



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

LUONNONSÄTEILYÄ AIHEUTTAVAT AINEET (NORM) SUOMEN ENERGIATEOLLISUUDESSA

TEKIJÄ: Päivi Roivainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Päivi Roivainen	
Työn nimi Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet (NORM) Suomen energiateollisuudessa	
Päiväys	3.5.2020
Sivumäärä/Liitteet	27/0
Ohjaaja(t) Olli-Pekka Kähkönen ja Teija Honkanen	
Yhteistyökumppani(t) Säteilyturvakeskus	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin luonnonsäteilyä aiheuttavien aineiden esiintymistä Suomen energiateollisuuden prosesseissa ja niiden aiheuttamaa säteilyaltistusta. Tavoitteena oli muodostaa aiheesta yleiskuva eikä keskittyä yksittäisten laitosten toimintaan. Maa- ja kallioperässä esiintyy luonnollisesti useita radionuklideja, joista merkittävimpiä ovat ^{40}K ja ^{238}U:n ja ^{232}Th:n hajoamissarjoihin kuuluvat aineet. Ihmisten toiminta vaikuttaa huomattavasti siihen, kuinka paljon näistä aineista päätyy välittömään elinympäristöömme. Useat energiateollisuuden prosessit, kuten hiilen- ja turpeenpoltto, geotermisen energian tuotanto ja öljynjalostus voivat lisätä luonnonsäteilyä johtuvaa säteilyaltistusta sekä työntekijöiden että väestön keskuudessa.</p> <p>Työ tehtiin yhteistyössä Säteilyturvakeskuksen kanssa. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena hyödyntäen sekä kotimaista että ulkomaista tutkimuskirjallisuutta.</p> <p>Polttoprosesseissa tulee huomioida erityisesti lentotuhkan korkeat ^{210}Pb- ja ^{210}Po-pitoisuudet, sillä haihtuvina aineina ne kertyvät sinne. ^{210}Pb voi kertyä myös kattilan seinämiin muodostuviin kivetymisiin. Geotermisen energian tuotannossa ja öljynjalostuksessa tulee kiinnittää huomiota erityisesti radiumiin (^{224}Ra, ^{226}Ra, ^{228}Ra), jota voi kertyä tuotannon eri vaiheissa syntyviin saostumiin ja lietteisiin. Työ rajoittui ainoastaan julkisesti saatavilla oleviin materiaaleihin. Energia-alan toimijoilla itsellään voi olla käytössään yksityiskohtaisempia mittaustuloksia. Lisätieto aiheesta olisi kuitenkin tarpeellista. On myös huomattava, että luonnonsäteilyä aiheuttavia aineita voi esiintyä muissakin kuin tässä opinnäytetyössä käsitellyissä energiateollisuuden prosesseissa.</p>	
Avainsanat polttolaitos; geotermisen energia; öljynjalostus; radioaktiivisuus; luonnonsäteily	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering			
Author(s) Päivi Roivainen			
Title of Thesis Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Finnish Energy Industry			
Date	May 3, 2020	Pages/Appendices	27/0
Supervisor(s) Olli-Pekka Kähkönen and Teija Honkanen			
Partner(s) Radiation and Nuclear Safety Authority			
<p>Abstract</p> <p>The presence of naturally occurring radioactive materials in Finnish energy industry processes and their effect on radiation exposure of workers and public was investigated in this thesis. The aim was to form a general understanding of the topic without focusing on individual facilities. There are several naturally occurring radionuclides in soil and bedrock. Most important ones are ^{40}K and the members of the decay chains of ^{238}U and ^{232}Th. The amount of these substances in our immediate living environment is significantly affected by human activities. Several processes of the Finnish energy industry, such as coal and peat combustion, geothermal energy production and oil refinery, can enhance the radiation exposure of workers and public because of the presence of naturally occurring radioactive materials in products, residues and wastes.</p> <p>The study was conducted in collaboration with Radiation and Nuclear Safety Authority. The work was carried out as a literature survey utilizing both national and international research literature.</p> <p>The survey showed that the most significant issue related to combustion processes is the enhanced activity concentrations of ^{210}Pb and ^{210}Po in fly ash because of their volatility. ^{210}Pb can also form scales inside boilers. The isotopes of radium are the most important when geothermal energy production and oil refining are considered. Radium is present in scales and sludges formed in several stages of these processes. Only publicly available data was used for this study. It is possible that industries themselves have more detailed results. However, additional information on this topic would be important. It should be noted that naturally occurring radioactive materials can be present also in other energy industry processes than studied in this thesis.</p>			
<p>Keywords combustion; geothermal energy; oil refinery; radioactivity; radiation</p>			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
1.1	Yhteistyökumppani.....	6
1.2	Tutkimusaineistot.....	6
2	LUONNONSÄTEILYÄ AIHEUTTAVAT AINEET	8
2.1	Radioaktiivinen hajoaminen	8
2.2	Ionisoivan säteilyn haitalliset vaikutukset ihmisiin ja ympäristöön.....	9
2.3	Luonnon radionuklidit.....	10
2.4	Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet (NORM) teollisissa prosesseissa	11
2.5	Luonnonsäteilyä aiheuttaviin aineisiin liittyvä lainsäädäntö Suomessa	12
3	LUONNONSÄTEILYÄ AIHEUTTAVAT AINEET ENERGIATEOLLISUUDEN PROSESSEISSA	14
3.1	Polttolaitokset.....	14
3.1.1	Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet kivihiiltä polttavissa laitoksissa	15
3.1.2	Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet turvetta polttavissa laitoksissa	16
3.2	Geotermien energia.....	17
3.2.1	Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet geotermistä energiaa tuottavissa laitoksissa	19
3.3	Öljynjalostus.....	20
3.3.1	Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet öljynjalostuksessa	21
4	JOHTOPÄÄTÖKSET	24
	LÄHTEET	25

LYHENTEET

Bq = becquerel, aktiivisuuden yksikkö

Gy = gray, absorboituneen annoksen yksikkö

NORM = Naturally Occurring Radioactive Material

STUK = Säteilyturvakeskus

Sv = sievert, ihmisen saaman säteilyannoksen määrän yksikkö

TENORM = Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material

1 JOHDANTO

Suomen säteilylain (859/2018) tavoitteena on suojella ihmisiä säteilyn haitallisilta vaikutuksilta sekä estää ja vähentää ympäristöön kohdistuvia haittavaikutuksia. Suomen säteilylainsäädäntö perustuu Euroopan Unionin Basic Safety Standard-direktiiviin (2013/59/Euratom). Säteilylain perusteella myös luonnonsäteilylle altistavasta toiminnasta aiheutuu toimijalle erilaisia veloituksia. Ympäristössämme esiintyy useita luonnollisia aineita, joiden ytimet lähettävät hajotessaan ionisoivaa säteilyä. Säteilyä kutsutaan ionisoivaksi silloin, kun sillä on riittävästi energiaa irrottamaan säteilyn kohteeksi joutuvan aineen atomeista elektroneja tai rikkomaan aineen molekyylejä (UNEP 2016, 1). Ihmisten toiminta vaikuttaa merkittävästi siihen, kuinka paljon maaperässä olevista pitkäikäisistä luonnon radioaktiivisista aineista päätyy välittömään elinympäristöömme. Muun muassa fossiilisten polttoaineiden hyödyntäminen, kaivostoiminta ja lannoitteiden tuotanto voi aiheuttaa sekä työperäistä säteilyaltistusta että altistaa muuta väestöä ja ympäristöä säteilylle. (Pöllänen 2003, 15.)

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin luonnonsäteilyä aiheuttavien aineiden esiintymistä Suomen energiateollisuuden prosesseissa. Työssä keskityttiin Säteilylaissa (859/2018) mainittuihin prosesseihin. Tavoitteena oli muodostaa aiheesta yleiskuva eikä keskittyä yksittäisten laitosten toimintaan. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Tuloksia voivat hyödyntää sekä energiateollisuuden toimijat että viranomaiset. Työn pohjimmaisena merkityksenä on työntekijöiden altistumisen sekä ympäristöpäästöjen vähentäminen.

1.1 Yhteistyökumppani

Työ tehtiin yhteistyössä Säteilyturvakeskuksen (STUK) Ympäristön säteilyvalvonnan osastolla toimivan Luonnonsäteilyn valvonta ja terveys -yksikön kanssa. STUK on vuonna 1958 perustettu Sosiaali- ja terveysministeriön alainen riippumaton turvallisuusviranomainen, jonka tehtävänä on valvoa säteilyturvallisuutta Suomessa. Toiminnan tavoitteena on suomalaisten säteilyaltistuksen pitäminen pienenä ja turvallisuuden pitäminen korkeana käytännöllisten toimenpiteiden mahdollistamissa rajoissa. Lisäksi pyritään estämään säteily- ja ydinvoimaonnettomuudet. Valvonta perustuu säteily- ja ydinturvallisuutta koskevaan lainsäädäntöön, turvallisuusmääräyksiin ja ohjeisiin. Tällä hetkellä STUKissa on noin 340 työntekijää. Ympäristön säteilyvalvontaan keskittyvän osaston ja hallinto-osaston lisäksi STUKissa on ydinjätteiden ja ydinmateriaalien valvontaan, ydinvoimalaitosten valvontaan, säteilytoiminnan valvontaan ja yhteisiin asiantuntijapalveluihin keskittyvät osastot. (STUK 2020.)

1.2 Tutkimusaineistot

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena hyödyntäen sekä kotimaista että kansainvälistä kirjallisuutta. Työn ensimmäinen vaihe oli perehtyä aiheeseen liittyvään lainsäädäntöön Finlex-, Stuklex- ja EUR-Lex-tietokantojen avulla. Lisäksi perehdyttiin oppikirjojen ja sähköisten materiaalien avulla työssä tutkittavien energiateollisuuden prosessien yksityiskohtiin. Säteilyyn liittyvää tietoa haettiin kotimaisista ja ulkomaisista kirjoista.

Kirjallisuushaut aloitettiin tekemällä google-hakuja aiheesta julkaistujen kansainvälisten raporttien löytämiseksi. Raporttien viiteluetteloihin tutustumalla löytyi monia tieteellisiä alkuperäisjulkaisuja. Lisäksi tehtiin hakuja tieteellisten artikkeleiden tietokannoista, kuten Scopus. Haut tehtiin pääasiassa englannin kielellä käyttäen erilaisia hakusanayhdistelmiä.

