu metalleihin, tarkemmin sanottuna maametallien lantanidiryhmään. (Aronen ym. 2017.) Nimensä se on saanut suomalaiselta kemistiltä Johan Gadolinilta, joka löysi gadoliniumia sisältävän mineraalin gadoliniitin vuonna 1880 (Blomqvist & Nordberg & Aaseth 2022). Gadoliniumin ioninen muoto  $Gd^{3+}$  on voimakkaasti paramagneettinen joutuensa siitä, että sillä on seitsemän paritonta elektronia. Tämä ominaisuus tekee gadoliniumista erittäin hyvän tehosteaineen magneettikuvauksiin. (Parviainen ym. 2018.)

Gadolinium on hopeanvalkoinen, muokattavissa oleva metalli. Se voi olla lämpötilan mukaan joko ferro- tai paramagneettinen. Alle 20 C lämpötilassa gadolinium on ferromagneettinen - jopa rautaa enemmän. Sitä ei esiinny luonnossa puhtaassa muodossaan vaan pääosin hapettuneessa muodossaan. (PubChem.)

Gadolinium on itsessään hyvin myrkyllistä, joten se on vakautettava kelaattimuotoon, jolloin sitä voidaan käyttää tehosteaineena. Tehosteaineina käytettävien kelaattien kemialliset rakenteet ovat joko lineaarisia tai makrosyklisiä. Näistä makrosykliset kelaatit ja uudemmat lineaariset kelaatit ovat stabiilimpia, mikä vähentää kelaatin mahdollisuutta hajota ioniseen muotoonsa. (Parviainen ym. 2018.)

Kelaattimuotoisena kyseessä on antropogeeninen eli ihmisperäinen gadolinium. Tehosteaineen kemialliset sidokset koostuvat gadolinium-ionista ja kantajamolekyylisestä eli kelatoivasta aineesta. Kelaatti muuttaa gadoliniumin jakautumista kehossa saaden siitä turvallisen ja myrkyttömän, kuitenkin säilyttäen sen kontrastia parantavat ominaisuudet. (Rogosnitzky & Branch 2016.)



### 3 Ekologinen kestävyys radiografiassa

Vuonna 2015 YK:n jäsenmaat sitoutuivat kestävän kehityksen Agenda 2030 -toimintaohjelmaan, jossa on 17 kestävän kehityksen tavoitetta. Maat ovat yhdessä sopineet pääasiat, joilla pyritään päätöksiä tehdessä turvaamaan nykyisille ja tuleville sukupolville hyvät elämisen mahdollisuudet maapallon kantokyvyn rajoissa. Päätöksenteossa otetaan huomioon ympäristö, ihminen sekä talous ja toimitaan tasavertaisesti nämä huomioiden. EU on sitoutunut tämän täytäntöönpanoon, koska on yksi tämän toimintaohjelman johtavista taustavoimista. (Euroopan komissio 2019: 6.) Yksi kestävän kehityksen osa-alue on ekologinen kestävyys, sillä pyritään säilyttämään maapallon biologinen monimuotoisuus ja ekosysteemin toimivuus. Ekologisuuteen pyritään sopeuttamalla ihmisen toimintaa luonnon kestävyyskykyyn pitkällä aikavälillä niin, että se kuluttaa mahdollisimman vähän energiaa ja resursseja. (Ympäristöministeriö.)

Sosiaali- ja terveysalalla ympäristövaikutuksia syntyy hankintojen, energian- ja vedenkulutuksen ja jätehuollon kautta, näihin pyritään vaikuttamaan laitosten ja organisaatioiden järjestelmillä sekä työntekijöiden toimintatavoilla. Radiografiassa tietoisuus ekologisuuteen pyrkimisestä on lisääntynyt ja asiat, missä kulutukseen voidaan kiinnittää huomiota ovat energian ja veden käytön vähentäminen, biohajoavien materiaalien käyttö sekä pyrkimys vähentää jätteen määrää kierrättämällä ja/tai hävittämällä ne oikeaoppisesti. (Sumner ym. 2022.)

Kuvauslaitteiden suunnittelu on suuressa roolissa kehitettäessä radiografian tekniikkaa eteenpäin. 3:n Teslan magneettikuvantamislaitte kuluttaa enemmän energiaa kuin 1,5:n Teslan. Uuden tekniikan suunnittelussa tulisi samalla huomioida tekniikan tuottama ympäristöjalanjälki. Arizonan osavaltion yliopistossa kehitettiin vastikään 9,4 Teslan magneettikuvantamislaitte, joka vie vähemmän tilaa, koska se on kryogeeniton, jolloin laitteen käytössä ei tarvita uusiutumaton luonnonvaraa eli kryogeenista nestemäistä heliumia. (Sumner ym. 2022.) Jo nyt useat laitevalmistajat pyrkivät valmistamaan energia- tehokkaita kuvantamislaitteita ja jopa 95 prosenttia koneen osista on käytettävissä uudelleen (Büttner ym. 2021). Arizonan osavaltion yliopistossa on käynnissä hanke, joka pyrkii toteuttamaan hiilineutraalit magneettikuvantamispalvelut 0,55 Teslan laitteella (Sumner ym. 2022).

Kuvantamisyksiköissä työskennellään työasemien ja näyttöpäätteiden ääressä. 2–4 työasemaa kuluttaa saman verran energiaa vuodessa kuin keskimääräinen asuintalous Sveitsissä. Näyttöpäätteitä pidetään usein jatkuvassa valmiudessa, pelkällä monitorin sammuttamisella voidaan säästää energiaa. (Sumner ym. 2022.) Saksassa vuonna

2021 seurattiin yhden radiologian osaston näyttöjen virrankulutusta ja huomattiin, että energiankulutus vähenee yli 50 % näyttöjen ollessa valmiustilassa verrattuna jatkuvasti päällä olevaan näyttöön (Büttner ym. 2021). Sammuttamalla työasemat, kun ne eivät ole käytössä yli tuntiin, voidaan säästää energiaa jopa 50 % eli työpäivän päätteeksi työasemista tulee laittaa kaikki virta pois. (Sumner ym. 2022.)

Suuri määrä päällä olevaa tekniikkaa samassa huoneessa nostaa huoneen lämpötilaa ja lisää tarvetta ilmastoinnille, joka omalta osaltaan lisää energiankulutusta. HVAC eli lämmitys-, ilmanvaihto- ja ilmastointijärjestelmä, on järjestelmä, jolla voidaan vaikuttaa rakennuksen energiatehokkuuteen, mutta siinä ohella se on suuri energiasyöppö, kuluttaen jopa 65 % sairaalan käyttämästä energiasta. Tämä järjestelmä tulisi olla muokattavissa sen mukaan, miten tiloissa työskennellään. Jos tiloissa ei tehdä tutkimuksia yöaikaan, tulisi järjestelmän tehokkuutta pystyä muokkaamaan sen mukaan, näin saadaan energiankulutusta laskettua. (Sumner ym. 2022.)

Röntgentilojen valaistussuunnitteluun sairaaloissa tulee kiinnittää huomioita. Oikeanlaisella valaistuksella voidaan säästää energiaa. Tiloissa voidaan käyttää automaattista liikkeentunnistusta tai luonnonvaloon suhteutettua automatiikkaa, tärkeintä on, että valot eivät ole turhaan päällä tiloissa, joita ei käytetä. Valoina tulee käyttää energiansäästölamppuja tai LED-lamppuja. Kaikkien edellä mainittujen keinojen lisäksi paperittomuuteen pyrkiminen on ekologinen teko; on parempi mitä enemmän asioita voidaan tehdä sähköisesti. (Sumner ym. 2022.)

### 3.1 Terveysthuollon jätteet

Terveysthuollossa syntyy paljon lajiteltavaa jätettä, osa tästä on vaarallista. Erityisjätteet vaativat tarkkaa lajittelua. Erilaisia terveysthuollon jätteitä ovat mm. lääkeli-, so-lunsalpaaja-, tartuntavaaralliset-, viiltävät-, jodi-, bromi- ja elohopeapitoiset jätteet. (Fortum.) Suomen jätelain (646/2011) mukaan jätteen haltijan tulee tietää jätteen alkuperä, määrä, laji, laatu ja muut jätehuollon järjestämiselle merkitykselliset jätteen ominaisuudet. Jätteen haltijan tulee myös tietää jätteen ympäristö- ja terveysvaikutukset ja tarvittaessa antaa tieto eteenpäin muille toimijoille. (Jätelaki 646/2011 § 12.) Euroopan parlamentilla on strateginen lähestymistapa ympäristössä oleviin lääkeaineisiin, siinä otetaan huomioon, että lääkeaineita päätyy jätevedenpuhdistamojen läpi ympäristöön. Strategiassa katsotaan, että vesistöjen pilaantumisen torjumiseksi, vahingot on ensisijaisesti torjuttava siellä, missä ne syntyvät. Euroopan komissio tukee lisätutkimuksia, jotka liittyvät ympäristössä oleviin lääkeaineisiin ja niiden jäämille altistumiseen, jos

niillä on merkitystä ihmisen terveydelle, ympäristölle ja sen vesi- ja meriekosysteemille. (Euroopan parlamentti 2020.)

Lääkejätteet ovat vaarallista jätettä ja ne tulee kerätä erikseen muusta jätteestä. Jokaisella terveydenhuollon yksiköllä on oltava oma lääkejäteohjeistus eli suunnitelma, miten ne kerätään ja käsitellään. Jokaisella yksiköllä on vastuu laatia yksikölle oma ohjeistus. On tärkeää, että erilaiset lääkejätteet erotetaan toisistaan, koska niitä käsitellään eri tavalla. Lääkejätteitä käsitellään suojakäsineillä ja ne pidetään erillään muista jätteistä, eikä niitä kaadeta viemäriin. Tabletit, kapselit yms. kiinteät lääkevalmisteet kerätään suljettavaan astiaan, joka vielä pakataan vaarallisen jätteen astiaan. Nestemäinen lääkejäte pakataan suljettavaan vuotamattomaan vaarallisen jätteen astiaan, ampullien ylijäämäsisältö voidaan vetää suljettavaan ruiskuun. (Häkkinen 2018.) Gadoliniumpohjainen tehosteaine annostellaan potilaan painon mukaan, mutta ruiskuun jäänyt käyttämätön gadolinium kerätään erilliseen lääkejätteen keräysastiaan. Myöhemmin se kuljetetaan hävitettäväksi ja poltetaan jätteenkäsittelylaitoksella. (Ognard ym. 2021.) Astiaan kirjataan lähetettävän yksikön nimi, lääkeaineen virallinen kuljetusnimi, nestemäinen, myrkyllinen, lääkejäte ja lisäksi kiinnitetään 6.1 vaaralliset aineet varoituslipuke sekä ympäristövaarallinen aine -varoituserkki. (Häkkinen 2018).

### 3.2 Jäteveden kiertokulku

Jätevettä syntyy erilaisista lähteistä, kuten kotitalouksista, sairaaloista, pesuloista ja teollisuudesta. Jätevesi voi sisältää erilaisia haitta-aineita, jotka voivat olla ympäristölle vahingollisia. Jätevesi kulkeutuu jätevedenpuhdistamolle, jossa se käy läpi puhdistusprosessin. (Tuominen ym. 2022: 9.) Prosessiin kuuluu mekaaninen puhdistus, jolla erotellaan kiinteässä muodossa olevat aineet, kemiallisesti saostetaan fosfori ja biologisesti poistetaan orgaaninen aines sekä typpi. (VVY a). Vaikka nykyiset puhdistusprosessit ovat tehokkaita, ei kaikkia haitta-aineita saada poistettua jätevesistä (Tuominen ym. 2022: 9). Puhdistusprosessissa syntyy lietettä, jota voidaan jatkojalostaa esimerkiksi maanparannukseen tai siitä voidaan tehdä biokaasua (Vilpanen & Seppälä 2021: 2, 14). Kun liete on poistettu, loput käsitellyt jätevedet johdetaan purkuputken kautta vesistöihin (Vieno & Arjonen 2021: 9).

Veden kiertokulku jatkuu pintavetenä, joita ovat järvien ja jokien vedet. Tätä vettä voidaan käyttää juomavetenä, mutta se vaatii ensin puhdistuksen vesilaitoksella. Vesistöistä vesi imeytyy maakerrosten läpi tai höyrystyy ilmaan ja sataa myöhemmin toisaalla vetenä maahan. Imeytyessään maakerrosten läpi vesi puhdistuu ja siitä muodostuu pohjavettä, joka kelpaa sellaisenaan juomavedeksi. (Cantell ym. 2018.) Joista

pintavesi juoksettuu meriin, mutta myös meriveden ja pohjaveden välillä tapahtuu vuorovaikutusta. Vuorovaikutuksessa erilaiset metallit, hiili ja ravinteet vaihtuvat prosessin aikana ja sillä on merkitystä rannikoiden ekologiseen ympäristöön. (Zhang ym. 2023.)