2 LUONNONSÄTEILYÄ AIHEUTTAVAT AINEET

2.1 Radioaktiivinen hajoaminen

Positiivisesti varautunut ydin ja sitä ympäröivät negatiiviset elektronit muodostavat atomin. Ytimessä on nukleoneja eli sähköisesti positiivisia protoneja ja varauksettomia neutroneja. Ionilla tarkoitetaan atomia, joka on saanut sähkövarauksen menettäessään yhden tai useamman elektronin tai silloin, kun siihen on sitoutunut ylimääräisiä elektroneja. Nuklidi on atomityyppi, jolla on määrätty järjestysluku (ytimen protonien lukumäärä) ja massaluku (ytimen protonien ja neutronien lukumäärä). (Ikäheimonen 2002, 12.) Suurin osa tunnetuista 2000 nuklidista on epästabiileja eli ne muuttuvat toisiksi nuklideiksi ilman ulkoisten tekijöiden vaikutusta. Yleensä tämä johtuu siitä, että ytimessä on liikaa tai liian vähän neutroneja. Ilmiötä kutsutaan radioaktiiviseksi hajoamiseksi, koska ytimet lähettävät hajotessaan säteilyä. Epästabiileja nuklideja kutsutaan yleisesti radioaktiivisiksi nuklideiksi tai radionuklideiksi. (Ikäheimonen 2002, 16.) Radioaktiivisen lähteen aktiivisuus määritellään lähteessä tapahtuvien hajoamisten lukumääränä aikayksikössä. SI-järjestelmässä aktiivisuuden yksikkö on becquerel (Bq). Jos lähteessä tapahtuu keskimäärin yksi hajoaminen sekunnissa, on sen aktiivisuus 1 Bq. Aktiivisuus voidaan ilmaista myös aineen massaa (Bq kg^{-1}), tilavuutta (Bq m^{-3}) tai pinta-alaa kohti (Bq m^{-2}). (Ikäheimonen 2002, 19-20.)

Radioaktiivisen lähteen aktiivisuus voidaan laskea yksinkertaisten kaavojen avulla huolimatta siitä, että hajoaminen tapahtuu spontaanisti ja satunnaisesti. Hajoamista millä tahansa ajan hetkellä voidaan tarkastella hajoamislain perusteella.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Jossa:

$$\begin{aligned} N(t) &= \text{ytimien lukumäärä hetkellä } t \\ N_0 &= \text{ytimen lukumäärä hetkellä } t=0 \\ \lambda &= \text{ytimen hajoamisvakio} \end{aligned}$$

Samalla yhtälöllä voidaan tarkastella myös aktiivisuutta millä tahansa ajan hetkellä huomioiden, että aktiivisuus on ytimen hajoamisvakio (eli ytimen hajoamisen todennäköisyys aikayksikössä) kerrottuna ytimien lukumäärällä. Puoliintumisajalla kuvataan sitä aikaa, jonka kuluessa tietyn radionuklidin aktiivisuus laskee puoleen. Kahden puoliintumisajan päästä aktiivisuus on neljäsosa alkuperäisestä. Puoliintumisajan ja hajoamisvakion välillä on yhteys. (Ikäheimonen 2002, 27-28.)

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \quad (2)$$

Jossa:

$$\begin{aligned} T_{1/2} &= \text{puoliintumisaika} \\ \lambda &= \text{ytimen hajoamisvakio} \end{aligned}$$

Hajotessaan ydin lähettää hiukkasia tai fotoneja. Raskailla nuklideilla on yleistä alfahajoaminen, jossa ytimestä lähtee kahden protonin ja kahden neutronin muodostama alfahiukkanen. Beetahiukkaset voivat olla negatiivisesti varautuneita elektroneja tai positiivisesti varautuneita positroneja. Usein alfa- tai beetahajoamisen seurauksena syntynyt tytärnuklidi on myös virittynyt. Sen viritystilat purkautuvat gammasäteilynä. Gammasäteily ei ole hiukkassäteilyä vaan sähkömagneettista aaltoliikettä. (Ikäheimonen 2002, 19-21.)

2.2 Ionisoivan säteilyn haitalliset vaikutukset ihmisiin ja ympäristöön

Säteilyn haittavaikutuksiin vaikuttaa olennaisesti se, mitä säteilylajeja radioaktiiviset aineet lähettävät ja missä aineet sijaitsevat. Alfasäteilyä lähettävät aineet voivat aiheuttaa merkittävää säteilyannosta ihmisille ainoastaan päästessään elimistön sisälle, sillä alfasäteily ei pysty läpäisemään ihoa. Beetasäteilyä lähettävät aineet puolestaan voivat säteilyttää myös ihoa noin senttimetrin syvyyteen. Gammasäteily pystyy tunkeutumaan syvälle kehoon. (Pöllänen 2003, 15.)

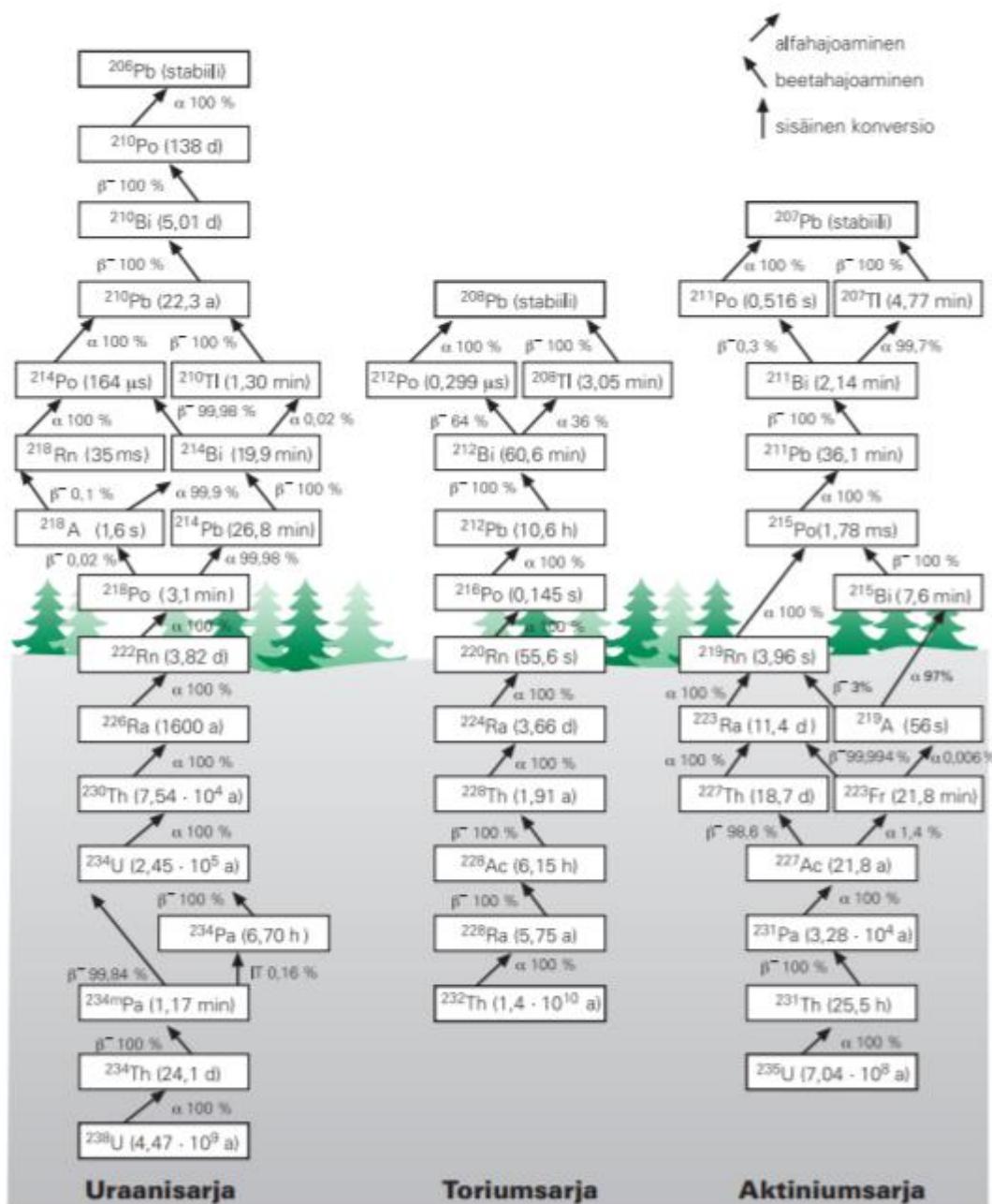
Säteilyn haitallisia vaikutuksia kuvataan suurella nimeltä annos. Absorboitunut annos kertoo, kuinka suuren energiamäärän säteily on jättänyt kohdeaineeseen massayksikköä kohti. Absorboituneen annoksen yksikkö on J kg^{-1} , jolle on annettu tässä yhteydessä erillisnimeksi gray (Gy). Absorboitunut annos ei suoraan kerro säteilyn aiheuttamista haittavaikutuksista, koska eri säteilylajeilla on erilainen potentiaali aiheuttaa näitä haittoja. Absorboitunutta annosta painotetaan eri säteilylajeille annetuilla kertoimilla, jolloin saadaan laskettua ekvivalenttiannos. Ekvivalenttiannoksen yksikkö on sievert (Sv). Säteilysuojelussa tulee huomioida myös se, että tietyt ruumiinosat ovat herkempiä säteilylle. Kun eri elinten ja kudosten saamia ekvivalenttiannoksia painotetaan kyseisten kehonosien herkyyttä kuvaavilla kertoimilla, saadaan laskettua efektiivinen annos. Myös efektiivisen annoksen yksikkö on Sv. Efektivistä annosta käytetään arvioidessa esimerkiksi syöpäriskiä, mutta ei kuvaamaan suurten annosten aiheuttamia akuutteja vaikutuksia. (UNEP 2016, 7-8.)

Ionisoivalla säteilyllä on sekä suoria että satunnaisia vaikutuksia ihmisten terveyteen. Suorat vaikutukset (esimerkiksi palovammat) johtuvat merkittävästä solujen kuolemasta tai vahingoittumisesta ja esiintyvät korkean altistuksen (yli 1 Gy) yhteydessä. Satunnaiset vaikutukset voivat ilmaantua pitkienkin aikojen jälkeen altistumisen jälkeen ja niiden uskotaan johtuvan solujen geneettisen materiaalin muutoksista säteilyn vaikutuksesta. Säteilyannoksen suuruus vaikuttaa niiden ilmaantumisen yleisyyteen, mutta ei haitan vakavuuteen. Tutkimuksissa havaittuja satunnaisia haittoja ovat muun muassa syöpä, sydän- ja verisuonitaudit sekä perinnölliset vaikutukset. Tietoa pienten säteilyannosten vaikutuksesta (alle 100 mGy) eri sairauksien riskiin on edelleen vähän. (UNEP 2016, 13-24.)

Pitkään oli vallalla käsitys, jonka mukaan ympäristö oli suojeltu säteilyltä, mikäli ihmisten säteilysuojelusta oli huolehdittu asianmukaisesti eli huolehtien esimerkiksi siitä, ettei väestön annosrajat ylity. Viime vuosina tätä oletusta on kuitenkin kyseenalaistettu ja tutkimusta on entistä enemmän kohdistettu aiheeseen. Populaatiotasolla vaikutukset liittyvät hedelmällisyyteen, kuolleisuuteen ja mutaatioiden ilmenemiseen. Lisääntymiseen liittyvät muutokset ovat herkin indikaattori säteilyn vaikutuksista eläimiin ja kasveihin. Populaatiotason vaikutuksia ei todennäköisesti havaita alle 1-10 Gy annoksilla. Eliöyksilöiden herkkyys kuitenkin vaihtelee. Nisäkkäät vaikuttaisivat olevan säteilylle herkempiä kuin esimerkiksi kalat tai kasvit. (UNEP 2016, 22-23.)

2.3 Luonnon radionuklidit

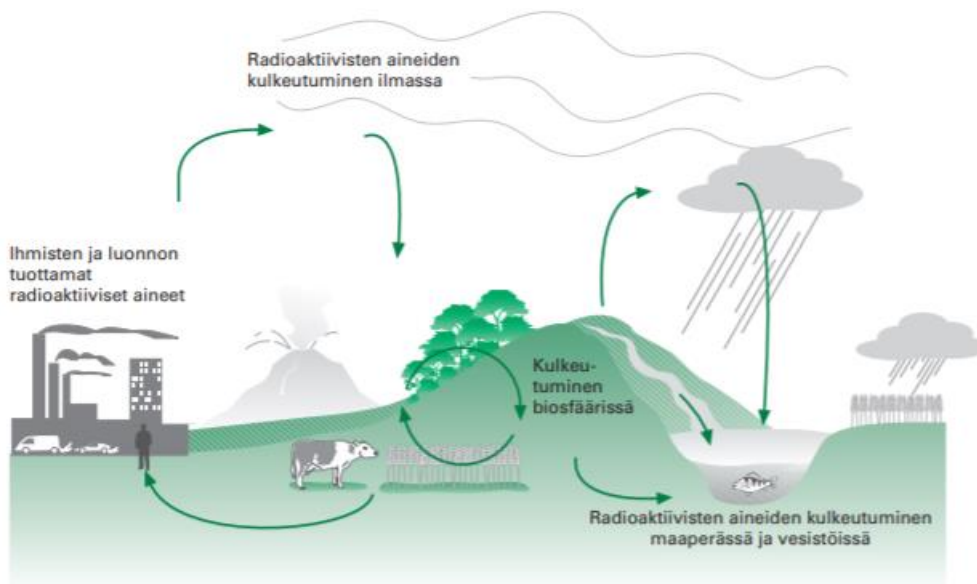
Suurin osa ympäristössämme olevista radioaktiivisista aineista on peräisin luonnollisista lähteistä. Osa näistä on kosmisen säteilyn vaikutuksesta ilmakehän yläkerroksissa jatkuvasti syntyviä kosmogeenisia radionuklideja. Maaperässä puolestaan on erittäin pitkäikäisiä radioaktiivisia aineita, jotka olivat olemassa jo maapallon syntyessä. Luonnon hajoamissarjoiksi kutsutaan hajoamissarjoja, joiden lähtönuklidit ovat ^{238}U , ^{235}U ja ^{232}Th (Kuvio 1). Hajoamissarjojen ulkopuolisia luonnon radioaktiivisia aineita ovat esimerkiksi ^{40}K ja ^{87}Rb . (Pöllänen 2003, 12.)



KUVIO 1. Luonnon hajoamissarjat. Nuklidien nimen vieressä on ilmoitettu niiden puoliintumisaika. (Pöllänen 2003, 377)

Radionuklidit kulkeutuvat ympäristössä samoin kuin muutkin alkuaineet (Kuvio 2). Ne voivat kulkeutua esimerkiksi veden mukana. Kulkeutumista tapahtuu myös maassa ja kallioperässä, mutta

se on hidasta verrattuna aineiden kulkeutumiseen ilmassa tai vedessä. Maaperästä ja vedestä radioaktiiviset aineet voivat siirtyä kasvien kautta eläimiin ja ihmisiin. Radioaktiivisessa hajoamisessa syntyvien tytäraineiden kulkeutuminen voi olla erilaista kuin hajoamistuotteiden. Esimerkiksi radium esiintyy maaperässä kiinteässä muodossa, mutta sen hajoamistuote radon on kaasumainen ja siten erittäin liikkuvaa. (Pöllänen 2003, 15-22.)



KUVIO 2. Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen ympäristössä (Pöllänen 2003. 16).

Suomalaisen saamaksi keskimääräiseksi efektiiviseksi annokseksi laskettiin vuonna 2018 5,9 mSv. Luonnossa olevat radionuklidit aiheuttavat tästä suurimman osan. Noin kaksi kolmasosaa (4 mSv) on peräisin työpaikkojen ja asuinrakennusten huoneilmaan päässeestä radonista. 1,1 mSv aiheutuu puolestaan luonnon taustasäteilystä, johon kuuluu sekä kehoon joutuneet luonnolliset radioaktiiviset aineet (0,30 mSv), että maaperän alkuperäisten radionuklidien sekä rakennusmateriaalien (0,45 mSv) ja kosmisen säteilyn kautta syntyvien radionuklidien aiheuttama ulkoinen taustasäteily (0,33 mSv). Lentomatokustuksesta aiheutuu keskimäärin 0,05 mSv vuotuinen annos (Siiskonen 2020, 35.)

2.4 Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet (NORM) teollisissa prosesseissa

Ihminen voi toiminnallaan vaikuttaa luonnon radionuklidien esiintymiseen välittömässä elinympäristössämme hyödyntäessään niitä sisältäviä geologisia materiaaleja erilaisissa prosesseissa. Tällaisia prosesseja ovat muun muassa kaivostoiminta, fossiilisten polttoaineiden polttaminen ja kaasun- sekä öljyntuotanto. Radionuklidien pitoisuudet saattavat kasvaa joissakin prosessin osissa tai altistuminen on luonnontilaa todennäköisempää prosessin tuotteiden, sivutuotteiden tai jätteiden sisältäminen radioaktiivisten aineiden takia. (Lecomte ym. 2019) Kansainvälisesti käytetty lyhenne luonnonsäteilyä aiheuttaville aineille on NORM (Naturally occurring radioactive material). IAEA (2018) määrittelee termin seuraavasti: "Radioactive material containing no significant amounts of radionuclides than naturally occurring radionuclides". Tähän sisältyy myös materiaalit, joissa aktiivisuuspitoisuudet ovat muuttuneet erilaisissa prosesseissa. Jotkut tahot käyttävät tällaisille materiaaleille termiä TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials)

(EPA, 2020). Suomen lainsäädännössä termejä NORM ja TENORM ei käytetä vaan puhutaan luonnonsäteilylle altistavasta toiminnasta (Säteilylaki 859/2018). Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet koostuvat yleensä ^{238}U :n ja ^{232}Th :n hajoamissarjoista sekä ^{40}K :sta (Lecomte ym. 2019).

Luonnonsäteilyä aiheuttaviin aineisiin on tärkeää kiinnittää huomiota, sillä niitä esiintyy teollisuudessa suuria määriä. Luonnon radionuklidit ovat pitkäikäisiä ja säteilytoksisia, joten niiden on mahdollista aiheuttaa pitkäaikaista haittaa. Myös väestön altistuminen erilaisten jätteiden ja tuotteiden kautta on mahdollista. On siis tärkeää selvittää, miten luonnonsäteilyä aiheuttavia aineita esiintyy erilaisissa teollisuusprosesseissa ja missä prosessin vaiheessa pitoisuudet ovat suurimmillaan. Tarkastelussa täytyy huomioida sekä tuotteet, sivutuotteet että jätteet. (Lecomte ym. 2019)

Useat ihmisen suorittamat prosessit muuttavat radionuklidien ja niiden ympäristön fysiokemiallisia ominaisuuksia. Tämä voi johtaa radionuklidien kertymiseen tiettyihin prosessin osiin. Esimerkiksi tuotettaessa juomavettä pohjavedestä esimerkiksi pH ja redox-potentiaali muuttuvat, mikä voi johtaa joidenkin aineiden saostumiseen. Polttoprosesseissa puolestaan tietyt nuklidit voivat muuttua haihtuviksi ja seulonnessa esimerkiksi saveen adsorboituneet nuklidit kertyvät hienoainekseen. Osassa prosesseja, kuten kaivostoiminnassa, luonnonsäteilyä aiheuttavien aineiden pitoisuudet eivät merkittävästi kasva, mutta suuri määrä niitä poistuu luonnontilasta. Tällöin niiden vapautuminen ympäristöön, esimerkiksi kaivosjätteistä, on todennäköisempää kuin luonnontilassa. (IAEA 2003, 10-11.)

2.5 Luonnonsäteilyä aiheuttaviin aineisiin liittyvä lainsäädäntö Suomessa

Suomen Säteilylain (859/2018) tarkoituksena on suojella terveyttä säteilyn aiheuttamilta haitoilta sekä ehkäistä ja vähentää säteilystä aiheutuvia ympäristöhaittoja ja muita haittoja. Laissa määrätään myös luonnonsäteilylle altistavasta toiminnasta. Säteilylain 4 § määrittelee, että luonnonsäteilyllä tarkoitetaan avaruudesta tai luonnon radioaktiivisista aineista peräisin olevaa ionisoivaa säteilyä silloin, kun niitä ei käytetä säteilylähteinä. STUK valvoo Säteilylain 14 § mukaan kyseisen lain noudattamista.

Luonnonsäteilylle altistavasta toiminnasta aiheutuu toimijalle Säteilylain perusteella velvoitteita, kuten ilmoitusvelvollisuus ja säteilyaltistuksen selvitysvelvollisuus. Säteilylain 145 § määrää, että uusien toimijoiden on ilmoitettava STUKille luonnonsäteilylle altistavan toiminnan aloittamisesta, kun kyseessä on kaivoslaissa tarkoitettu kaivostoiminta, maanalainen louhintatyö yhden työntekijän vuotuisen työajan ylittäessä 100 tuntia tai luonnon radioaktiivisia aineita sisältävien ainesten tai jätteiden käsittely, käyttö, varastointi ja hyödyntäminen, jos ^{238}U , ^{232}Th tai niiden hajoamistuotteen aktiivisuuspitoisuus on suurempi kuin 1 Bq g^{-1} .