## 4 Opinnäytetyön tarkoitus, tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tarkoituksena on koota tietoa gadoliniumpohjaisten tehosteaineiden käyttäytymisestä vesistöissä sekä tietoa siitä, miten vesistöjen gadoliniumpitoisuuksia voidaan vähentää. Tavoitteena on lisätä röntgenhoitajien ympäristöasioiden tietämystä.

Tutkimuskysymykset:

1. Mitkä ovat gadoliniumpohjaisten tehosteaineiden vaikutukset vesistöihin?
2. Miten gadoliniumpohjaisten tehosteaineiden vesistöihin kohdistuvia haittoja voidaan vähentää?

## 5 Opinnäytetyön menetelmät

### 5.1 Kuvaileva kirjallisuuskatsaus

Opinnäytetyömme tehdään kirjallisuuskatsauksena. Se on menetelmä, joka kehittää ja arvioi olemassa olevaa teoriaa sekä kehittää tieteenalan teoreettista ymmärrystä ja käsitteistöä. Kirjallisuuskatsaukseen sisältyy osiot kirjallisuuden haku, arviointi ja aineiston perusteella tehty synteesi sekä analyysi. Opinnäytetyömme on kuvaileva eli narratiivinen kirjallisuuskatsaus. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus kertoo tai kuvaa aiheeseen liittyvää aikaisempaa tutkimusta sekä tutkimuksen laajuutta, syvyyttä ja määrää. Menetelmälle on tyypillistä, että kysymyksenasettelu voi olla laaja ja tutkimukseen sisällytetään erilaisia rajauksia. Materiaalin hankinta ja tekstiaineiston synteesi taulukoituna ovat omia prosessejaan valitussa menetelmässä; taulukon tehtävä on osoittaa olemassa olevan tutkimuksen arvo ja kontribuutio analyysimaisessa muodossa. (Suhonen & Axelin & Stolt 2016: 7–10.) Kuvailevassa kirjallisuuskatsauksessa on vahvuutena, että saatujen hakutulosten perusteella hakuprosessia voidaan mukauttaa. Kuvailevassa tyylissä voi kuitenkin olla heikkoutena, että se sisältää tutkijan julkilausumattomia havainnoja ja ennakkoluuloja, katsausaineisto voi myös rajoittua ainoastaan hyvin viitattuun

kirjallisuuteen. (Vilkkä 2023: 20.) Valmiin raportin tarkoitus on tuottaa lukijalle enemmän ymmärrystä käsiteltävästä aiheesta verrattuna, jos hän lukisi tutkimukset erikseen (Niela-Vilén & Hamari 2016: 32–33).

## 5.2 Aineiston keruumenetelmä

Aineisto on kerätty systemaattisella tiedonhaulla, jonka teimme samoilla hakusanoilla moniin eri tietokantoihin. Tämä siitä syystä, että hakumenetelmä korostaa katsauksen läpinäkyvyyttä ja lukija pystyy arvioimaan menetelmän luotettavuutta helpommin. Lisäksi teimme manuaalisen haun eli kävimme läpi löydettyjen aineistojen lähdeluettelot, joiden kautta voimme saada lisäarvoa kirjallisuuskatsauksemme. Käytimme hyödyksi myös lumipallotekniikkaa, toisin sanoen kävimme läpi katsaukseen valittujen artikkelien viittaukset, jos sieltä löytyisi katsauksemme soveltuvia tutkimuksia. (Vilkkä 2023: 16–17, 74–75.)

Ennen varsinaista tiedonhakua teimme koehakuja, jotta sopivat hakusanat tarkentuivat. Samalla kartoitimme, mitä tietoa ja tutkimuksia aiheesta on jo olemassa. Jo tässä vaiheessa peilasimme aineistoa tutkimuskysymyksiin. Koehakuvaiheessa kokeilimme hakusanaa radiografia, mutta huomasimme, että se supisti hakutuloksia huomattavasti ja päätimme jättää sen käyttämättä. Samoin perustein päädyimme käyttämään haussa vain englanninkielisiä sanoja.

Aineiston mukaanotto- ja poissulkukriteerit (Taulukko 1) tarkentuivat aineiston hakujen myötä. Emme halunneet heti tehdä liian tarkkaa rajausta aineiston suhteen, kuten esimerkiksi sisällyttää pelkät terveydenhuoltoon liittyvät tutkimukset, koska tarvitsimme tietoa muiltakin aloilta. Perusrajaukset, kuten julkaisun ikä ja kieli, teimme heti alkuvaiheessa. Valitsimme opinnäytetyöhömme vain vertaisarvioidut tieteelliset julkaisut, jotka olivat luettavissa maksutta.

Taulukko 1. Mukaanotto- ja poissulkukriteerit

Mukaanottokriteerit	Poissulkukriteerit
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle 10 vuotta vanha</li> <li>• Julkaisukieli englanti</li> <li>• Julkaisu käsittelee tehosteaineita</li> <li>• Jätehuoltoon liittyvistä julkaisuista lääkejätteitä käsittelevät</li> <li>• Vertaisarvioitu tieteellinen julkaisu</li> <li>• Artikkelit luettavissa maksutta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Julkaisu käsittelee lääkejätteitä, muttei tehosteaineita</li> <li>• Muut tehosteaineet</li> <li>• Yli 10 vuotta vanhat</li> <li>• Veden puhdistuksen kemiallisia jätteitä käsittelevät</li> </ul>

Varsinaisen tiedonhaun teimme koehakujen perusteella löydetyillä hakusanoilla. Aineistoa rajasimme etukäteen päätettyjä mukaanotto- ja poissulkukriteerejä noudattaen. Käytimme tiedonhaussa sosiaali- ja terveysalan tietokantoja Science Direct, ProQuest, PubMed ja Cinahl, joihin pääsimme Metropolia Ammattikorkeakoulun kirjaston LibGuides -verkkosivun kautta. Hakusanoja olivat ecotoxicological, ecotoxicity, toxicity, wastewater, environment, environmental effect, iodinated contrast agent, iodinated contrast media ja gadolinium. Muodostimme Boolean operaattoreiden (AND ja OR) avulla hakusanoista sopivat hakulausekkeet. Päätimme olla käyttämättä Boolean operaattoria NOT, koska epäilimme, että se sulkee liikaa pois ja halusimme löytää laajalajaisesti aineistoa tietokannoista. Käytimme haussamme apuna lainausmerkkejä ja sulkuja. Sulkujen avulla saimme ryhmiteltyä samankaltaisia hakusanoja omiksi yksiköikseen. Lainausmerkkejä taas käytimme sanoissa, jotka halusimme liittää kokonaisuudeksi, jolloin tietokanta etsii kyseisiä sanoja yhdessä. (Vilka 2023: 58–59.) Saimme apua haun toteuttamiseen Metropolian kirjaston tiedonhaun työpajasta. Alla taulukko tiedonhausta (Taulukko 2).

Taulukko 2. Tiedonhaun taulukko

Tietokanta	Hakusanat	Osumat	Otsikon perusteella	Abs-traktin perusteella	Koko tekstin perusteella	Lopullinen valinta
Science Direct	(ecotoxicological OR ecotoxicity OR toxicity) AND wastewater AND (environment OR "environmental effect") AND ("iodinated contrast agent" OR "iodinated contrast media" OR gadolinium)	736	49	28	11	9
ProQuest	(ecotoxicological OR ecotoxicity OR toxicity) AND wastewater AND (environment OR "environmental effect") AND ("iodinated contrast agent" OR "iodinated contrast media" OR gadolinium)	500	13	5	1	1
PubMed	(ecotoxicological OR ecotoxicity OR toxicity) AND wastewater AND (environment OR "environmental effect") AND ("iodinated contrast agent" OR "iodinated contrast media" OR gadolinium)	16	5	4	0	0
Cinahl	(ecotoxicological OR ecotoxicity OR toxicity) AND wastewater AND (environment OR "environmental effect") AND ("iodinated contrast agent" OR "iodinated contrast media" OR gadolinium)	14	0	0	0	0
Manuaalinen haku						3

Hakutuloksena saimme paljon osumia eri aloihin liittyen, erityisesti kemianteollisuuteen liittyviä artikkeleita oli paljon. Haasteena oli löytää kirjallisuuskatsauksemme sopivat artikkelit. Perusrajausten läpi päässeiden aineistojen sisältöihin lähdimme tutustumaan tarkemmin. Valintaprosessi lähti liikkeelle otsikkotason tarkastelulla. Sopivan otsikon omaavista luimme tiivistelmän ja tiivistelmän sisällön perusteella jatkoon päässeistä luimme koko julkaisun. (Niela-Vilén & Hamari 2016: 26–27.) Karsintaprosessin lopuksi saimme valikoitua 13 opinnäytetyöhömme sopivaa artikkelia.

Dokumentoimme aineiston valintaprosessin huolellisesti ja kattavasti. Tiedonhaku on kuvattu sekä narratiivisesti että taulukoiden. Käytetyt tietokannat ja hakusanat on kirjattu ylös kuten myös koko polku hausta, sisältäen numeraalisen raportoinnin kunkin hakuvaiheen kohdalla. Hakutulosten määrä näkyy hakuprosessin kuvauksessa, joka

esitellään taulukkona opinnäytetyön sisällä (Taulukko 2). Aineiston analyysi on taulukoitu erikseen (Taulukko 3). Esittelemme valitut artikkelit, niiden tekijät, tutkimustavan ja sisällön työn liitteenä olevassa taulukossa (Liite 1). Näin lukija voi seurata haun etenemistä ja tarvittaessa toistaa haun. Huolellinen taulukointi lisää menetelmän luotettavuutta. (Tampereen yliopiston kirjasto.)

### 5.3 Aineiston analysointimenetelmä

Valitulle aineistolle tehdään kvalitatiivinen aineiston analyysi, tarkoituksena on taulukoida saamamme aineisto ja luoda näin kokonaiskuva ja ymmärrys aiheesta.

Aineistot luetaan useampaan kertaan, niiden sisältö luokitellaan ja samankaltaiset teemat yhdistetään alaluokiksi, jotka puolestaan yhdistyvät yläluokiksi ja niistä muodostuvat pääluokat. Näitä luokkia vertaillaan ja ryhmitellään, prosessin ollessa usein iteratiivinen. Seuraavaksi kootaan synteesi vertailun kautta löytyneistä eroavaisuuksista ja yhtäläisyyksistä niitä tulkiten ja analysoiden. (Niela-Vilén & Hamari 2016: 30–31.)

Sisältöanalyysin kolme vaihetta ovat analyysin valmistelu, organisointi ja raportointi. Valmistelussa aineisto järjestetään tutkittavaan muotoon aineistoa tunnistuen ja seuloen. Selvitetään mm. löydettyjen artikkeleiden tutkimusaihe, menetelmä ja tavoite. Järjestämävaiheeseen kannattaa tehdä apuvälineitä havainnollistamaan ja auttamaan jäsentelyssä. Aineiston jäsentämiseen ja yhdistämiseen voi käyttää apuna mitä tahansa keinoa, niin kuvioita, taulukoita kuin kerrontaa, kunhan se palvelee tarkoitustaan ja on tekijän itsensä ymmärrettävissä. Organisointivaiheessa siirrytään aineiston perusteella tehdyn analyysin tuloksiin ja päätelmiin. Kolmas eli raportointivaihe pyrkii kuvaamaan tarkasti niin analyysin kuin tulokset sekä tekstinä että taulukoiden ja sitä kautta mahdollistaen haun toistettavuuden. (Vilka 2023: 86–88.) Meillä organisointivaihe ja raportointivaihe ovat osittain samanaikaisia prosesseja, jotka kulkevat eteenpäin toinen toistaan vahvistaen.

### 5.4 Aineiston analyysi

Otsikon perusteella valitsimme jatkoon 67 artikkelia, joista abstraktin perusteella jatkoon meni 37 artikkelia. Luimme ne kaikki läpi ja teimme jokaisen sisällöstä muistiinpanoja sekä pienen tiivistelmän. Tarkastelimme mitä artikkelissa oli tutkittu, miten oli tutkittu, kuinka tutkimustulokset oli esitelty, miten hyvin ne vastasivat tutkimuskysymyksiimme sekä kuinka käyttökelpoisena koimme artikkelin. Kävimme läpi havaintojamme yhdistellen niitä ja luoden alustavia ylä- ja pääluokkia.