Jo olemassa olevalle teollisuudelle Säteilylain 146 § säätelee säteilyaltistuksen selvitysvelvollisuudesta. Säteilylain 151 § pykälä määrää, että luonnossa olevia maa-, kivi- tai muita aineksia tai näiden ainesten käytön tuloksena syntyneitä materiaaleja hyödyntävän toimijan on selvitettävä toiminnasta

aiheutuva säteilyaltistus, mikäli luonnonsäteilystä aiheutuva altistus voi olla viitearvoa suurempi. Valtioneuvoston asetus 1034/2018 52 § määrittelee nämä toiminnot ja niihin kuuluvat muun muassa öljyn ja kaasun tuotanto ja jalostus, geotermisen energian tuotanto sekä turve- ja hiilivoimalaitosten käyttö ja näiden laitosten kattiloiden huolto, korjaus ja käytöstä poistaminen.

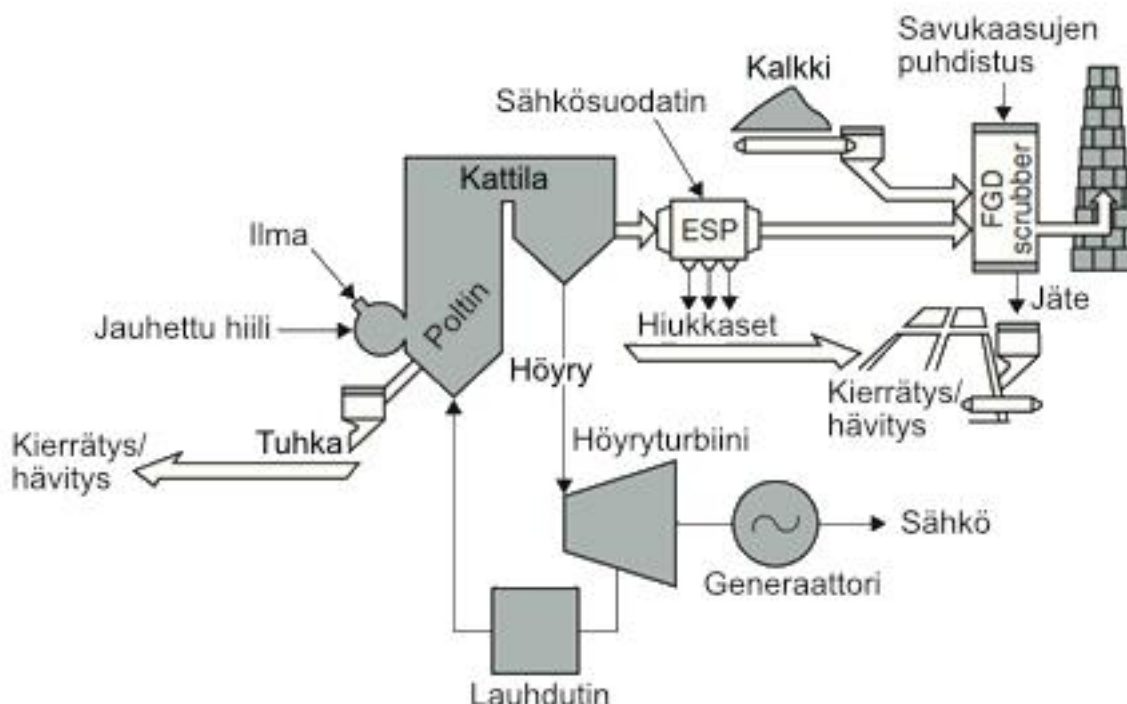
Säteilyaltistuksen selvittämisen sisältö kuvataan Säteilyturvakeskuksen määräyksessä luonnonsäteilylle altistavasta toiminnasta (S/3/2019). Selvityksen tulee sisältää kuvaus toiminnassa syntyvien luonnon radioaktiivisia aineita sisältävien materiaalien, jätteiden ja päästöjen määrästä ja laadusta sekä kuvaus niiden käsittelystä. Materiaaleista tehdään radioaktiivisuusmääryksiä ja ulkoisen säteilyn annosnopeutta on mitattava useissa eri kohdissa. Säteilyaltistuksen arviointi on osa selvitystä ja siinä on huomioitava sekä työperäinen että väestön ulkoinen ja sisäinen altistuminen. Tätä ei tarvitse tehdä siinä tapauksessa, että mittaukset osoittavat ^{238}U , ^{232}Th ja niiden hajoamistuotteiden aktiivisuuspitoisuuksien olevan pienempiä kuin 1 Bq g^{-1} . Altistus määritetään efektiivisen annoksen lisäyksenä luonnon taustasäteilystä aiheutuvaan efektiiviseen annokseen. Työperäisen altistuksen viitearvo muulle luonnonsäteilylle kuin radonille tai avaruussäteilylle on 1 mSv vuodessa ja väestön altistuksen viitearvo $0,1 \text{ mSv}$ vuodessa (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus ionisoivasta säteilystä 1044/2018 23 §, 26 §). Mikäli nämä viitearvot ylittyvät, vaikka rajoittavia toimia on tehty, on toiminnalle haettava turvallisuuslupaa STUKilta (Säteilylaki 148 §).

3 LUONNONSÄTEILYÄ AIHEUTTAVAT AINEET ENERGIATEOLLISUUDEN PROSESSEISSA

3.1 Polttolaitokset

Hiili ja turve ovat tyypillisiä polttoaineita polttolaitoksissa, mutta haitallisten ilmastovaikutusten takia niitä pyritään korvaamaan esimerkiksi biomassalla. Vuonna 2019 kivihiiltä käytettiin sähkön- ja lämmöntuotantoon Suomessa 2,3 miljoonaa tonnia, joka vastaa energiasisällöltään 60 petajoulea (Tilastokeskus 2020a). Turvetta käytettiin vuonna 2019 määrä, joka vastaa energiasisällöltään noin 50 petajoulea (Tilastokeskus 2020b).

Perinteisen voimalaitoksen toiminta esitellään Kuviossa 3. Polttoaine palaa kattilassa ja savukaasujen lämpö höyryttää laitoksessa kiertävän veden. Höyryturbiini ja siihen yhdistetty generaattori muuttavat höyryn sisältämän lämpöenergian mekaaniseksi energiaksi ja lopulta sähköenergiaksi. Turbiinilta höyry siirtyy lauhduttimelle ja takaisin vesikiertoon. Polttoaineen sisältämät palamattomat aineet kertyvät joko kattilan pohjalle kertyvään pohjatuhkaan ja kuonaan tai kulkeutuvat savukaasujen mukana lentotuhkana. Savukaasut kulkeutuvat puhdistuslaitteistojen kautta savupiippuun, josta ne lopulta poistuvat ilmakehään. Partikkelien poistamiseen savukaasuista voidaan käyttää sähkösuodattimia, sykloneita ja kangassuodattimia. Rikkiä poistetaan esimerkiksi lisäämällä savukaasujen sekaan kalkkikiveä tai erilaisilla puolikuivilla ja kuivilla menetelmillä. Savukaasujen puhdistuksesta syntyy kiinteitä sivutuotteita. Myös polttotavalla, esimerkiksi leijukerrospoltoilla, ja lisäaineilla, esimerkiksi ammoniakilla, voidaan vaikuttaa typen ja rikin päästöihin. (Breeze 2005, 20-34.)



KUVIO 3. Perinteinen hiilivoimalaitos (muokattu Breeze 2005, 21).

3.1.1 Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet kivihiiltä polttavissa laitoksissa

Kivihiili muodostuu kasvien jäänteiden hautautuessa syvälle hapettomaan maahan, jossa korkea paine ja lämpötila hajottavat orgaanista ainesta. Kaasut haihtuvat pois ja jäljelle jäävän aineen hiilipitoisuus on korkea. Raskasmetalleja ja radionuklideja esiintyy yleensä kivihiilessä sulfidien kanssa. Polttoaineena käytettävän kivihiilen sisältämien uraani- ja toriumsarjojen radionuklidien sekä ^{40}K :n pitoisuudet riippuvat voimakkaasti tuotantoalueen geologisista ominaisuuksista. (IAEA 2003, 22-23.) Hajoamissarjat ovat yleensä tasapainossa polttoaineessa. Arvioiden mukaan matalalaatuisemmissa hiililaaduissa, kuten ruskohiilessä, on yleensä suuremmat radioaktiivisuuspitoisuudet verrattuna korkealaatuisempiin hiiliin. Pitoisuudet tuhassa ja muissa sivutuotteissa puolestaan ovat voimakkaasti yhteydessä polttoaineen pitoisuuksiin. Tyypillisesti pitoisuudet sivutuotteissa ovat noin 3-10 kertaa suurempia kuin polttoaineessa johtuen hiilen ja veden poistumisesta polttoprosessin aikana. (Lauer ym. 2015.)

Kaasumaiset radionuklidit (kuten ^{210}Pb ja ^{210}Po) kertyvät lentotuhkaan ja piipun kautta poistuviin pieniin partikkeleihin. Nykyaikaiset savukaasujen puhdistusjärjestelmät estävät hyvin päästöt ilmaan, mutta niistä syntyy sivutuotteina erilaisia lietteitä ja kipsejä. On myös mahdollista, että radionuklidit kertyvät piipun sisälle savukaasujen jäähtyessä. (IAEA 2003, 25-32.) Nykyaikaisista hiilivoimalaitoksista päätyy piipun kautta ilmaan noin 0,5 % polttoaineen sisältämästä radioaktiivisuudesta (Cook ym. 2018).

Lauer ym. (2015) mittasivat ^{210}Pb -aktiivisuuspitoisuuksia lentotuhkanäytteistä sähkösuodattimelta. Pitoisuudet olivat sitä suurempia, mitä suurempi etäisyys kattilan ja suodattimen levyn välillä oli eli mitä hienompaa tuhkaa levyille kertyi. Tämä on havaittu myös muissa tutkimuksissa (IAEA 2003, 27; Mora 2009). Radioisotooppien kertyminen lentotuhkaan näyttäisi olevan käänteisesti riippuvainen polttoaineen tuhkapitoisuuteen. ^{210}Po -rikastumista havaittiin myös savukaasupesurilla syntyneessä kipsijätteessä. (Mora 2009.) On tärkeää huolehtia asianmukaisesti hengityksen suojauksesta lentotuhkaa käsitellessä, sillä ^{210}Pb ja ^{210}Po ovat haitallisia joutuessaan hengitetyn pölyn mukana elimistöön (Kämäräinen 2018, 33).

Radiumin käyttäytymisestä polttoprosessien aikana ei ole täyttä selvyttä. On viitteitä siitä, että ^{226}Ra voisi olla haihtuva, kun taas ^{228}Ra ei. Erot voisivat johtua siitä, miten niiden emonuklidit ovat sitoutuneina polttoaineeseen. Lauerin ym. omissa tutkimuksissa ei kuitenkaan huomattu eroa $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ -aktiivisuussuhteessa polttoaineiden ja lentotuhkan välillä (Lauer ym. 2015).

On mahdollista, että ^{210}Pb ja ^{210}Po kertyvät myös kattilan seinämiin tai vesiputkien ulkopinnoille (Cook ym. 2018). Huijbregts ym. (2000) raportoivat ^{210}Pb -rikastuneiden kattilakivien (^{210}Pb aktiivisuuspitoisuus yli 100 Bq g^{-1}) esiintymisestä kattiloissa. Korkeimmat pitoisuudet määritettiin melko pieneltä alueelta noin 5-10 metriä polttoalueen yläpuolelta. Tällä on merkitystä työntekijöiden altistumisen kannalta huoltotoissa, joten erityisesti hengityksensuojaukseen kannattaa kiinnittää huomiota. Vastaavissa mittauksissa irlantilaisissa hiilivoimalaitoksissa keskimääräiseksi ^{210}Pb -aktiivisuuspitoisuudeksi mitattiin 0.4 Bq g^{-1} (Organo ja Fenton, 2008, 23). Eroa voi selittää

polttavan kivihiilen klooripitoisuus, sillä korkea klooripitoisuus edistää pelkistäviä olosuhteita kattilassa. Pelkistävissä olosuhteissa lyijyn kondensaatiolämpötila on pienempi. Myös kattilatyypin vaikutus, sillä uudentyypeissä low NOx-kattiloissa lyijy esiintyy muodoissa PbS ja PbCl₂, joilla on matalampi kondensaatiolämpötila kuin vanhemmissa kattilatyypeissä esiintyvällä muodolla PbSO₄. Irlannissa tutkitut kattilat edustivat vanhempaa tekniikkaa. Myös kattilan koolla (Irlannissa pienempi) ja polttolämpötilalla (Irlannissa yli lyijyn kondensaatiolämpötilan) näyttäisi olevan vaikutusta lyijykivettyneiden syntymiseen. (Organo ja Fenton 2008, 23-24).

Taulukkoon 1 on kerätty aktiivisuuspitoisuuksia eri pisteistä irlantilaisissa hiilenpolttolaitoksissa. Organo ja Fenton (2008, 25) arvioivat, että työntekijöiden altistuminen ei ole suurempi kuin 1 mSv vuodessa. Myös Lecomte ym. (2019) arvioivat, että hiilenpolttolaitosten työntekijöiden altistuminen ei ylitä mainittua rajaa. Väestön altistuminen on Lecomte ym. (2019) mukaan merkityksetöntä.

TAULUKKO 1. Aktiivisuuspitoisuuksia (Bq kg⁻¹, valumavedelle Bq l⁻¹) irlantilaisissa hiilenpolttolaitoksessa (muokattu Organo ja Fenton 2008, 53).

	U-238	Ra-226	Pb-210	Th-232	K-40
Hiili	5-45	6-67		2-13	20-100
Lentotuhka	116-120	118-317	254-387	40-107	191-625
Pohjatuhka	47-91	60-100		29-61	180-460
Kattilakuona	105-220	73	366	58-65	353-394
Valumavesi	<2	<4		<1	8,1-8,9

Polttolaitoksissa syntyvien tuhkien käytöstä säteilyturvallisuuden näkökulmasta ohjeistetaan Säteilyturvakeskuksen määräyksessä luonnonsäteilylle altistavasta toiminnasta (S/3/2019). Säteilyturvallisuus arvioidaan tuhkan radioaktiivisuuspitoisuuksien avulla käyttäen ohjessa annettuja aktiivisuusindeksejä. Luonnon radionuklidien lisäksi huomioidaan myös ¹³⁷Cs. Lentotuhkaa käsitellessä on huomioitava, että aktiivisuusindeksit eivät huomioi tuhkan ²¹⁰Pb-pitoisuutta huolimatta siitä, että se kertyy sinne merkittävästi (Kämäräinen ym. 2018, 33).

3.1.2 Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet turvetta polttavissa laitoksissa

Turpeessa esiintyy sekä luonnon radionuklideja että keinotekoisia radionuklideja. Luonnon radionuklidit ovat pääasiassa uraani- ja toriumsarjojen nuklideja. Erilaisten kemiallisten ominaisuuksiensa takia tietyn hajoamisketjun nuklidit eivät yleensä ole turpeessa tasapainossa. (Helariutta ym. 2000, 7-8.) Uraanin isotoopeilla on taipumus adsorboitua orgaaniseen materiaaliin ja pitoisuudet ovat usein suurempia syvemmällä. Radiumin isotopit kiinnittyvät savimineraaleihin. Radon jalokaasuna voi kulkeutua ilmakehään, mistä sen tytärnuklidit (lyijy, polonium ja vismutti) palautuvat laskeutuneena suon pintakerrokseen. Turvepolttoaineen radionuklidipitoisuuksiin vaikuttaakin selvästi se, miltä syvyydeltä turve on kerätty. (Helariutta ym. 2000, 22.)

Organo ja Fenton (2008, 17) määrittivät aktiivisuuspitoisuuksia irlantilaisessa turpeenpolttolaitoksessa polttoaineesta, lentotuhkasta, pohjatuhkasta ja tuhka-altaista valuvista vesistä (Taulukko 2). Lentotuhkan ja pohjatuhkan pitoisuuksissa eri näytteissä oli enemmän vaihtelua kuin polttoaineen pitoisuuksien välillä. Myös turvetta poltettaessa lentotuhkaan kertyy erityisesti ^{210}Pb . Muutoin radioaktiivisuuspitoisuudet turpeessa ja tuhkassa olivat jopa pienempiä kuin irlantilaisessa maaperässä yleisesti. (Organo ja Fenton 2008, 17.)

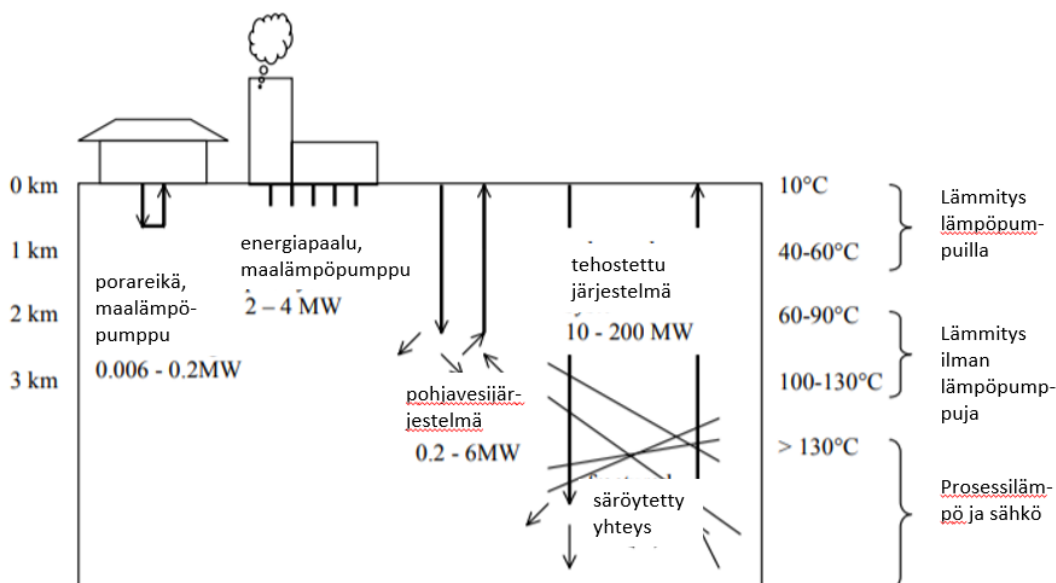
TAULUKKO 2. Aktiivisuuspitoisuuksien keskiarvot (Bq kg^{-1} , valumavedelle Bq/l^{-1}) irlantilaisessa turpeenpolttolaitoksessa (muokattu Organo ja Fenton 2008, 49).

	U-238	Ra-226	Pb-210	Th-232
Raaka turve	8	4	26	<0,9
Lentotuhka	102	26	414	12
Pohjatuhka	122	30	129	5
Valumavesi	Max 0,31	Max 0,7	Max 7,4	<0,9

Fenton ja Organo (2008, 17-18) arvioivat, että polttoainesiilossa 100 tuntia vuodessa työskentelevälle henkilölle voisi aiheutua pölyn hengittämisestä johtuen $0,5 \mu\text{Sv}$ vuosittainen annos olettaen työskentelyn tapahtuvan ilman hengityssuojaimia. Ulkoisesta gammasäteilystä eri kohdissa voimalaitosalueella arvioitiin vuodessa aiheutuvan alle $20 \mu\text{Sv}$ annos. Suurin annos aiheutuu todennäköisesti kattila-alueella. Yhteensä työntekijän vuosittainen annos on Fentonin ja Organon arvion mukaan $49 \mu\text{Sv}$.

3.2 Geoterminen energia

Geotermisellä energialla tarkoitetaan Maan sisäistä energiaa ja lämpöä. Se syntyy pääasiassa Maan sisuksissa tapahtuvien luonnon radioaktiivisten aineiden hajoamisten seurauksena. Tämä energia on hyödynnettävissä sekä sähkön että lämmön tuotannossa. Geoterminen energia on eri asia kuin geoenergia, joka puolestaan on maa- ja kallioperään sekä vesistöihin varastoitunutta, pääosin auringosta peräisin olevaa energiaa. Auringon säteilyn vaikutus ulottuu noin 15 m syvyyteen. Eroa havainnollistetaan Kuviossa 4. (Peura 2017, 4.)



KUVIO 4. Vasemmalta luettuna kaksi erilaista geoenergiaa hyödyntävää järjestelmää ja kaksi erilaista geotermistä energiaa hyödyntävää järjestelmää (muokattu Bächler 2003, 2).

Tuliperäisillä alueilla, kuten Islannissa, geotermistä energiaa on voitu hyödyntää jo pitkään, koska kuuma höyry ja vesi ovat saatavilla lähellä maanpintaa. Pyrkimys fossiilittomiin energianlähteisiin ja teknologian kehittyminen ovat lisänneet geotermisen lämmön hyödyntämistä myös muilla alueilla. (Peura 2017, 8.) Suomessa on äskettäin otettu käyttöön ensimmäinen geoterminen geolämpövoimala. Kyseessä on QHeat-yhtiön toteuttama 1300 m syvyinen syvälämpökaivo. Varastoitunutta energiaa hyödynnetään lämpönä lämpöpumpun avulla. Porausreiässä on lämmönkeruuputkisto, jossa virtaava lämmönsiirtoliuos kuljettaa lämpöenergiaa lämpöpumpulle. Virtauksen suunta on käännettävissä, jolloin se toimii myös jäähdytyksessä. (QHeat, 2020.)