Alkuperäinen tarkoituksemme oli selvittää mitä ympäristövaikutuksia jodipitoisilla ja gadoliniumpohjaisilla tehosteaineilla on. Hakusanoja kartoittaessamme otimme nämä kummatkin huomioon, ja molemmat päätyivät lopullisiin hakusanoihin. Sen takia valittujen artikkeleiden sisällönanalyysin ensimmäinen jaottelu oli artikkeleihin, joissa käsitellään jodipitoisia tehosteaineita ja niihin, joissa käsitellään gadoliniumpohjaisia tehosteaineita. Jätevedet ja ympäristövaikutukset olivat kaikkia tuloksia yhdistävät aiheet.

Jodipitoisiin tehosteaineisiin keskittyviä artikkeleita oli määrällisesti selkeästi vähemmän, ja ne sisälsivät varsin niukasti tietoa, joka oli valtaosaltaan jätevesienkäsittelyn kemiaan liittyvää. Tiedon monipuolisuuden puuttuminen sekä kohdistuminen oman alamme ulkopuolelle oli syy, miksi jätimme jodipitoiset tehosteaineet kokonaan pois kirjallisuuskatsauksestamme. Gadoliniumpohjaisten tehosteaineiden ympäristövaikutuksista oli monipuolisesti tietoa ja löysimme niitä käsittelevistä artikkeleista teemoja, joista syntyi alaluokkien kautta yläluokkia, jotka yhdistyivät pääluokiksi.

Valitut artikkelit olivat laaja-alaisia, mutta niiden sisällöstä oli tehtävissä kvalitatiivisia luokitteluja, joilla on selkeä syy-seuraussuhde toisiinsa. Kausaliteetin lisäksi luokittelussa nousi teemoja ja alaryhmiä muodostaen kokonaisuuden, mikä tarjoaa ehdotuksia ongelman ratkaisemiseksi.

Taulukko 3. Aineiston analyysin taulukko

pelkistetty ilmaus	alaluokka	yläluokka	pääluokka
Gd tehosteaine liikkuu viemäriverkostossa hitaammin.	Virtausnopeus	Kiertokulku	Vaikutukset vesistöihin
Jätevedenpuhdistuksessa ei saada Gd tehosteainetta poistettua.	Jäteveden puhdistus		
Jätevedenpuhdistuslaitoksilta poistovesi juoksetetaan jokien ja järvien pintavesiin, jokien rantojen suodatuskaivot suodattavat vettä juomavedeksi.	Suodatuskaivot		
Tarve tutkia eri ekosysteemien kontaminaatiota, jotta saadaan selville gadoliniumin ympäristövaikutus.	Vesiekosysteemi		
Päivittäin otetut näytteet jäteveden tulo- ja poistovedestä	Jätevesinäytteet	Päästömäärät maailmalla	
Ihmisperäisen Gd:n jätevesipuhdistamoon päätyvän päivittaisen määrän mittaaminen.	Ihmisperäinen gadolinium		
Tutkimuksia päästömääristä on tehty Saksassa, Ranskassa, Unkarissa ja Japanissa	Kansainvälisyys		
Jätevedenpuhdistuksessa ei saada Gd tehosteainetta poistettua ja poistovesi juoksetetaan vesistöihin.	Ajautuminen pohjavesiin	Paluu ruokaketjuun	
Gd tehosteaine kulkeutuu juomavedenpuhdistamojen läpi vesijohtoveteen.	Juomavesien kontaminaatio		
Gd tehosteaineen yhdiste hajoaa mahanesteen vaikutuksesta.	Biologiset vaikutukset		
Haittoja ihmiselle ei ole vielä tutkittu riittävästi.	Myrkyllisyys		
Levät pystyvät keräämään gadoliniumia merivedestä.	Levät	Biologinen suodatus	
Kosteikkoihin kertyy paljon gadoliniumia.	Kosteikot		
Gd altistus vaikuttaa kasvin kasvuun negatiivisesti.	Fotosynteesi		
Makrolevä pohjainen sorptio voisi olla ratkaisu ihmisen aiheuttamiin Gd rikastumiin vesistöissä.	Kyky absorboida		
Tehosteainetta saaneiden potilaiden virtsan kerääminen talteen.	Keräyspussien käyttö	Virtsan kerääminen	
Röntgenhoitajan asenne ja ohjeistus virtsan keräykseen.	Käytännön toimet		
Estetään tehosteaineita pääsemästä viemäriin.	Kuormituksen vähentäminen		

Katsauksemme valikoitui koko tekstin perusteella 13 artikkelia, jotka jakautuivat pääluokiksi tutkimuskysymystemme mukaan. Artikkeleista nousseet pelkistetyt ilmaukset ja niistä syntyneet alaluokat on yhdistetty yläluokiksi, jotka valikoituivat otsikoiksi, joiden mukaan raportoimme tutkimustulokset. Yläluokat on jaoteltu pääluokkiin. Kyseinen luokittelu on esitelty taulukossa 3. Osa artikkeleista oli sisällöltään monitahoisia, tuoden uutta tietoa ja näkökulmaa useampaan yläluokkaan.

## 6 Tulokset

### 6.1 Vaikutukset vesistöihin

Lääkejätteiden kulkeutuminen jätevesiin on hyvin keskeinen ongelma. Yksi yläluokista on jätevesien käsittelylaitosten kyvyttömyys puhdistaa gadolinium jätevesistä, johtuen gadoliniumin omista ominaisuuksista. Tämä koskee ainoastaan ihmisperäistä kuten magneettikuvauksen tehosteaineena käytettyä gadoliniumia. Luonnossa esiintyvä gadolinium ei aiheuta samoja ympäristöhaittoja. (Laczovics ym. 2023.) Ihmisperäisen gadoliniumin määrä vesistöissä on sidoksissa magneettikuvauslaitteiden määrään (Inoue ym. 2022). Kyseisten päästöjen määrät ovat korkeita kaupunkiympäristöissä (Schmidt & Bau & Merschel & Tepe 2019) ja korkealuokkaisen terveydenhuollon maissa (Pereto & Lerat-Hardy & Baudrimont & Coynel 2023). Päästöjen määrät vesistöihin nousivat toiseksi yläluokaksi. Gadoliniumpohjainen tehosteaine voi mahdollisesti kulkeutua ihmisen ruokaketjuun kolmea reittiä; saastuneen vesijohtoveden kautta, ravintona käytettävistä eläimistä, jotka juovat saastunutta vettä tai ravintokasveista, joiden kasteluun käytetään saastunutta vettä (Scurtu ym. 2022). Esittelemme ensin, kuinka gadolinium kulkeutuu jätevesien kautta vesistöihin ja miten suurista määristä on kyse, jotta kunnolla ymmärtäisimme kuinka iso ongelma ihmisperäisen gadoliniumin kulkeutuminen takaisin ruokaketjuun on. Tämän takia paluu ruokaketjuun on oma osionsa, vaikka on myös osa kiertokulkua.

#### 6.1.1 Kiertokulku

Magneettikuvantamisessa tehosteaineena käytettävä gadolinium poistuu ihmisen elimistöstä munuaisten kautta virtsana noin 1,5–30 tunnin aikana. Gadoliniumpohjainen tehosteaine päätyy virtsan mukana viemäriin ja sieltä jätevedenpuhdistuslaitoksille. (Schmidt ym. 2019.) Jätevedestä poistetaan epäpuhtaudet fysikaalisilla, kemiallisilla ja biologisilla prosesseilla (Inoue ym. 2021). Tehosteaineena käytettävä gadolinium on suunniteltu hyvin stabiiliksi yhdisteeksi ja tästä syystä se läpäisee jätevedenpuhdistuslaitokset pääosin muuttumattomana (Schmidt ym. 2019). Vain noin 10 % saadaan puhdistettua normaalissa prosessissa (Scurtu ym. 2022). Gadoliniumpohjainen tehosteaine saadaan lähes täysin poistettua kalliilla käänteisosmoosikalvotekniikalla, mutta se on käytössä vain hyvin rajallisesti viimeisen tekniikan mukaisissa jätevedenpuhdistuslaitoksissa (Oluwasola & Ahmad & Shoparwe & Ismail 2022).

Puhdistettu jätevesi johdetaan järvien ja jokien pintavesiin, gadoliniumpohjaista tehosteainetta on havaittu näissä pintavesissä ja veden mukana kulkevassa kiinteässä maaineksessa sekä elollisissa organismeissa. (Schmidt ym. 2019.) Gadoliniumia sisältävät tehosteaineet voivat stabiilisuutensa ansiosta suodattua joen rantojen suodatuskaivojen läpi sekä juomavedenpuhdistamojen läpi ja näin päätyä juomavesiin (Laczovics ym. 2023). Saksassa tehdyssä tutkimuksessa (Schmidt ym. 2019), jossa tutkittiin gadoliniumpohjaisen tehosteaineen määriä vesijohtovedessä ja pikaruokaketjujen hajuomissa, osoitettiin, että sitä ei saada puhdistettua jätevedestä vaan se kulkeutuu mataliin pohjavesikerroksiin, päästen näin ravintoketjuun vesijohtoveden mukana. Isoissa joenrantakaupungeissa kuten Berliinissä ja Lontoossa jätevesi johdatetaan rantojen suodatuskaivoihin ja näillä alueilla antropogeenistä gadoliniumia voidaan havaita vesijohtovedessä. Antropogeenisen gadoliniumin esiintymismäärä joen valuma-alueilla on täysin verrannollinen valuma-alueen väestötiheyteen, terveydenhuoltojärjestelmän tasoon ja jätevedenpuhdistamon päästömääriin. Valuma-alueilta mikroepäpuhtaudet päätyvät rannikoiden merivesiin ja gadolinium poikkeamia voidaan havaita merenlahdilla maailmanlaajuisesti. (Schmidt ym. 2019.)

Unkarissa, Debrecen kaupungissa vuonna 2014 tehdyssä tutkimuksessa (Laczovics ym. 2023) tutkittiin mallinnoksen avulla antropogeenisen gadoliniumin kulkeutumista jätevesissä. Veden virtauksesta ja gadoliniumin erittymiskinetiikasta johtuen viive tehosteaineen antamisen potilaalle ja jätevedestä tehtyjen mittausten välillä voi olla enintään päivää. Tutkimuksessa kuitenkin huomattiin, että gadoliniumin virtausnopeus viemäriverkostossa on hitaampi kuin muun jäteveden, koska gadolinium on pienihiukkainen aine, joka ei liukene veteen. Normaalisti Debrecen kaupungin viemäriverkostoston virtausnopeus on noin vuorokausi, kun gadoliniumin kohdalla puhutaan jopa kahden vuorokauden viiveestä. (Laczovics ym. 2023.) Tokiossa seurattiin huhtikuussa 2019 gadolinium määriä 25 jätevesilaitoksen tulovedestä. Jätevesinäytteet kerättiin aina keskiviikkona ja perjantaina, koska viikonloppuna tehdään vähemmän magneettitutkimuksia ja gadoliniumilla menee ihmisestä erittymisen jälkeen noin kaksi vuorokautta saavuttaa jätevedenpuhdistuslaitos viemäristössä. (Inoue ym. 2022.)

### 6.1.2 Päästömäärät maailmalla

Tehosteaineena gadoliniumia on käytetty vuodesta 1988 lähtien ja ensimmäisten 30 vuoden aikana sitä on annettu maailmanlaajuisesti 460 miljoonaa annosta (Brünjes & Hoffman 2020). Ihmisperäisen gadoliniumin kulkua jätevesien mukana vedenpuhdistamoihin ja sieltä eteenpäin tutkitaan koko ajan enenevässä määrin. Gadoliniumin mää-

rään jätevesissä vaikuttaa enemmän magneettikuvauslaitteiden määrä kuin väestötiheys. Koska laitteiden määrä ja vesistöihin ajautuvan gadoliniumin määrä korreloivat keskenään, voidaan tulevia määriä ja poikkeamia arvioida laitteiden lukumäärän perusteella. (Inoue ym. 2022.) Kvantamisen ja terveydenhuollon saavutettavuuden lisääntyessä, tulevat tehosteaineiden päästömäärätkin todennäköisesti kasvamaan (Pereto & Lerat-Hardy & Baudrimont & Coynel 2023).

Joidenkin suurien kaupunkien kuten Berliinin (Schmidt ym. 2019) ja Tokion (Inoue ym. 2022), vesistöissä on raportoitu korkeita gadoliniumpitoisuuksia. Myös maaseuduilla, missä ei ole magneettikuvauslaitteita, on raportoitu korkeampia gadoliniumpitoisuuksia. Tämä johtuu siitä, että vaikka kuvauslaitteet on keskitetty kaupunkeihin, käy tutkimuksissa kauempana asuvia potilaita, joista gadolinium erittyy virtsan mukana pois kehosta vasta heidän palattuansa koteihinsa (Brünjes & Hoffman 2020). Saksassa on kauttaaltaan havaittu gadoliniumia pintavesissä, kaupunkiympäristöissä enemmän (Schmidt ym. 2019).