Syvemmillä olevia vesi- tai höyryesiintymiä voidaan hyödyntää ilman lämpöpumppuja poraamalla kallioperään syviä reikiä. Niissä voidaan hyödyntää joko pohjavettä tai systeemin syötettyä vettä. Tällaisia voimaloita on kolme eri päätyyppiä. Dry steam- laitoksiksi kutsutaan sellaisia laitoksia, joissa hyödynnetään suoraan maan kuoresta tulevaa kuumaa vesihöyryä. Korkeapaineinen vesi voidaan myös muuttaa maan pinnalla höyryksi laskemalla sen painetta. Näitä laitoksia kutsutaan flash steam- laitoksiksi. Molemmissa tapauksissa jäähtynyt vesi palautuu takaisin kallioperään. Ympäristöön voi vapautua pieniä määriä höyryä ja kaasuja. Binäärikierrolaitoksissa vesi pumpataan lämmönvaihtimeen, josta lämpö siirtyy erilliseen lämmön vaikutuksesta höyrystyvään työaineeseen. Kyseessä on suljettu systeemi, joten päästöjä ilmakehään ei pitäisi tapahtua. (IAEA 2003, 33-36.) St1 rakentaa parhaillaan Suomen ensimmäistä syvemmillä olevaa lämpöä hyödyntävää geolämpövoimalaa. Maaperään porataan kaksi noin 6500 m syvyistä reikää. Toisesta pumpataan vettä alas kallioperään, jossa se kuumenee ja nousee sitten ylös toisesta reiästä. Syntynyt lämpö syötetään lämmönvaihtimen kautta kaukolämpöverkkoon. (St1, 2020.)

3.2.1 Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet geotermistä energiaa tuottavissa laitoksissa

Luonnonsäteilyä aiheuttavia aineita esiintyy sekä geotermisten laitosten suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa syntyvissä kiinteissä jätteissä että laitosten sähkön- ja lämmöntuotannon aikana, jolloin niitä liukenee geotermisiin nesteisiin. Luonnon radioaktiivisten aineiden pitoisuudet vaihtelevat alueen geologian ja minerologian mukaan sekä riippuen prosessiin liittyvistä fysikaalisista ja kemiallisista muutoksista. Reikien poraamisen yhteydessä syntyneet jätteet tulee käsitellä asianmukaisesti. (IAEA 2003, 36-37.)

Geotermisen energian tuotannon aikana syntyy sivutuotteina erilaisia saostumia, lietteitä ja kaasuja. Termodynaamiset ominaisuudet, kuten paine, lämpötila ja tilavuus, muuttuvat prosesseissa ja aiheuttavat geotermisten nesteiden mukana kulkeutuvien aineiden saostumista ja kaasuntumista. Saostumia syntyy laitoksissa käytettäviin laitteistoihin. Lietteitä syntyy saostumisen ja sedimentaation takia geotermisen nesteen jäähtymisprosessin aikana. Saostumia ja lietteitä voi esiintyä esimerkiksi turbiineissa, lämmönvaihtimissa, prosessilinjoiissa, venttiileissä ja nesteenkäsittelylaitteistoissa. Kaasuja voi muodostua periaatteessa kaikissa prosessin vaiheissa. Luonnon radioaktiivisiin aineisiin liittyvien riskien kannalta tärkeimmät ovat putkistoihin ja muihin laitteisiin kertyvät saostumat sekä ennen nesteen kallioperään palautusta suodattimelle kertyvä materiaali. Saostumat voivat olla erilaisia suoloja, kuten karbonaatteja, sulfaatteja ja silikaatteja tai metallisia saostumia (IAEA 2003, 38.)

Geotermisissä nesteissä ei yleensä esiinny merkittäviä määriä uraania ja toriumia vaan pääasiassa niiden tytärnuklideja ^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{212}Pb ja ^{222}Rn (IAEA 2003, 38). Lyijyn isotooppeja voi esiintyä sulfidisaostumissa (Degering ja Köhler 2015). Erityisesti on kuitenkin huomioitava ^{226}Ra ja ^{228}Ra . Radium käyttäytyy kemiallisesti samoin kuin geotermisissä nesteissä esiintyvät barium ja kalsium, joilla on taipumus muodostaa saostumia porareikiin, putkistoihin ja energiantuotantolaitteistoihin. Radiumia on havaittu bariitin yhteydessä sekä lietteissä että saostumissa. Bariittisaostumien muodostuminen on sitä todennäköisempää mitä suurempi lämpötila on. Korkeita radiumpitoisuuksia esiintyy etenkin geotermisen nesteen ollessa suolaista. Tutkimuksissa radioaktiivisuuspitoisuuksien on myös havaittu kasvavan laitoksessa kiertävän vesitilavuuden mukaan ja korkeimpia pitoisuuksia on mitattu läheltä reikää, josta neste palautetaan kallioperään. (Degering ja Köhler 2015; Finster ym. 2015.) Tyypilliset radiumin isotyyppien aktiivisuuspitoisuudet saostumissa ovat kymmeniä becquereleja grammaa kohti. Myös useita satoja becquereleja grammaa kohti on havaittu. Äärimmäisissä tapauksissa on mitattu jopa 1000 Bq g^{-1} pitoisuus ^{210}Pb :lle. (Degering ja Köhler 2015; BfS 2020)

Tutkimuksissa on pyritty löytämään menetelmiä, joilla luonnon radioaktiivisia aineita sisältävien saostumien ja lietteiden syntymistä voitaisiin estää. Vaihtoehtoisesti on tutkittu menetelmiä, joilla niitä voisi liuottaa syntyneistä saostumista ja lietteistä. Jos bariittisaostumien muodostuminen pystytään estämään, pitäisi myös radiumin kertyminen vähentyä. Periaatteessa sopivat menetelmät ovat samanlaisia kuin öljyntuotannossa, mutta toimivista tavoista ei ole vielä täyttä ymmärrystä ja aiheeseen liittyy merkittäviä tietopuutteita. (Finster ym. 2015.)

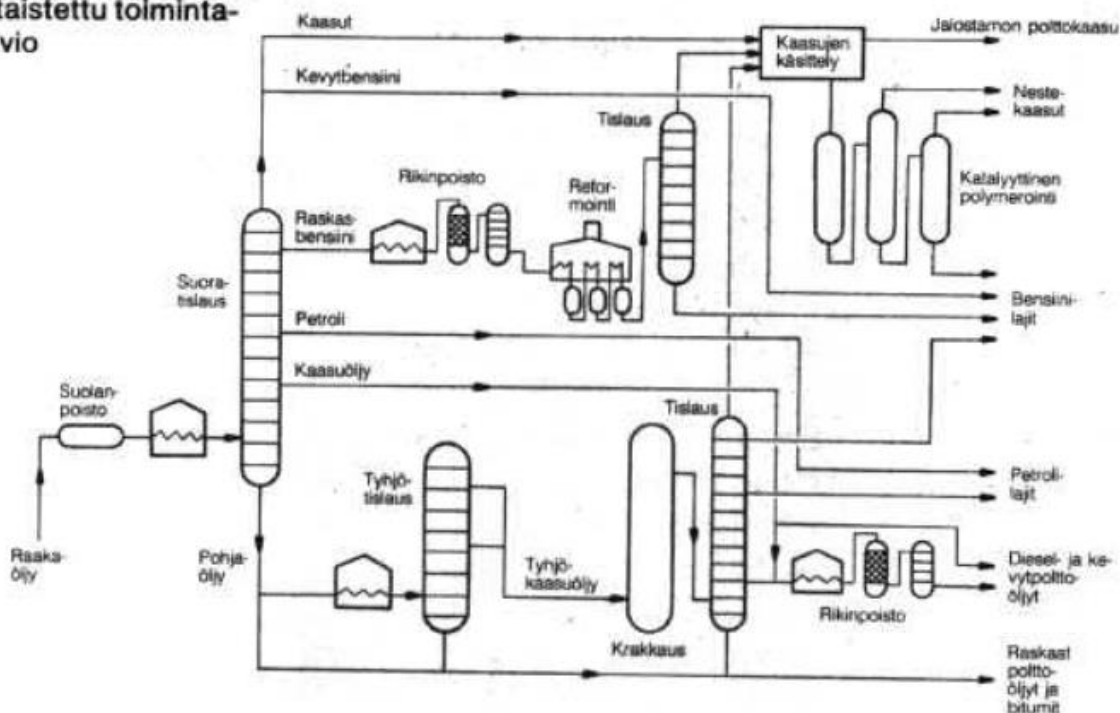
Saksan geotermistä energiaa tuottavilla laitoksilla tehdyt tutkimukset osoittivat, että massan perusteella suurin luonnonsäteilyä aiheuttavia aineita sisältävä jätejäte on metalliset materiaalit (noin 60 %), mutta ne sisältävät vain 1 % aktiivisuudesta. Saostumissa ja lietteissä on suurin osa aktiivisuudesta (yli 80 %) ja ne muodostavat noin 25 % syntyneistä jätteistä. Poltettavia jätteitä on 14 % jätteiden määrästä ja ne sisältävät noin 17 % aktiivisuudesta. (Degering ja Köhler 2015.) Tuotannon aikana syntyneistä jätteistä saostumat ja lietteet on loppusijoitettava asianmukaisesti, sillä niille ei ole tällä hetkellä uudelleenkäyttömahdollisuuksia. Työntekijöiden suojavaatteet ja käytetyt orgaaniset suodattimet on mahdollista hyödyntää energiana ja monet käytöstä poistetut materiaalit on mahdollista sulattaa uudelleenkäyttöä varten. Loppusijoitus ja kierrätys vaikuttaa siihen, millaisia annoksia työntekijät ja väestö voivat mahdollisesti saada. (BfS, 2020.). Degering ja Köhler (2015) arvioivat, että pelkkä oleskelu energiatuotantolaitoksella voisi aiheuttaa työntekijälle noin 1,2 mSv vuosittaisen annoksen. Suodattamien vaihtaminen ja huoltotyöt aiheuttaisivat noin 1,8 mSv vuosittaisen annoksen, joka johtuu sekä ulkoisesta säteilystä että hengitetyistä ja niellyistä materiaaleista. Myös Saksan säteilyviranomaisen arvioi, että työntekijöiden annos voi olla suurempi kuin 1 mSv vuodessa. Väestölle ei nykytiedon perusteella aiheudu yli 1 mSv annoksia. (BfS, 2020.)

3.3 Öljynjalostus

Sedimentin alle hautuneet orgaaniset ainekset ovat muuttuneet kuumuuden ja paineen vaikutuksesta nestemäisiksi ja kaasumaisiksi hiilivedyiksi, joita ihminen nykyään hyödyntää polttoaineena. Öljy ja kaasu pumpataan veden avulla kallioperästä ja erotellaan omiksi faaseikseen (IAEA 2003, 12). Raakaöljy jatkaa matkaansa öljynjalostamolle, jossa se erotellaan erilaisiin jakeisiin. Näitä jakeita ja lisäaineita sekoittamalla saadaan varsinaiset lopputuotteet. Tuotteita ovat jalostamokaasut (polttokaasut), nestekaasut, moottoribensiini, liuottimet, petroli, dieselöljyt, kevyet polttoöljyt, raskaat polttoöljyt ja bitumituotteet. (Pihkala, 2011.)