Unkarin Debrecen jätevesipuhdistamon päivittäin toimittamat vesinäytteet tutkittiin ja niiden gadoliniumpitoisuudet mitattiin. Kaupungissa tehdään kahdessa paikassa magneettikuvauslaitteita eikä muita ihmisperäisen gadoliniumin lähteitä ole, joten kaiken mittauksissa esiintyvän ihmisperäisen gadoliniumin voidaan olettaa olevan tehosteaineista. Keskuksissa on käytössä kaksi eri gadoliniumpohjaista tehosteainetta, joista toinen on lineaarinen ja toinen makrosyklinen, mutta niillä on samanlaiset farmakokineettiset ominaisuudet eli niitä ei tarvitse erotella mittauksissa toisistaan (Laczovics ym. 2023.)

Pitoisuuksia vesistä mitattiin 45 päivän ajan syksyllä 2014. Tänä aikana tehosteaineella tehtiin 1008 tutkimusta, joissa potilaille annettiin yhteensä noin 700 g gadoliniumia. Tästä määrästä mittausten mukaan saatiin jätevesilaitoksessa otettua talteen 37 %. Kokonaisuudessaan mittauksissa oli 531 g, josta ihmisperäistä oli 261 g eli 49 %. Koko vuonna magneettikuvauslaitteilla 6731 potilasta, joille annettiin yhteensä 4500 g tehosteainetta. (Laczovics ym. 2023.) Vaikka reilu kolmannes saadaan poistettua, ajautuu vesistöihin silti valtavasti tehosteaineina käytettyä gadoliniumia. Mikäli kyseisen 45 päivän aikaisia mittaustuloksia sovelletaan koko vuoden määriin ja jätevesilaitos puhdistaisi saman 37 %, jäisi vesistöihin silti 2835 g, josta ihmisperäistä gadoliniumia 1389 g. Kuten aiemmin on esitelty kuviossa 1, ei Unkari ole eniten tutkimuksia tehneiden maiden joukossa vaan vasta sijalla 23. On useita maita, joilla on paljon suuremmat päästöt.

Siinä missä Unkarissa yhdessä keskikokoisessa, noin 200 000 asukkaan kaupungissa vesistöihin ajautuu vuodessa noin 1,4 kiloa ihmisperäistä gadoliniumia (Laczovics ym. 2023), niin Japanissa, missä on maailman eniten magneettikuvauslaitteita, arvioidaan pelkästään Tokion jokiin vapautuvan vuosittain noin 185 kiloa tehosteaineena käytettyä gadoliniumia. Näin iso määrä aiheuttaa syystäkin huolta vesiekosysteemiin kohdistuvista vaikutuksista (Inoue ym. 2022.) Eurooppa kokonaisuudessaan on huomattava päästöjen lähde, koska siellä on paljon maita, joissa on korkeatasoinen ja saavutettavissa oleva terveydenhuolto. Vuosina 2014–2020 pelkästään Ranskan suurten vesistöjen kautta valtameriin kulkeutui 8,3 tonnia gadoliniumia. (Pereto ym. 2023.)

Ympäristöstrategioiden arvioimiseen ja kehittämiseen on kehitetty eurooppalainen vuomalli; gadoliniumpohjaisten tehosteaineiden kulutukseen perustuva gadoliniumin virtausmalli (Pereto ym. 2023). Sen avulla on tarkoitus voida paikallistaa saastelähteet ja sitä kautta rajoittaa ihmisten terveyteen ja biologiseen monimuotoisuuteen kohdistuvia vaikutuksia. Vuomalli perustuu Ranskan suurimpien vesistöjen virtauksiin, gadoliniumpohjaisten tehosteaineiden vuotuisiin kulutusmääriin ja väestötietoihin. Näiden perusteella havainnot on yleistetty ulottumaan muualle Eurooppaan, yhteensä 48 Euroopan maahan. Sen perustuessa Ranskan lukuihin, nojaa vuomalli vahvasti Ranskan terveydenhuollon saatavuuden tasoon ja siksi arvioinnissa on käytetty eurooppalaista sekamallia, joka ottaa huomioon muista maista saatavat tiedot, sikäli kun ne ovat olleet saatavilla. Eurooppalaisen vuomallin on tarkoitus olla enemmän laadullinen kuin määrällinen. (Pereto ym. 2023.)

Ranskan lukujen mukaan koko Euroopan ihmisperäisestä gadoliniumista 43 % ajautuu jokien kautta Atlantin valtamerelle, 24 % Mustallemerelle, 23 % Välimerelle ja 9 % Itämerelle. Osa siirtyy pintavesistä pohjavesiin ja edelleen juomavesiin jääden kaupunkien vesikiertoon, näin vaikuttaen todellisiin virtausmääriin. (Pereto ym. 2023.)

Suomen päästöt virtaavat pääosin Itämereen. Suomi yhdessä Tanskan ja Baltian maiden kanssa muodostaa 29 % Itämeren gadoliniumpäästöistä kun taas Ruotsi yksinään vastaa 23 %:sta. Mallinnoksen mukaan Suomesta virtaa pieni määrä myös Pohjois-Atlantille. Saksa, Ranska ja Italia muodostavat 40 % Koko Euroopan vuotuisista päästöistä. Maailmanlaajuisessa skaalassa Yhdysvallat, Japani, Etelä-Korea ja Brasilia aiheuttavat merkittäviä gadoliniumvirtoja valtameriin. (Pereto ym. 2023.)

### 6.1.3 Paluu ruokaketjuun

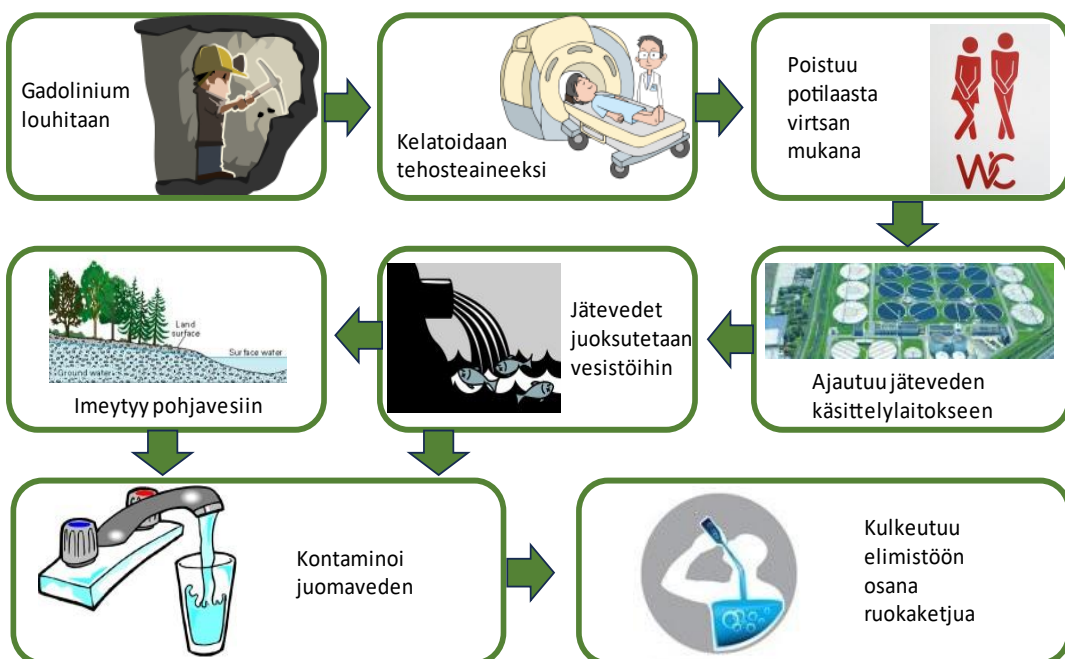
Antropogeenisen gadoliniumin kulkeutuminen pohjavesiin ja sitä kautta takaisin osaksi ihmisten ruokaketjua on seuraus ympäristöön päätyvistä lääkejätteistä. Peltojen kastelu järvien tai jokien pintavedellä sekä niiden lannoitus jätevedenpuhdistamojen lietteellä voi johtaa gadoliniumpohjaisen tehosteaineen kulkeutumiseen ihmisten elintarvikeketjuun kasvien kautta. Tämän lisäksi gadoliniumpohjainen tehosteaine voi päätyä ihmisen ravintoketjuun saastuneen vesijohtoveden kautta tai eläimistä, jotka juovat saastunutta vettä. (Scurtu ym. 2022.) Gadoliniumpohjaisen tehosteaineen ei ole toistaiseksi havaittu aiheuttavan terveysriskiä, mutta sen esiintyminen vesijohtovedessä luo mahdollisuuden altistua myös muille mahdollisesti haitallisille jätevesilaitosten läpi suodatuville yhdisteille, kuten lääkkeille ja kemikaaleille, jotka voivat häiritä hormonien tuotantoa. (Schmidt ym. 2019).

Saksassa kuudessa suuressa kaupungissa tehdyssä tutkimuksessa (Schmidt ym. 2019), tutkittiin antropogeenisen gadoliniumin kulkeutumista pikaruokaketjujen virvoitusjuomiin vesijohtoveden kautta. Virvoitusjuomat valmistetaan sekoittamalla tiivistettä vesijohtoveteen. Näytteitä kerättiin vuosina 2013 ja 2014 pikaruokaketjujen virvoitusjuomista sekä pikaruokaketjujen vesijohtovedestä, lisäksi analysoitiin yksi pullotettu virvoitusjuoma, jonka pullotus tapahtui muualla Saksassa. Antropogeenisen gadoliniumin kokonaismäärä otoksissa vaihteli 34 prosentista 99 prosenttiin, korkeimmat arvot olivat Berliinissä, jossa jätevedet johdatetaan rantojen saostuskaivoihin. Pullotetussa virvoitusjuomassa ei havaittu gadolinium jäänteitä, koska sen valmistuksessa käytetään käänteisosmoosikalvotekniikkaa, jolla saadaan veden maku ja kovuus pidettyä samana, riippumatta vesilähteestä. Käänteisosmoosi poistaa myös antropogeenisen gadoliniumin vedestä. (Schmidt ym. 2019.)

Vesijohtovesi on peräisin eri lähteistä. Alueilla, joilla juomavedenlähteenä käytetään jonrantojen saostuskaivoja ja niiden tuottamia matalia pohjavesikerroksia on osoitettu, että antropogeenisen gadoliniumin pitoisuudet ovat juomavedessä suurempia. Tutkimuksessa (Schmidt ym. 2019) havaittiin, että Düsseldorfin alueella löytyi runsaasti antropogeenistä gadoliniumia näytteistä. Alueen raakavedestä kolmannes koostuu syvästä pohjavedestä ja loput tulevat rantojen saostuskaivojen kautta, jonka jälkeen raakavesi vielä käsitellään tarkoin menetelmin vedenpuhdistuslaitoksella. Tavanomaiset vedenpuhdistusmenetelmät eivät siis poista antropogeenistä gadoliniumia vesijohtovedestä. Dresdenin alueella raakavesi on lähtöisin neljästä paikasta; vesipadolta, rikastetua pohjavettä, rantasuodatettua vettä ja pohjavettä. Antropogeenisen tehosteaineen poikkeamat tämän alueen vesijohtoveden vesinäytteissä olivat melko pieniä, koska

vesi tulee monesta eri lähteestä ja Dresdenin läpi virtaava joki ei ole vielä kovin saastunut. Karlsruhen alueella vesijohtovesi tuotetaan syvästä pohjavedestä, joka virtaa useiden vuosien aikana maan sedimenttikerrostumien läpi, antropogeenistä gadoliniumia oli alueella vähiten vesijohtovedessä verrattuna verrokkikaupunkeihin. Tämä tutkimus osoitti, että antropogeeninen gadolinium pystyy kulkeutumaan myös syviin pohjavesiin ja sieltä ihmisen ruokaketjuun. (Schmidt ym. 2019.)