Öljynjalostusprosessi (Kuvio 5) alkaa suolanpoistolla. Esilämmitettyyn raakaöljyyn lisätään vettä ja seos ohjataan suolanpoistimeen korkeajännitteiseen sähkökenttään. Suolat liukenevat veteen ja sähkökentän vaikutuksesta vesipisarat sekä kiinteät epäpuhtaudet laskeutuvat pohjalle. Vedet ohjautuvat jäteveden käsittelyyn. Raakaöljyä esilämmitetään edelleen, kunnes se kuumennetaan noin 365-370 °C lämpötilaan ennen tislaukskolonniin syöttöä. Tällöin noin 65-75 % öljystä höyrystyy. Tiskauskolonnissa kaasu- ja nestevirtaukset erottuvat toisistaan. Höyrystynyt osa virtaa kohti kolonnin huippua. Höyrymäisenä kolonnin huipun saavuttavat bensiini ja sitä kevyemmät jakeet. Kaasut ohjataan talteenottoyksikköön ja bensiini edelleen muokattavaksi. Raskaammat jakeet lauhtuvat eri lämpötilatasoilla, poistetaan kolonnista sivu-ulosotoista ja johdetaan edelleen käsiteltäväksi. Tislautumaton osa, pohjaöljy, saadaan ulos kuumimmasta osasta tornin pohjalta. Tislauksessa syntyneistä tuotteista poistetaan rikkiä korkeassa vetyaineessa katalysaattorikemikaalien avustuksella. Krakkaamalla voidaan pilkkoa öljyn hiilivetyjä tarvittaessa pienemmiksi haluttujen lopputuotteiden saamiseksi. (Pihkala 2011.)

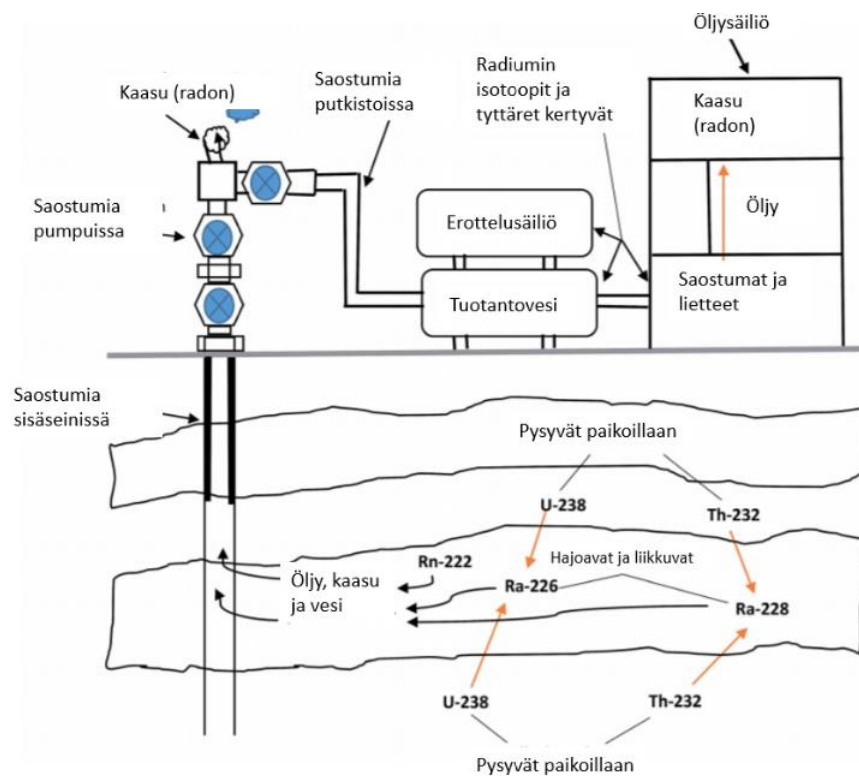
Öljynjalostamon yksinkertaistettu toiminta-kaavio



KUVIO 5. Öljynjalostusprosessi (Pihkala 2011).

3.3.1 Luonnonsäteilyä aiheuttavat aineet öljynjalostuksessa

Luonnon radioaktiivisia aineita esiintyy öljykenttien maaperässä vaihtelevina pitoisuuksina ja ne kulkeutuvat öljyn, kaasun ja veden mukana ympäristöön. Periaatekuva luonnon radioaktiivisten aineiden kulkeutumista öljyn- ja kaasuntuotannossa eri tuotteisiin (raakaöljy, kaasu ja vesi) esitetään Kuviossa 6. Radium on yleensä vesifaasissa tai saostuu prosessin aikana. Radon tyttärineen kulkeutuu pääasiassa kaasufaasin mukana. (IAEA 2003, 12-16; Ali ym. 2019.) Näin ollen kaasut, etenkin etaani, ovat ne öljyn- ja kaasuntuotannon lopputuotteet, joissa luonnon radioaktiivisia aineita esiintyy eniten. Niitä voi kuitenkin esiintyä myös öljynjalostuksen raaka-aineessa raakaöljyssä. (ARPANSA 2008, 85.) Taulukkoon 3 on koottu raakaöljystä eri puolella maailmaa mitattujen aktiivisuuspitoisuuksien jakauma.



KUVIO 5. Esimerkki luonnon radioaktiivisten aineiden kulkeutumisesta raakaöljyyn, kaasuun ja veteen (muokattu Ali ym. 2019).

TAULUKKO 3. Raakaöljystä mitattuja luonnon radionuklidien aktiivisuuspitoisuuksia (muokattu Ali ym. 2019 Taulukko 1).

Radionuklidi	Aktiivisuuspitoisuus (Bq kg ⁻¹)
²³⁸ U	0,0001-10
²³² Th	0,3-2
²²⁶ Ra	0,1-40
²²⁸ Ra	3-17
²²⁴ Ra	-
²²² Rn	3-17
²¹⁰ Pb	-
²¹⁰ Po	0-10

Luonnon radioaktiivisten aineiden esiintymisestä öljynjalostamoilla löytyy erittäin vähän julkaistua tietoa. Bakr (2010) keräsi näytteitä lietteistä, vedestä ja raakaöljystä egyptiläiseltä öljynjalostamolta huoltotoimenpiteiden aikana. Tuloksien perusteella hän myös mallinsi tyypillisimpiä altistumisskenaarioita (ulkoisen altistuminen gammasäteilylle, altistuminen pölyn hengittämisen kautta) ja tunnisti niiden kannalta tärkeimpiä materiaaleja. ²²⁶Ra oli isotoopeista se, jonka pitoisuudet olivat suurimmat. Lietteissä (suurin mitattu pitoisuus $1785,8 \pm 285,7$ Bq kg⁻¹ raakaöljytankissa olevassa lietteessä) oli pienemmät pitoisuudet kuin raakaöljyssä (suurin mitattu pitoisuus $2669,0 \pm 99,2$ Bq kg⁻¹). Laitteistoista, kuten lämmönvaihtimesta, kerätyissä lietenäytteissä pitoisuudet olivat huomattavasti pienempiä kuin raakaöljytankkien lietteissä (suurin mitattu pitoisuus $195,0 \pm 4,6$ Bq kg⁻¹). Saostumista ja tuotteista ei mitattu suuria aktiivisuuspitoisuuksia verraten

esimerkiksi Suomen lainsäädännössä esiintyvään vapauttamisrajaan 1 Bq g^{-1} . Suurin pitoisuus $314,8 \pm 32,5 \text{ Bq kg}^{-1}$ määritettiin krakkausyksiköstä otetusta saostumanäytteestä. Arviot työntekijöiden vuosittaisesta efektiivisestä annoksesta vaihtelivat välillä $0,02 \text{ mSv}$ - $20,2 \text{ mSv}$. Huoltotehtävissä kannattaa kiinnittää huomiota hyvään ilmanvaihtoon, hengityssuojaimien käyttöön ja siihen, että kostutetaan sakat ja lietteet ennen puhdistustöitä. Bakrin (2010) tuloksiin on kuitenkin syytä suhtautua varauksella, sillä julkaisun menetelmäosio on osittain puutteellinen ja epä johdonmukainen esimerkiksi analyysimenetelmien kuvauksen osalta.

Laajemmissa katsausraporteissa aiheesta on arvioitu luonnon radioaktiivisten aineiden todennäköisesti kertyvän pääasiassa korkeimman kiehumispisteen virtoihin, sillä Th- ja U-pitoisuudet ovat yleensä sitä suurempia, mitä raskaampaa raakaöljy on (ARPANSA 2008, 90; IOGP 2016, 15). Luonnon radionuklidien pitoisuus öljynjalostuksen jätteissä ei yleensä ole suurempi kuin 1 Bq g^{-1} (IOGP 2016, 15).

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin kirjallisuuden avulla luonnonsäteilyä aiheuttavien aineiden kertymistä eri prosessivaiheisiin hiilen- ja turpeenpoltossa, geotermisen energian tuotannossa ja öljynjalostuksessa. Polttoprosesseissa tulee kiinnittää erityistä huomiota lentotuhkan ^{210}Pb - ja ^{210}Po -pitoisuuksiin, sillä haihtuvina aineina ne kertyvät sinne. On myös viitteitä siitä, että ^{210}Pb voi kertyä kattilan seinämiin muodostuviin kivettyymiin. Polttotekniikalla on vaikutusta kyseisten kivettymien esiintymiseen. Geotermisen energian tuotannossa tulee kiinnittää huomioita erityisesti radiumin eri isotooppeja sisältäviin saostumiin ja lietteisiin, joita voi muodostua useissa prosessin vaiheissa. Öljynjalostukseen liittyen kirjallisuudesta löytyi vähän tietoa. ^{226}Ra näyttäisi kuitenkin olevan merkittävin säteilyturvallisuuteen vaikuttava aine kyseisissä laitoksissa. On mahdollista, että työperäisen altistuksen viitearvo muulle luonnonsäteilylle kuin radonille tai avaruussäteilylle (1 mSv) ylittyy työssä tarkastelluissa toiminnoissa esimerkiksi huoltotöitä tekeville henkilöillä. Näissä tapauksissa toiminnalle olisi haettava turvallisuuslupaa STUKilta.

Tässä työssä tarkasteltiin ainoastaan julkisesti saatavilla olevaa materiaalia kuten kansainvälisten organisaatioiden raportteja ja tieteellisissä lehdissä julkaistuja artikkeleita. On todennäköistä, että energia-alan toimijoilla itsellään on olemassa tarkempia mittaustuloksia omista laitoksistaan. Joka tapauksessa näillä toimijoilla on velvollisuus huolehtia luonnonsäteilylle altistavan toiminnan turvallisuudesta omilla toimipaikoillaan.