Aiemmin on osoitettu, että gadoliniumpohjainen tehosteaine on myrkyllinen vesiekosysteemille, kuten leville, mikroäyriäisille ja simpukoille. Tutkimuksia on tehty aiemmin, joillekin kasveille, kuten riisille, maissille ja tomaatille, näissä on havaittu gadoliniumpohjaisella tehosteaineella olevan vaikutusta kasvin kasvuun. Romaniassa 2022 julkaistussa tutkimuksessa (Scurtu ym. 2022) tutkittiin, onko gadoliniumpohjainen tehosteaine myrkyllistä kasveille. Tutkimuksessa kasvatettiin laboratorioissa *Stevia rebaudiana* kasvia, joka on makeutusaineena käytettävä kasvi, jota altistettiin 30 vuorokauden ajan eri vahvuisella gadoliniumpohjaisella tehosteaineella. Tutkimuksessa havaittiin, että mitä suuremman annostuksen tehosteainetta kasvi sai, sen pienemmäksi jäi sen biomassaa, kasvi ei siis kasvanut korkeutta, eikä kasvattanut kunnollisia juuria, joillakin juuret puutuivat kokonaan. Tutkimuksessa pyrittiin myös selvittämään, gadolinium pitoisuutta elintarvikekäyttöön jauhetussa kasvissa, mutta sitä ei pystytty tällä tutkimuksella todentamaan. (Scurtu ym. 2022.)



Kuva 1. Gadoliniumin kulkureitti louhinnasta ruokaketjuun (Souza & Pedreira & Miró & Hatje 2016)



Brasiliassa tehdyssä tutkimuksessa (Souza ym. 2016) selvitettiin, kuinka vesijohtove-  
destä juotuna saatu gadoliniumpohjainen tehosteaine voisi käyttäytyä ihmisen ruoansu-  
latuselimistössä ja onko eri tehosteaineilla tässä eroja. Tutkimuksessa käytettiin suoda-  
tettua vesijohtovettä, johon lisättiin eri tavoin kelatoituja eli lineaarisia tai makrosyklisiä  
gadoliniumpohjaisia tehosteaineita ja näihin taas sekoitettiin ihmisen mahanestettä  
matkivaa yhdistettä. Havaittiin, että makrosyklisen tehosteaineen yhdiste hajoaa hi-  
taammin verrattuna lineaarisen tehosteaineen yhdisteeseen. Päädyttiin tulokseen, että  
juomavettä nautittaessa, mahaneste hajottaa gadoliniumpohjaisen tehosteaineen yh-  
disteen, jolloin gadolinium pääsee mahdollisesti sellaisenaan verenkiertoon. Biologisia  
vaikutuksia suun kautta nautittuna ei ole kuitenkaan vielä tutkittu riittävästi ja siksi jäte-  
vesien parempaan käsittelyyn tulisi kiinnittää enemmän huomiota. (Souza ym. 2016.)

## 6.2 Miten vaikutuksia voidaan vähentää

Ympäristöystävällinen, luonnollinen ja halpa ratkaisu vesien dekontaminaatioon on bio-  
logiset suodattimet kuten vesikasvit ja makrolevät (Braun & Zavanyi & Laczovics &  
Berényi & Szabó 2018; Ferreira ym. 2020). Vaihtoehtoinen ratkaisu ongelmaan on ke-  
rätä tehosteainetta saaneiden potilaiden virtsa ja sitä kautta vähentää jätevesiin ajautu-  
via määriä (Zanardo ym. 2023).

### 6.2.1 Biologinen suodatus

Jätevesien käsittelylaitokset eivät saa kaikkea antropogeenistä gadoliniumia poistettua  
jätevesistä ja lisäksi käyttömäärät kasvavat jatkuvasti aiheuttaen lisääntyvää kuormi-  
tusta vesistöihin. Tehosteaineena käytetyn gadoliniumin käyttäytymistä luonnossa ei  
tunneta kunnolla, varsinkin kun siinä esiintyy vaihteluita. Ihmisperäisen gadoliniumin  
kuljetusmekanismien ymmärtäminen on tärkeää ja gadoliniumin vaikutuksista ympäris-  
töprosessiin tarvitaan lisätietoa. (Altomare & Young & Beazley 2020.) Biologiset lähes-  
tymistavat saattavat olla ratkaisu vesistöjen lisääntyvälle antropogeeniselle rikastumi-  
selle. On tutkittu kuinka tehokkaita biosorptioita eli biologisesti absorboivia vesikasvit  
(Braun ym. 2018), kosteikot (Altomare ym. 2020) tai makrolevät (Ferreira ym. 2020)  
voisivat olla.

Biopuhdistus on halpa ja luonnollinen menetelmä epäpuhtauksien poistamiseksi. Lauh-  
keilla alueilla esiintyvien vesikasvien tiedetään keräävän raskasmetalleja, minkä vuoksi  
niillä on potentiaalia kerätä myös ihmisperäistä gadoliniumia (Braun ym. 2018). Toinen  
vaihtoehto voisi olla makroleviin perustuva sorptio. Sillä saataisiin yksinkertaisella ja

ympäristöystävällisellä tavalla parannettua veden laatua ja samalla kerättyä talteen gadoliniumia. (Ferreira ym 2020.)

Neljä vesikasvilajia (*Lemna gibba*, *Ceratophyllum demersum*, *Elodea nuttallii*, *Elodea canadensis*) pystyvät biosorptiolla vähentämään makro- ja mikroravinteiden pitoisuuksia vedessä ja ne voivat poistaa suurella tehokkuudella mm. nikkeliä, kromia, lyijyä ja uraania. Näitä vesikasveja nimitetään makrofyteiksi ja niitä käytetään poistamaan epäpuhtauksia teollisuuden jätevesistä. (Braun ym. 2018.) Myös makrolevät ovat biosorpentteja ja vesikasvien lailla potentiaalisia gadoliniumin kerääjiä. Kolme elävää makrolevälajia (*Ulva lactuca*, *Fucus spiralis*, *Gracilaria*) pystyvät kaikki keräämään gadoliniumia merivedestä. Lajien välillä on vain pieniä eroja tehokkuudessa. Makrolevien toksisten aineiden poistotehokkuus on 85 %. (Ferreira ym. 2020.) Kuitenkaan millään makrofytyillä ei ole vaikutusta veden gadoliniumipitoisuuteen; biosuodatusta ei makrofytytien toimesta havaittu. Gadoliniumilla käsitellyn vesikasvin laittaminen puhtaaseen liuokseen osoitti sen luovuttavan gadoliniumin takaisin veteen. Veteen vapautui makrosyklistä tehosteaineesta 99 % ja lineaarisesta 100 %. (Braun ym. 2018.)

On saatu myös viitteitä siitä, että kosteikot tarjoavat nielun ihmisperäiselle gadoliniumille. Aineen sitominen tapahtuu orgaanisen aineen kerääntymisen ja laskeuman avulla. Rakennettujen kosteikkojen vaikutus antropogeenisen gadoliniumin käyttäytymiseen ja kulkeutumiseen vaatii lisää tutkimuksia laajemmilla näytteenotoilla. Tulokset ovat kuitenkin lupaavia ja indikoivat kosteikkojen olevan taipuvaisia biologiseen gadoliniumin puhdistukseen. (Altomare ym. 2020.) Rakennetuilla kosteikoilla olevat vesikasvit sen sijaan eivät kykene vähentämään gadoliniumipitoisuuksia (Braun ym. 2018).

Makrolevät pystyvät toimivan biosuodatuksen lisäksi ottamaan talteen gadoliniumia, joka on muiden harvinaisten maametallien tavoin luokiteltu kriittiseksi raaka-aineeksi. Kyseisten raaka-aineiden tarjonta on rajallista, tuottajien määrä pieni ja niitä on hankala korvata muilla materiaaleilla. Kysyntä teknologiassa on kasvavaa, joten talteenotto on tärkeää. (Ferreira ym. 2020.)

### 6.2.2 Virtsan kerääminen

Italiassa on meneillään tutkimus (Zanardo ym. 2023), jonka tarkoituksena on selvittää kuinka paljon kuvantamisessa käytettäviä varjo- ja tehosteaineita voitaisiin estää pääsemästä viemäreihin, jos varjo- ja tehosteaineita saaneiden potilaiden virtsa kerättäisiin talteen. Aineisto on kerätty heinäkuun 2022 ja toukokuun 2023 välisenä aikana ja tulokset julkaistaan joulukuussa 2023. Otos on kattava: mukaan otetaan 800 potilasta, joista

400:lle on tehty tietokonetomografiatutkimus ja 400:lle magneettitutkimus. Keräykseen suostuvien potilaiden määrän on arvioitu olevan 30 % kontrastiaineilla tehostettujen tutkimusten potilasmäärästä. Aineiston keräys on aikataulutettu niin, että se kattaa suunniteltua alhaisemmankin kuukausittaisen osallistujamäärän, koska mukana on ylimääräisiä kuukausia tarvittavan aineiston määrän saamisen varmistamiseksi. (Zanardo ym. 2023.)

Tutkimukseen osallistuvat potilaat jäävät sairaalaan tunniksi kuvantamistutkimuksen jälkeen. Tänä aikana he virtsaavat ainoastaan virtsasäiliöön, erityisesti juuri ennen kuin poistuvat sairaalasta. Virtsalle tehdään kemiallinen analyysi, jotta virtsassa olevan gadoliniumin ja tietokonetomografiatutkimuksissa varjoaineena käytetyn jodin määrä saadaan selville. (Zanardo ym. 2023.)

Potilaiden ja hoitohenkilökunnan suhtautumista vastaavanlaiseen keräykseen on tutkittu jo aiemmin (Niederste-Hollenberg ym. 2018). Virtsaa kerättiin 24 tuntia tehosteaineen saamisen jälkeen. Potilaat saivat mukaan kotiin virtsapussit, joiden sisältämä superabsorbentti muuttaa virtsan kiinteäksi geeliksi. Pussit hävitetään jätteen mukana, mikäli jäte on menossa polttoon. (Niederste-Hollenberg ym. 2018.)

Potilaiden mielipiteet olivat pääosin myönteisiä, tärkeimpänä pidettiin sitä, että virtsapussien käyttö onnistuu ilman apua vaikkakin öinen käyttö koettiin vaikeammaksi ja ärsyttäväksi. Käyttökokemus oli positiivinen ja keräyksen sekä sen syiden hyväksyntä korkealla. Vapaiden kommenttien mukaan asenne ympäristöasioita kohtaan liittyy läheisesti keräyksen hyväksyntään. (Niederste-Hollenberg ym. 2018.) Tähän peilaten Zanardo ym. tutkimuksessa on todennäköistä saavuttaa 30 % osallistuminen.

Hoitohenkilökunnan näkemykset keräyksestä olivat negatiivisemmat kuin tutkimukseen osallistuneilla potilailla. Heidän arvioinneissaan huomioitiin myös kaikkien potilaiden osallistumishalu, johon kuului keräykseen kielteisesti suhtautuvat. Tämä selittää negatiivisemmän arvion. Hoitohenkilökunta koki suurimman työtaakan tulevan tutkimuksen ja keräyksen selittämisestä potilaille. Niin potilaiden kuin henkilökunnan kannalta tärkein edellytys virtsan keräyksen tuloksellisuuteen on toteuttamisen helppous. (Niederste-Hollenberg ym. 2018.)

## 7 Pohdinta

### 7.1 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Jätevesien mukana vesistöihin ajautuu valtava ja alati kasvava määrä tehosteaineena käytettyä gadoliniumia. Maissa, joissa on korkeatasoinen terveydenhuolto, tehdään enenevässä määrin magneettikuvauksia, mikä tarkoittaa myös tehosteaineiden käytön lisääntymistä. Vesiympäristöön päätyy Euroopassa vuosittain 19 tonnia ihmisperäistä gadoliniumia (Brünjes & Hoffman 2020).

Stabiilina yhdisteenä ihmisperäinen gadolinium kulkeutuu jätevedenpuhdistuslaitoksien läpi, siitä saadaan suodatettua vain noin 10 %. Tämän jälkeen vesi juoksetetaan takaisin vesistöihin ja ihmisperäistä gadoliniumia päätyy pintavesiin ja sieltä juomavedenpuhdistuslaitoksiin tai pohjavesiin. Gadoliniumipohjainen tehosteaine on mahdollista puhdistaa jätevedestä täysin käänteisosmoosikalvotekniikalla, mutta tämä on kallis poistomenetelmä nykyisellä tekniikalla ja isossa mittakaavassa.

Ihmisperäisen gadoliniumin ajautuminen vesistöihin on iso ja kasvava ongelma, jolle tulisi tehdä jotain. Se on haitallista ympäristölle ja ihmisille kulkeutuessaan takaisin ravintoketjuun. Vielä ei tiedetä, kuinka vaarallista se on ihmisille, palautuessaan juomaveden tai ravinnon mukana elimistöön. Tutkimuksessa (Souza ym. 2016) on todettu, että mahaneste kykenee hajottamaan gadolinium yhdisteen ja näin se voi päätyä ihmisen verenkiertoon. Gadoliniumipohjaisten tehosteaineiden on todettu estävän kasvien normaalin kasvun.

Biologisina suodattimina toimivat makrolevät kykenevät absorboimaan itseensä 85 % vedessä olevasta ihmisperäisestä gadoliniumista. Lisäksi niiden avulla voidaan kerätä talteen kallisarvoista ja ehtyvää gadoliniumia. Vesikasvit eli makrofytyt sen sijaan eivät kykene toimimaan biosuodattimina. Rakennetut kosteikot pystyvät biosuodatukseen, mutteivat yhtä hyvin kuin makrolevät.

Jätevesien gadoliniumipitoisuuksia saa vähennettyä keräämällä talteen tehosteainetta saaneiden potilaiden virtsa. Sen voi kerätä joko pussiin, jonka sisältämä superabsorbentti muuttaa virtsan geeliksi, minkä voi hävittää polttoon menevän jätteen mukana tai erillisiin virtsasäiliöihin, joiden sisältö voidaan käsitellä ennen sen päätyä viemäristöön. Parhaillaan tutkitaan kuinka paljon tällä keinolla voisi jätevesien ja sitä kautta ympäristön kuormitusta vähentää.

Isoon ympäristöongelmaan on vähän ratkaisuja. Makrolevät tuskin kykenevät tarjoamaan vaadittavan kapasiteetin verran biosuodatusta, varsinkin kun ne jo nyt puhdistavat vesistä muita epäpuhtauksia. Parempana ratkaisuna pidetään virtsan keräämistä ja mikäli tästä tulisi käytäntö, niin röntgenhoitajien rooli tulee olemaan tärkeä. Potilaiden hyvä ohjeistus ja hoitajan positiivinen asenne motivoivat potilaita osallistumaan keräykseen. Vastaavasti keräyksen onnistuminen motivoi röntgenhoitajia jatkamaan potilaiden kannustusta ja rohkaisua keräykseen. Keräyksen toteuttaminen vaatisi sairaaloiden käytäntöjen muutosta ja niihin röntgenhoitajat eivät voi suoranaisesti vaikuttaa.

## 7.2 Luotettavuus ja eettisyys

Opinnäytetyömme on kuvaileva kirjallisuuskatsaus. Sen tyylissä voi olla heikkoutena, että sillä ei oteta kantaa materiaalin luotettavuuteen tai valikoitumiseen. Lisäämme kirjallisuuskatsauksemme luotettavuutta sillä, että hyväksyimme mukaan tutkimukseen vain vertaisarvioidut julkaisut, lisäksi noudatamme lähdekritiikkiä ja käytämme vain tieteellisiä lähteitä. (Suhonen ym 2016: 9; Niela-Vilén & Hamari 2016: 26, 33.) Tutkimusprosessimme läpinäkyvyyttä parantaa se, että dokumentoimme aineiston haku- ja analysointiprosessit yksityiskohtaisesti. Tarkka dokumentointi mahdollistaa aineistohaun toistettavuuden jonkun muun tekijän toimesta ja lukija voi arvioida kirjallisuuskatsauksen luotettavuutta tätä kautta (Niela-Vilén & Hamari 2016: 32–33.)

Noudatamme työssämme hyvää tieteellistä käytäntöä. Hyvän tieteellisen käytännön mukaan on eettistä ottaa huomioon muiden tutkijoiden työ sekä saavutukset ja kunnioittaa heidän työtään käyttämällä asianmukaisia viittauksia. Hyvän tutkimuseetiikan mukaisesti työ suunnitellaan, toteutetaan ja siitä raportoidaan tarkasti. (Tenk 2012.) Ammattikorkeakoulujen rehtorineuvosto Arene ry:llä on hyvä eettinen ohjeistus opiskelijoille, näiden ohjeiden mukaan olemme perehtyneet opinnäytetyömme aiheeseen, tutustuneet tutkimuseettisiin ohjeistuksiin ja ymmärrämme, että opinnäytetyömme on julkinen asiakirja. Opinnäytetyömme tarkistetaan plagiaatin tunnistusjärjestelmällä (Turnitin) ennen julkaisua. (Arene 2020; 14.)

Mukaanottokriteereissämme artikkelin kielenä on ainoastaan englanti. Suomenkieliset hakusanat putosivat koehakujen kautta pois, koska ne eivät antaneet meille riittävästi tuloksia. Tämä rajaus on myös pudottanut hakutuloksista pois esimerkiksi saksankieliset tutkimukset, joihin olemme törmänneet prosessin aikana ja jotka olemme kokeneet oleelliseksi työmme kannalta, mutta emme ole voineet niitä käyttää tutkimuksen kielen vuoksi. Tämä on saattanut johtaa suppeampaan näkökulmaan ja vähentää tulosten kokonaisvaltaisuutta. Kuitenkin käyttämällä yleisesti osattua englantia tutkimusartikkelien

kielenä, tuomme läpinäkyvyyttä ja luotettavuutta työhän. Käytetyt artikkelit olivat kaikki englanniksi ja moni niistä oli sisällöltään oman alan ja osaamisen ulkopuolella, minkä takia on olemassa käännösvirheiden ja väärinymmärryksen vaara, vaikka pyrimme tekemään huolellisesti niin käännöstyön kuin perehtymisen aiheeseen.

Olemme noudattaneet kirjallisuuskatsauksessamme Metropolia Ammattikorkeakoulun opinnäytetyön ohjeita ja -prosessia. Lähteet ja lähdeviitteet olemme kirjanneet Metropolian kirjallisen työn ohjeiden mukaisesti. Olemme kertoneet asioista omin sanoin ja näin pyrkineet välttämään plagiointia. Opinnäytetyömme on tehty parityönä ja se lisää työmme luotettavuutta, koska olemme voineet pohtia asioita yhdessä ja saada aikaan erilaisia näkökulmia.

### 7.3 Jatkotutkimusehdotukset

Virtsan keräämisen hyötyjä olisi tarpeellista tutkia lisää. Joulukuussa 2023 valmistuva Zanardo ym. tutkimus antaa tietoa siitä kuinka paljon keräys tunnin ajan kuvauksen jälkeen vähentää gadoliniumpitoisuuksia jätevesissä. Saavutetaanko merkittävä pitoisuuksien alentuminen vai olisiko syytä tutkia tarkemmin, kuinka paljon 24 tunnin keräyksellä saadaan pitoisuuksia laskettua? Saataisiinko pidemmällä keräysajalla huomattavasti suuremmat hyödyt, koska gadoliniumpohjaisen tehosteaineen poistuminen elimistöstä voi viedä jopa 30 tuntia?

Zanardo ym. tutkimuksessa päätavoite on selvittää, kuinka paljon virtsan keräyksellä voidaan vähentää pitoisuuksia ja lisäksi tavoitteena on selvittää potilaiden mielipiteitä keräyksestä. Jälkimmäisen tutkimuskohteen tulosten ollessa positiivisia, voisi asiaa lähteä viemään eteenpäin mahdollistaen laajamittaiset vesiekosysteemin kuormittamista pienentävät toimenpiteet. Mikäli virtsan keräämisestä tulisi yleinen tapa, olisi se konkreettinen päästöjä vähentävä asia, johon lisäksi voisimme itse vaikuttaa laadukkaalla potilasohjauksella.

Kestävän kehityksen, resurssien saatavuuden sekä taloudellisen tehokkuuden nousujohteisuutta lisäisi, mikäli tehosteaineena käytetyn gadoliniumin voisi kerätä talteen uudelleen käyttöä varten. Näin vesistöihin päätyisi vähemmän antropogeenistä gadoliniumia ja lisäksi teknologian teollisuudessa käytettävä alkuaine saataisiin uudelleen kiertoon. Talteenottoa olisi aiheellista tutkia tarkemmin ja käytännönläheisemmin.

Zanardo ym. (2023) tutkimus tulee antamaan suuntaa myös sille, tulisiko sairaaloilla olla oma esikäsitteily jätevedelle ennen sen kulkeutumista jätevedenpuhdistuslaitokselle. Olisi mielenkiintoista saada lisätutkimusta, voiko käänteisosmoosia käyttää vedenpuhdistukseen sairaalan poistovesissä, näin saataisiin poistettua muitakin lääkkeitä veden kiertokulusta. Käänteisosmoosikalvotekniikka on tehokas, mutta kallis järjestelmä. Pelkän sairaalan jätevesien puhdistus on kuitenkin pienempi prosessi kuin että koko kaupungin jätevedet puhdistettaisiin samalla tekniikalla. Onko mahdollista hyödyntää tätä tekniikkaa sairaaloissa?

Tehosteaineena käytetty gadolinium on suhteellisen uusi lääkeaine ja sen ensimmäinen kelaattimuoto sai myyntiluvan Yhdysvalloissa 1988 (Parviainen ym. 2018). Lisätutkimusta tarvitaan siitä, mitä gadoliniumin kelaattimuoto voi aiheuttaa ihmiselle suun kautta nautittuna. Nyt on todettu, että se hajoaa ruoansulatuksessa, mutta sitä ei ole tutkittu, mitä sen jälkeen tapahtuu. Vain tutkimalla asiaa lisää voidaan ymmärtää kunnolla ongelman laajuutta ja vakavuutta.

#### 7.4 Ammatillinen kasvu

Opinnäytetyön työnjako on ollut hyvin tasapuolinen. Jotkut osat, kuten käsitteiden määrittelyn, olemme tehneet jakaen, mutta aineiston haut, valintaprosessin, analysoinnin, raportoinnin ja pohdinnan olemme tehneet vahvassa yhteistyössä. Koko opinnäytetyöprosessin ajan luimme, työstimme ja vertaisarvioimme molempien tuottamaa tekstiä ja kiinnitimme huomiota tasaiseen ja yhtenäiseen sisältöön ja kirjoitusasuun.

Aloittaessamme opinnäytetyömme keväällä 2023, oli kirjallisuuskatsaus meille kummallekin uusi menetelmä ja perehdyimme siihen huolellisesti suunnitelmavaiheesta lähtien. Ensimmäinen kirjallisuuskatsauksemme haastoi meitä ottamaan perusteellisesti selvää prosessin kaikista vaiheista ja oppimaan uutta. Heikkoutena on, ettei menetelmää kuitenkaan ole ymmärretty tai toteutettu vaadittavalla tavalla. Osallistuimme prosessin aikana erilaisiin työpajoihin, jotka auttoivat meitä ymmärtämään paremmin kirjallisuuskatsauksen tekemistä sekä luimme asiaan liittyvää opetuskirjallisuutta. Opimme aikatauluttamaan työskentelyämme ja vaikka aineistoon tutustuminen vei odotettua enemmän aikaa, pysyimme kuitenkin alkuperäisessä aikataulussa, koska olimme varanneet ylimääräistä aikaa toteutukseen.

Olemme oppineet hakemaan näyttöön perustuvaa tietoa lähdekriittisyyden huomioiden. Tiedonhaku monipuolisuudessaan yllätti meidät. Aineistohaku ei ollut helppoa ja yksinkertaista vaan jouduimme käymään kattavasti läpi eri hakusanoja ja niiden yhdistelmiä.

Tiedonhaun yhteydessä opimme käyttämään eri tietokantojen hakutoimintoja entistä syvällisemmin.

Haasteita oli matkan varrella paljon. Monet tutkimusartikkelimme käsittelivät aihetta muiden alojen, kuten kemianteollisuuden ja ympäristötekniikan, kautta. Tämä aiheutti sen, että opinnäytetyömme ajoittain ajautui pois omalta alaltamme ja jouduimme tarkistamaan näkökulmaa. Lopputulos kulkee sillä rajalla, onko tieto röntgenhoitajan työssä tarvittavaa. Emme voi vaikuttaa työpaikkojen jätteiden käsittelyyn tai mahdolliseen virtsan keräykseen, joten työmme tuo lisätietoa, muttei tarjoa konkreettisia toimintamalleja.

Meille vieraiden alojen tutkimuksia oli hankala sisäistää, varsinkin kun julkaisut olivat englanniksi. Sairaaloiden jätteenkäsittelyohjeita tai kierrätysohjeita oli vaikea löytää. Suomen ohjeita tai EU:n ja Yhdysvaltojen virallisia direktiivejä kahlatessa ei vastaan tullut tietoa, kuinka tehosteainejätteitä tulisi käsitellä. Koko tekstin perusteella jatkoon valittuja tutkimusartikkeleita oli paljon ja niiden karsinta aiheutti vaikeuksia, koska pidimme pitkään mukana muiden alojen julkaisuja olettaen niiden sisältävän tarpeellista tietoa. Lopullinen tutkimusartikkelien määrä vahvistui raportoinnin aikana, kun olimme sisäistäneet tarpeeksi kattavasti sisällöt ja niiden käytettävyyden.