Myös julkista, tieteelliseen tutkimukseen perustuvaa tietoa aiheesta olisi kuitenkin hyödyllistä saada lisää. Tätä tietoa tarvitaan muun muassa pohjaksi viranomaisen määräyksiin, ohjeisiin ja viestintään. Yleisesti esimerkiksi geotermiseen energiaan liittyvä tutkimustieto tulee todennäköisesti lisääntymään lähitulevaisuudessa, sillä se on nopeasti lisääntyvä energiantuotantomuoto. Geotermisen energian osalta laitospaikoilla tehtävät mittaukset ja selvitykset ovat erittäin tarpeellisia, sillä kunkin laitospaikan geologia vaikuttaa voimakkaasti luonnonsäteilyä aiheuttavien aineiden esiintymiseen prosessissa. Polttoprosesseihin liittyen kattilan tyypillä ja polttotavalla näyttäisi olevan vaikutusta siihen, kuinka paljon lyijyä (myös radioaktiivista isotooppia ^{210}Pb) kertyy kattilaan muodostumiin kivettyymiin. Tätä asiaa olisi tarpeellista tutkia lisää. Öljynjalostamoilla luonnonsäteilyä aiheuttavien aineiden pitoisuudet vaikuttaisivat löydetyn kirjallisuuden perusteella olevan melko pieniä. Aineistoa löytyi kuitenkin niukasti, joten johtopäätösten tekeminen sen perusteella on vaikeaa. Luotettavia tutkimuksia aiheesta tarvittaisiin lisää. Myös muilta teollisuuden aloilta kerättyä tietoa voi myös hyödyntää soveltavin osin.

Tässä työssä keskityttiin Säteilylaissa mainittuihin energiateollisuuden prosesseihin. On kuitenkin mahdollista, että luonnonsäteilyä aiheuttavia aineita esiintyy muissakin energiateollisuuden toiminnoissa. Biomassaa käytetään jo nyt yleisesti polttoaineena ja hiiltä sekä turvetta tullaan tulevaisuudessa korvaamaan sillä yhä enemmän. Myös jätteenpolto on lisääntynyt viime vuosina. Tutkimuksissa olisi hyvä huomioida myös nämä ja tarkastella esimerkiksi lyijykivettymien muodostumista näitä polttoaineita poltettaessa.

LÄHTEET

- ALI, Mohsen MM, ZHAO, Hongtao, LI, Zhongyu ja MAGLAS, Najeeb NM 2019. Concentrations of TENORMs in the petroleum industry and their environmental and health effects. RSC Advances 9:39201.
- ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency) 2008. Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). Radiation Protection Series Publication No. 15. Viitattu [2020-03-01]. Saatavissa: https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/rps/rps15.pdf?acsf_files_redirect
- BAKR, WF 2010. Assessment of the radiological impact of oil refining industry. Journal of Environmental Radioactivity 101:237-243.
- BfS (Bundesamt für Strahlenschutz) 2019. Residues from deep geothermal energy. Viitattu [2020-04-05]. Saatavissa: https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/residues/deep-geothermics/deep-geothermics_node.html
- BREEZE, Paul 2005. Power Generation Technologies. Great Britain: Newnes.
- BÄCHLER, Dominique 2003. Coupled Thermal-Hydraulic-Chemical Modelling at the Soultz-sous-Forets HDR Reservoir (France). Doctoral Thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Saatavissa: http://www.gtr.ethz.ch/baechler/thesis_db.pdf
- COOK, Nigel J, EHRING, Kathy J, ROLLOG, Mark, CIOBANU, Cristiana L, LANE, Daniel J, SCHMANDT, Danielle S, OWEN, Nicholas D, HAMILTON, Toby ja GRANO, Stephen R 2018. 210Pb and 210Po in Geological and Related Anthropogenic Materials: Implications for Their Mineralogical Distribution in Base Metal Ores. Minerals 8:211.
- DEGERING, Detlev ja KÖHLER, Matthias 2015. Natural radionuclides in deep geothermal heat and power plants of Germany. FOG-Freiberg Online Geoscience 39-42:178-185.
- EPA (United States Environmental Protection Agency) 2020. Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (TENORM). Viitattu [2020-02-22]. Saatavissa: <https://www.epa.gov/radiation/technologically-enhanced-naturally-occurring-radioactive-materials-tenorm>
- FINSTER, Molly, CLARK, Corrie, SCHROEDER, Jenna ja MARTINO, Louis 2015. Geothermal produced fluids: Characteristics, treatment technologies, and management options. Renewable and Sustainable Energy Reviews 50:952-966.
- HELARIUTTA, K, RANTAVAARA, A ja LEHTOVAARA, J 2000. Turvesoiden ja polttoturpeen radionuklidit. STUK-A143. Helsinki: Säteilyturvakeskus.
- HUIJBREGTS, WMM, DE JONG, MP ja TIMMERMANS, CWM 2000. Hazardous accumulation of radioactive lead on the water wall tubes of coal-fired boiler. Anti-Corrosion Methods and Materials 7:274-279.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) 2003. Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation. Technical Reports Series no. 419. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IAEA (International Atomic Energy Agency), 2018. Safety Glossary. [Viitattu 2020-02-22]. Saatavissa: <https://kos.iaea.org/iaea-safety-glossary.html>
- IKÄHEIMONEN, Tarja K (toim.) 2002. Säteily ja sen havaitseminen. Helsinki: Säteilyturvakeskus.

- IOGP (International Association of Oil & Gas Producers) 2016. Managing Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the oil and gas industry. Report 412. [Viitattu 2020-03-02]. Saatavissa: <https://www.iogp.org/bookstore/product/412/>
- KÄMÄRÄINEN, Meerit, KALLIO, Antti ja TURUNEN, Jani 2018. Bioenergian tuotannossa syntyvän tuhkan radioaktiivisuus. Helsinki: Säteilyturvakeskus.
- LAUER, Nancy E, HOWER, James C, HSU-KIM, Heileen, TAGGART, Ross K ja VENGOSH, Avner 2015. Naturally Occurring Radioactive Materials in Coals and Coal Combustion Residuals in the United States. *Environmental Science & Technology* 49:11227-11233.
- LECOMTE, JF, SHAW, P, LILAND, A, MARKKANEN, M, EGIDI, P, ANDRESZ, S, MRDAKOVIC-POPIC, J, LIU, F, DA COSTA LAURIA, D, OKYAR, HB, HARIDASAN, PP ja MUNDIGL, S 2019. ICRP Publication 142: Radiological Protection from Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Industrial Processes. *Annals of the ICRP* 48:5-67.
- MORA, JC, BAEZA, A, ROBLES, B, CORBACHO, JA ja CANCIO, D 2009. Behaviour of natural radionuclides in coal combustion. *Radioprotection* 44:577-580.
- NEUVOSTON DIREKTIIVI TURVALLISUUTTA KOSKEVIEN PERUSNORMIEN VAHVISTAMISESTA IONISOIVASTA SÄTEILYSTÄ AIHEUTUVILA VAAROILTA SUOJELEMISEKSI JA DIREKTIIVIEN 89/818/EURATOM, 90/641/EURATOM, 96/29/EURATOM, 97/43/EURATOM JA 2003/122/EURATOM KUMOAMISESTA. Neuvoston direktiivi 2013/59/Euratom. EUR-Lex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2020-02-23]. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX:32013L0059>
- ORGANO, Catherine ja FENTON, David 2008. Radiological assessment of NORM Industries in Ireland – Radiation doses to workers and members of the public. Radiological Protection Institute of Ireland [Viitattu 2020-02-22]. Saatavilla: https://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII_NORM_Report_08.pdf
- PIHKALA, Juhani 2011. Prosessitekniiikan yksikköprosessit ja prosessitekniiikan kokonaisprosessit-oppikirjoja täydentävät www-sivut. [Viitattu 2020-04-07]. Saatavilla: <http://prosessiteknikka.kpedu.fi/index.htm>
- PEURA, Jutta 2017. Maanlaista Energiaa. Geoteknisen osaston julkaisu 97. Helsinki: Helsingin kaupunki, Kiinteistövirasto. Saatavilla: <https://www.hel.fi/static/kv/Geo/Julkaisut/julkaisu97.pdf>
- PÖLLÄNEN, Roy (toim.) 2003. Säteily ympäristössä. Helsinki: Säteilyturvakeskus.
- QHEAT 2020. QHeat ja NREP käynnistivät Suomen ensimmäisen geolämpölaitoksen. [Viitattu 2020-03-15]. Saatavissa: <https://www.qheat.fi/fi/qheat-ja-nrep-kaynnistivat-suomen-ensimmaisen-geolampolaitoksen/>
- SIISKONEN, Teemu (toim.) 2020. Suomalaisten keskimääräinen efektiivinen annos vuonna 2018. STUK-A263. Helsinki: Säteilyturvakeskus.
- SOSIAALI- JA TERVEYSMINISTERIÖN ASETUS IONISOIVASTA SÄTEILYSTÄ. 1044/2018. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2020-03-11]. Saatavissa: <http://finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20181044#Lidp446582416>
- ST1 2020. Geolämpö. Viitattu [2020-03-15]. Saatavissa: <https://www.st1.fi/geolampo>
- STUK (Säteilyturvakeskus) 2020. Tietoa STUKista. [Viitattu 2020-04-18]. Saatavissa: <https://www.stuk.fi/tietoa-stukista>
- SÄTEILYLAKI. 859/2018. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2020-03-11]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20180859#Lidp446612992>

SÄTEILYTURVAKESKUKSEN MÄÄRÄYS LUONNONSÄTEILYLLE ALTISTAVASTA TOIMINNASTA. STUK S/3/2019. Stuklex. [Viitattu 2020-03-11]. Saatavissa: <https://www.stuklex.fi/fi/maarays/stuk-s-3-2019>

TILASTOKESKUS 2020a. Kivihiilen kulutus väheni 25 prosenttia vuonna 2019. [Viitattu 2020-04-11]. Saatavilla: https://www.stat.fi/til/kivih/2019/12/kivih_2019_12_2020-01-30_tie_001_fi.html

TILASTOKESKUS 2020b. Energian hankinta ja kulutus. Liitekuvio 5. Energiaturpeen kulutus. [Viitattu 2020-04-11]. Saatavilla: https://www.stat.fi/til/ehk/2019/03/ehk_2019_03_2019-12-20_kuv_005_fi.html

UNEP (United Nations Environment Programme) 2016. Radiation Effects and Sources. Saatavilla: http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7790/-Radiation_Effects_and_sources-2016Radiation_-_Effects_and_Sources.pdg.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y

VALTIONEUVOSTON ASETUS IONISOIVASTA SÄTEILYSTÄ. 1034/2018. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2020-03-11]. Saatavissa:

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2018/20181034#Lidp445861088>