## Lähteet

Altomare, Anthony J. & Young, Nicholas A. & Beazley, Melanie J 2020. A preliminary survey of anthropogenic gadolinium in water and sediment of a constructed wetland. *Journal of environmental management* (255).

Arene 2020. Ammattikorkeakoulujen opinnäytetöiden eettiset suositukset. Arene ry. <[https://www.arene.fi/wp-content/uploads/Raportit/2020/AMMATTIKORKEAKOULUJEN%20OPINN%C3%84YTET%C3%96IDEN%20EETTISET%20SUOSITUKSET%202020.pdf?\\_t=1578480382](https://www.arene.fi/wp-content/uploads/Raportit/2020/AMMATTIKORKEAKOULUJEN%20OPINN%C3%84YTET%C3%96IDEN%20EETTISET%20SUOSITUKSET%202020.pdf?_t=1578480382)>. Viitattu 28.10.2023.

Aronen, Hannu J. & Niemi, Pekka T. & Dean, Peter B. 2017. Kuvantamisessa käytettävät kontrastiaineet. Teoksessa Sequeiros, Roberto Blanco & Koskinen, Seppo K. & Aronen, Hannu & Lundbom, Nina & Vanninen, Ritva & Tervonen, Osmo (toim.). *Kliininen radiologia*. E-Kirja. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim.

Blomqvist, Lennart K. & Nordberg, Gunnar F. & Aaseth, Jan 2022. Handbook on the toxicology of metals, volume II: specific metals. Chapter 11 – Gadolinium. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128229460000106>>. Viitattu 23.9.2023.

Braun, Mihály & Zavanyi, Györgyi & Laczovics, Attila & Berényi, Ervin & Szabó, Sándor 2018. Can aquatic macrophytes be biofilters for gadolinium based contrasting agents? *Water research* (135). 104–111.

Brünjes, Robert & Hofmann, Thilo 2020. Anthropogenic gadolinium in freshwater and drinking water systems. *Water research* (182).

Büttner, Laura & Posch, Helena & Auer, Timo-Alexander & Jonczyk, Martin & Fehrenbach, Uli & Hamm, Bernd & Bauknecht, Christian & Böning, Georg 2021. Switching off for future – Cost estimate and a simple approach to improving the ecological footprint of radiological departments. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235204772030109X>>. Viitattu 6.10.2023.

Cantell, Hannele & Jutila, Heikki & Laiho, Harri & Lavonen, Jari & Pekkala, Erkki & Saari, Heikki 2018. *Pisara 3. Ympäristööppi*. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Euroopan komissio 2019. Kohti kestävä Eurooppaa vuoteen 2030 mennessä. *Pohdinta-asiakirja*. <[https://commission.europa.eu/system/files/2019-08/rp\\_sustainable\\_europe\\_fi\\_v2\\_web.pdf](https://commission.europa.eu/system/files/2019-08/rp_sustainable_europe_fi_v2_web.pdf)>. Viitattu 28.10.2023.

Euroopan parlamentti 2020. Euroopan parlamentin päätöslauselma 17. syyskuuta 2020 strategisesta lähestymistavasta ympäristössä oleviin lääkeaineisiin. <[https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2020-0226\\_FI.html#def\\_1](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2020-0226_FI.html#def_1)>. Viitattu 28.10.2023.

Ferreira, Nicole & Ferreira, Adriana & Viana, Thainara & Lopes, Cláudia B. & Costa, Marcelo & Pinto, João & Soares, José & Pinheiro-Torres, José & Henriques, Bruno & Pereira, Eduarda 2020. Assessment of marine macroalgae potential for gadolinium removal from contaminated aquatic systems. *Science of The Total Environment* (749).

Fortum. Terveysthuollon vaaralliset ja erityisjätteet. <<https://www.fortum.fi/sites/default/files/documents/terveydenhuollon-vaaralliset-ja-erityisjatteen-230118-screen.pdf>>. Viitattu 10.2.2023.

Goergen, Stacy. Contrast medium: using gadolinium or iodine in patients with kidney problems. Inside radiology. Päivitetty 26.7.2017. <<https://www.insideradiology.com.au/contrast-medium/>>. Viitattu 8.2.2023.

Häkkinen, Eevaleena 2018. Hoitolaitosten jätehuollossa huomioitavia asioita. EPIC-projektin julkaisut. Suomen ympäristökeskus. <<https://www.syke.fi/download/no-name/%7BDD9743FD-5F6C-49E9-98D9-AEB43AB6E828%7D/136817>>. Viitattu 13.10.2023.

Inoue, Kazumasa & Fukushi, Masahiro & Sahoo, Sarata Kumar & Veerasamy, Nimelan & Furukawa, Akira & Soyama, Sho & Sakata, Ami & Isoda, Ryo & Taguchi, Yoshiaki & Hosokawa, Shota & Sagara, Hiroaki & Natarajan, Thennaarassan 2022. Measurements and future projections of Gd-based contrast agents for MRI exams in wastewater treatment plants in the Tokyo metropolitan area. Marine Pollution Bulletin (174).

Jätelaki 646/2011. Annettu Helsingissä 17.6.2011. <<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>>. Viitattu 10.2.2023.

Lammentausta, Eveliina 2017. Magneettikuvaus. Teoksessa Sequeiros, Roberto Blanco & Koskinen, Seppo K. & Aronen, Hannu & Lundbom, Nina & Vanninen, Ritva & Tervonen, Osmo (toim.). Kliininen radiologia. E-Kirja. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim.

Niederste-Hollenberg, Jutta & Eckartz, Katharina & Peters, Anja & Hillenbrand, Thomas & Maier, Ursula & Beer, Meinrad & Reszt, Andrea 2018. Reducing the emission of X-ray contrast agents to the environment: decentralized collection of urine bags and its acceptance. GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society 27(1). 147-155. <<https://docserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/oekom/09405550/v27n1/s11.pdf?expires=1699711930&id=0000&titleid=6690&checksum=3B1E18AC9F7624149E434508B41380D9&host=https://www.ingentaconnect.com>>. Viitattu 22.10.2023.

Niela-Vilén, Hannakaisa & Hamari, Lotta 2016. Kirjallisuuskatsauksen vaiheet. Teoksessa Stolt, Minna & Axelin, Anna & Suhonen, Riitta (toim.). Kirjallisuuskatsaus hoitotieteessä. Turun yliopisto Hoitotieteenlaitoksen julkaisuja, tutkimuksia ja raportteja. Sarja A73. Turku: Turun yliopisto.

Laczovics, Attila & Csige, Istvan & Szabó, Sándor & Tóth, Albert & Kálmán, Ferenc Krisztián & Tóth, Imre & Fülöp, Zoltán & Berényi, Ervin & Braun, Mihály 2023. Relationship between gadolinium-based MRI contrast agent consumption and anthropogenic gadolinium in the influent of a wastewater treatment plant. Science of The Total Environment (877).

OECD 2021a. Magnetic resonance imaging (MRI) exams. <<https://doi.org/10.1787/1d89353f-en>>. Viitattu 23.9.2023.

OECD 2021b. Number of magnetic resonance imaging (MRI) units in selected countries as of 2019 (per million population). <<https://www.statista.com/statistics/282401/density-of-magnetic-resonance-imaging-units-by-country/>>. Viitattu 23.9.2023.

Ognard, Julien & Barrat, Jean-Alix & Cotton, Francois & Mian, Asim & Kremer, Stephane & Sitho, Yih Yian & Vercluyte, Sebastien & Loffroy, Romaric & Tripier, Raphaël & Alavi, Zarrin & Ben Salem, Douraid 2021. A roadmap towards pollution prevention and sustainable development of Gadolinium. *Journal of Neuroradiology* 48 (6). 409–411.

Oluwasola, Idowu & Ahmad, Abdul & Shoparwe, Noor & Ismail, SuzyLawati 2022. Gadolinium based contrast agents (CBCAs): Uniqueness, aquatic toxicity concerns, and prospective remediation. *Journal of Contaminant Hydrology* 250.

Parviainen, Helka & Ovissi, Ali & Helanterä, Ilkka 2018. Magneetikuvauksen tehosteaineet. *Lääketieteellinen aikakauskirja Duodecim*. 134 (6). 613–620. <<https://www.terveysportti.fi/xmedia/duo/duo14228.pdf>>. Viitattu 23.9.2023.

Pereto & Lerat-Hardy & Baudrimont & Coynel 2023) Pereto, Clément & Lerat-Hardy, Antoine & Baudrimont, Magalie & Coynel, Alexandra 2023. European fluxes of medical gadolinium to the ocean: A model based on healthcare databases. *Environment International* (173).

Pharmaca Fennica 2019. Dotarem injektioneste. Päivitetty 10.12.2019. <<https://pharmacafennica.fi/spc/2210041>>. Viitattu 24.9.2023.

PubChem. National Center for Biotechnology Information. PubChem Element Summary for AtomicNumber 64, Gadolinium. <<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Gadolinium>>. Viitattu 7.10.2023.

Rogosnitzky, Moshe & Branch, Stacy 2016. Gadolinium-based contrast agent toxicity: a review of known and proposed mechanisms. *Biometals* (29). 365–376. <<https://doi.org/10.1007/s10534-016-9931-7>>. Viitattu 7.10.2023.

Rogowska, Justyna & Olkowska, Ewa & Ratajczyk, Wojciech & Wolska, Lidia 2018. Gadolinium as a new emerging contaminant of aquatic environments. *Environmental Toxicology and Chemistry* 37 (6). 1523–1534.

Ruonala, Verner 2022. Radiologisten tutkimusten ja toimenpiteiden määrät vuonna 2021. Terveystieteiden valvontaraportti. STUK-B -sarjan julkaisu. <<https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/145428/STUK-B-295-Radiologisten-tutkimusten-m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4t-vuonna-2021.pdf>>. Viitattu 8.2.2023.

Schmidt, Katja & Bau, Michael & Merschel, Gila & Tepe, Nathalie 2019. Anthropogenic gadolinium in tap water and in tap water-based beverages from fast-food franchises in six major cities in Germany. *Science of the Total Environment* (687). 1401–1408.

Scurtu, Violeta & Clapa, Doina & Leopold, Loredana & Ranga, Floricuța & Iancu, Ștefania & Cadiș, Adrian & Coman, Vasile & Socaci, Sonia & Moț, Augustin & Coman, Cristina 2022. Gadolinium Accumulation and Toxicity on In Vitro Grown Stevia rebaudiana: A Case-Study on Gadobutrol. *International Journal of Molecular Sciences* 23 (19).

Sequeiros, Roberto Blanco & Lundbom, Nina 2017. Tutkimusmenetelmien erityispiirteitä. Teoksessa Sequeiros, Roberto Blanco & Koskinen, Seppo K. & Aronen, Hannu & Lundbom, Nina & Vanninen, Ritva & Tervonen, Osmo (toim.). *Klininen radiologia. E-Kirja*. Helsinki: Kustannus Oy Duodecim.

Souza, Lais A. & Pedreira, Rodrigo M.A. & Miró, Manuel & Hatje, Vanessa 2016. Evidence of high bioaccessibility of gadolinium-contrast agents in natural waters after human oral uptake. *Science of The Total Environment* (793).

Suhonen, Riitta & Axelin, Anna & Stolt, Minna 2016. Erilaiset kirjallisuuskatsaukset. Teoksessa Stolt, Minna & Axelin, Anna & Suhonen, Riitta (toim.). *Kirjallisuuskatsaus hoitotieteessä*. Turun yliopisto Hoitotieteenlaitoksen julkaisuja, tutkimuksia ja raportteja. Sarja A73. Turku: Turun yliopisto.

Sumner, Christina & Ikuta, Ichiro & Garg, Tushar & Martin, Jonathan G. & Mansoori, Bahar & Chalian, Majid & Englander, Brian S. & Chertoff, Jocelyn & Woolen, Sean & Caplin, Drew & Sneider, Michael B. & Desouches, Stephane L. & Chan, Tiffany L. & Kadom, Nadja 2022. Approaches to greening radiology. Elsevier. The Association of University Radiologists. <<https://doi.org/10.1016/j.acra.2022.08.013>>. Viitattu 22.9.2023.

Tampereen yliopiston kirjasto. Systemaattinen tiedonhaku. Päivitetty 27.9.2023. <<https://libguides.tuni.fi/systemaattinen-tiedonhaku/dokumentointi>>. Viitattu 3.10.2023.

Tuominen, Riina & Salmi, Perttu & Viitala, Mirka 2022. Jätevesien lääkeaineet. Teoksessa Tuominen, Riina (toim). *Jätevesien haitallisten aineiden vähentäminen*. Sarjassa Xamk kehittää. 17–25. <<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/755696/URNISBN9789523444393.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>. Viitattu 26.9.2023.

Tenk = Tutkimuseettinen neuvottelukunta

Tenk 2012. Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa. Helsinki: Tutkimuseettinen neuvottelukunta. <[https://tenk.fi/sites/tenk.fi/files/HTK\\_ohje\\_2012.pdf](https://tenk.fi/sites/tenk.fi/files/HTK_ohje_2012.pdf)>. Viitattu 9.2.2023.

Vaara, Satu & Syväranta, Suvi & Peltonen, Juha 2021. Magneettikuvauksen ABC: T1, T2, fat sat, DWI ynnä muut. *Lääketeieteellinen aikakauskirja Duodecim*. 137 (24). 2681–2689. <<https://www.duodecimlehti.fi/xmedia/duo/duo16593.pdf>>. Viitattu 24.9.2023.

Vieno, Niina & Arjonen, Maria 2021. Uudet haitalliset aineet suomalaisilla jätevedenpuhdistamoilla. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 69. Helsinki: Suomen Vesilaitosyhdistys ry. <[https://www.vvy.fi/site/assets/files/5898/uudet\\_haitalliset\\_aineet\\_raportti\\_nro\\_69.pdf](https://www.vvy.fi/site/assets/files/5898/uudet_haitalliset_aineet_raportti_nro_69.pdf)>. Viitattu 27.9.2023.

Vilkkä, Hanna 2023. Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina. Helsinki: Art House.

Vilpanen, Maija & Seppälä, Paula. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus vuosilta 2019–2020. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 71. Helsinki: Suomen Vesilaitosyhdistys ry. <[https://www.vvy.fi/site/assets/files/4691/yhdyskuntalietteen\\_kasittelyn\\_ja\\_hyodyntamisen\\_nykytilannekatsaus\\_2021.pdf](https://www.vvy.fi/site/assets/files/4691/yhdyskuntalietteen_kasittelyn_ja_hyodyntamisen_nykytilannekatsaus_2021.pdf)>. Viitattu 27.9.2023.

VVY = Vesilaitosyhdistys

VVY. Ammattiasiaa jätevesistä. <<https://www.vvy.fi/vesihuolto/jatevesista-ekspertheille/#osio-1-1511881740-8473-1>>. Viitattu 26.9.2023.

Ympäristöministeriö. Mitä on kestävä kehitys? <<https://ym.fi/mita-on-kestava-kehitys>>. Viitattu 2.2.2023.

Zanardo, Moreno & Cozzi, Andrea & Cardani, Rosanna & Renna, Laura Valentina & Pomati, Francesco & Asmundo, Luigi & Di Leo, Giovanni & Sardanelli, Francesco 2023. Reducing contrast agent residuals in hospital wastewater: the GREENWATER study protocol. *European Radiology Experimental* 7 (1) (2023). 1–7.

Zhang, Yufeng & Xing, Cheng & Guo, Xiujun & Zheng, Tianyuan & Zhang, Kunkun & Xiao, Xiaoteng & Sun, Zengbing & Lei, Bingxiao & Li, Mingbo 2023. Temporal and spatial distribution patterns of upper saline plumes and seawater-groundwater exchange under tidal effect. *Journal of Hydrology* (625).

## Liite 1: Tutkimusartikkelit

	Tekijät, julkaisumaa, julkaisuvuosi	Artikkelin nimi	Artikkelin tarkoitus	Aineiston keruu	Keskeinen sisältö
1	Altomare & Young & Beazley. Yhdysvallat 2020.	A preliminary survey of anthropogenic gadolinium in water and sediment of a constructed wetland	Tarkastellaan ihmisperäisen gadoliniumin esiintymistä ja käyttäytymistä rakennetuissa kosteikoissa.	Pintavesistä ja sedimenttiytymistä kerättiin näytteitä, jotka suodatettiin tai happoutettiin, jotta saatiin tietää maametallien pitoisuudet.	Saatiin viitteitä, että gadolinium häviäisi sedimentteihin ja sitoisi sitä itseensä orgaanisen aineen kerääntymisen ja laskeuman avulla.
2	Braun & Zavanyi & Laczovics & Berényi & Szabó. Unkari 2018.	Can aquatic macrophytes be biofilters for gadolinium based contrasting agents?	Tutkittiin neljän vesikasvilajin kykyä ottaa talteen ja vapauttaa gadoliniumia, jotta niiden kyky toimia biologisina suodattimina selviäisi.	Vesikasveja pidettiin liuoksessa, jonka gadoliniumipitoisuutta muutettiin mm. saostamalla, sorptiolla ja haihduttamalla.	Vesikasvien ei todettu pystyvän vähentämän ihmisperäisen gadoliniumin pitoisuuksia vedessä.
3	Brünjes & Hofmann. Itävalta 2020.	Anthropogenic gadolinium in freshwater and drinking water systems	Kuinka gadoliniumipohjaiset tehosteaineet johtavat juomavesien saastumiseen.	Artikkeli, ei tutkimus	Käänteisosmoosi ainoa tekniikka, jolla gadolinium saadaan poistettua jätevesistä. Virtsan keräämistä ehdotetaan parhaaksi käytännöksi tulevaisuudessa.
4	Ferreira & Ferreira & Viana & Lopes & Costa & Pinto & Soares & Pinheiro-Torres & Henriques & Pereira. Portugali 2020.	Assessment of marine macroalgae potential for gadolinium removal from contaminated aquatic systems	Tutkittiin elävien makrolevien käyttöä biosorbentteina, jotta vedestä saataisiin poistettua toksiset alkuaineet, kuten gadolinium, ja sitä kautta parannettua veden laatua.	Makrolevät altistettiin laboratoriossa 72 tunnin ajan eri gadoliniumipitoisuuksille. Gadoliinin poistoteho laskettiin alku- ja loppupitoisuuden perusteella.	Makrolevien poistotehokkuus oli 85 %. Makrolevien todettiin olevan käyttökelpoisia veden dekontaminaatioon.
5	Inoue & Fukushi & Sahoo & Veerasamy & Furukawa & Soyama & Sakata & Isoda & Taguchi & Hosokawa & Sagara & Natarajan. Japani 2022.	Measurements and future projections of Gd-based contrast agents for MRI exams in wastewater treatment plants in the Tokyo metropolitan area	Määriteltiin jätevedenkäsittely prosessin aikana tapahtuneet gadoliniumin määrän muutokset ja arvioitiin voiko niiden perusteella ennakoita tulevaisuuden muutoksia.	25 Tokion alueen jätevesipuhdistamosta kerättiin näytteet tulo- ja poistovedestä sekä sedimentaatioosäiliöstä.	Ympäristövaikutukset ovat ennustettavissa magneettikuvaslaitteiden lukumäärän perusteella.
6	Laczovics & Csige & Szabó & Tóth & Kálman & Tóth & Fülöp & Berényi & Braun. Unkari 2023.	Relationship between gadolinium-based MRI contrast agent consumption and anthropogenic gadolinium in the influent of a wastewater treatment plant	On tiedossa, että Gd tehosteaine läpäisee jätevedenpuhdistuslaitokset, mutta haluttiin selvittää asiaa tarkemmin ja saada tietoa määristä sekä Gd kulkemisesta viemäriputkissa.	Debrecen (Unkari) alueella on kaksi sairaalaa. Tutkittiin mallinnoksen avulla antropogeenisen gadoliniumin kulkeutumista jätevesissä. 45 vrk ajalla jätevesi näytteet tulo- ja poistoputkista.	Tutkimuksessa huomattiin, että gadoliniumin virtausnopeus viemäriverkostossa on hitaampi kuin muun jäteveden, koska gadolinium on pienhiukkainen aine, joka ei liukene veteen.

	Tekijät, julkaisumaa, julkaisuvuosi	Artikkelin nimi	Artikkelin tarkoitus	Aineiston keruu	Keskeinen sisältö
7	Niederste-Hollenberg & Eckartz & Peters & Hillenbrand & Maier & Beer & Reszt. Saksa 2018.	Reducing the Emission of X-Ray Contrast Agents to the Environment: Decentralized Collection of Urine Bags and Its acceptance	Tehosteaineiden kulkeutuminen vesistöön on kasvava ongelma ja siihen tarvitaan ratkaisu.	Tehosteainetta saaneiden potilaiden virtsa kerättiin talteen 24 h tutkimuksen jälkeen. Selvitettiin potilaiden ja henkilökunnan mielipiteitä ja kokemuksia keräyksestä.	Suhtautuminen keräykseen oli myönteistä, Keräyksen helppous koettiin tärkeimpänä tekijänä onnistumiseen.
8	Oluwasola & Ahmad & Shoparwe & Ismail. Malesia 2022.	Gadolinium based contrast agents (CBCAs): Uniqueness, aquatic toxicity concerns, and prospective remediation	Gadolidium tehosteaine on hälyttävä riski vesistöille, sitä säännellään vesiteollisuudessa liian vähän.	Kirjallisuuskatsaus	On mahdollista, että ruoansulatuksen kautta ihminen altistuu gadoliniumille. On välttämätöntä kehittää keino, jolla se saadaan juomavedestä puhdistettua.
9	Pereto & Lerat-Hardy & Baudrimont & Coynel. Ranska 2023.	European fluxes of medical gadolinium to the ocean: A model based on healthcare databases	Kehitetty gadoliniumin virtausmalli työkaluksi ympäristöstrategioiden arvioimiseen ja kehittämiseen sekä haittavaikutusten rajoittamiseen.	Ranskan vuotuisten tehosteaineiden käyttömäärien perusteella yleistetty havainnot ulottumaan 48 Euroopan maahan.	Valtaosa gadoliniumista kulkeutuu vesistöjen kautta Atlantille.
10	Schmidt & Bau & Merschel & Tepe. Saksa 2019.	Anthropogenic gadolinium in tap water and in tap water-based beverages from fast-food franchises in six major cities in Germany	Kulkeutuuko antropogeeninen gadolinium ihmisen ruokaketjuun vesijohtoveden kautta.	Tutkittiin kuuden suuren saksalaisen kaupungin McDonalds ja Burger King ketjujen vesijohtovesipohjaisen Coca-Cola juomien gadolinium pitoisuuksia.	Tutkimus osoitti, että gadolinium ja mahdollisesti muut haitalliset yhdisteet pääsevät ihmisen ravintoketjuun juomaveden välityksellä.
11	Scurtu & Clapa & Leopold & Ranga & Iancu & Cadis & Coman & Socaci & Mot & Coman. Romania 2022.	Gadolinium Accumulation and Toxicity on In Vitro Grown Stevia rebaudiana: A Case-Study on Gadobutrol	Tutkimus gadoliniumin kertymisestä ja myrkyllisyydestä laboratoriossa kasvatettuun Stevia rebaudiana kasviin.	Laboratorio olosuhteissa (in vitro) kasvi altistettiin 30vrk ajan eri vahvuisille gadolinium pitoisuuksille. Tapaustudkimus(case-study)	Tutkimus osoitti, että suuremmilla gadolinium altistuksilla oli haitallisia vaikutuksia, mikä johti kasvien kasvun ja sille merkityksellisten yhdisteiden pitoisuuksien syntymisen estymiseen.
12	Souza & Pedreira & Miró & Hatje. Brasilia 2016.	Evidence of high bioaccessibility of gadolinium-contrast agents in natural waters after human oral uptake	Tutkimus, kuinka vesijohtoveden mukana tuleva gadoliniumpohjainen tehosteaine reagoi mahanesteeseen ihmisen ruoansulatuskanavassa ja onko eri tehosteaineissa eroja.	In vitro liukenemistesti.	Havaittiin, että Gd tehosteaineen yhdiste hajoaa mahanesteen vaikutuksesta. On tärkeä kiinnittää huomiota ympäristöön ja vähentää ihmisperäisen gadoliniumin joutumista vesistöihin.
13	Zanardo & Cozzi & Cardani & Renna & Pomati. Italia 2023.	Reducing contrast agent residuals in hospital wastewater: the Greenwater study protocol	Tutkitaan, kuinka paljon kuvantamisessa käytettäviä varjo- ja tehosteita voitaisiin estää pääsemästä viemäriin, jos potilaiden virtsa kerättäisiin talteen.	800 potilasta jää kontrastitehostetun kuvantamisen jälkeen tunniksi sairaalaan ja sinä aikana virtsaa ainoastaan säiliöön. Virtsan tehosteainepitoisuudet määritellään kemiallisen analyysin avulla.	Tulokset julkaistaan joulukuussa 2023.