



# Radioaktiivsete jäätmete tekkimine Kambrium-Vendi veehaaret kasutavates veetöötlusjaamades

Keskkonnainvesteeringute Keskuse  
projekti nr.7939 lõpparuanne

Tartu Ülikooli Füüsika Instituut

Tartu Ülikooli Katsekoja tuumaspektroskoopia labor

Tartu 2015

# SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	3
1. PROJEKTI EESMÄRGID ja KIRJELDUS .....	4
2. METOODIKA KIRJELDUS .....	4
2.1. Valimi koostamine ja valim.....	4
2.2. Proovide kogumine, ettevalmistus ja analüüs.....	8
2.2.1. Tahked proovid .....	8
2.2.2. Veeproovid .....	8
2.2.3. Analüüsitavate radionukliidide Ra-226, R-228 ja Th-228 päritolu.....	9
2.3. Seadusandlus .....	10
3. TULEMUSED.....	12
3.1. Radionukliidide sisaldus filtermaterjalis .....	12
3.2. Radionukliidide kontsentratsiooni muutus aastas.....	14
3.3. Radionukliidide koguaktiivsus filtermaterjalis.....	15
3.4. Filtermaterjali analüüsitulemuste üldtabel.....	17
3.5. Veetötlusjaamade Ra-228 puhastusefektiivsus .....	17
3.6. Ra-228 ja Th-228 dünaamika .....	19
KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED .....	24
LISAD .....	27
Lisa 1. Eesti veevõrkide ülevaatlisk tabel seisuga august 2014. (Terviseamet) .....	27
Lisa 2. Projekti valimi analüüsitulemused .....	27
Lisa 3. Ettevõtete kaasamine ja teabepäev .....	27
Lisa 4. TÜ poolt väljastatud teabepäevale eelnenud pressiteade .....	27
Lisa 5. Teabepäeval esitatud ettekanne .....	27
Tänuõnad .....	27
Viited.....	27

## SISSEJUHATUS

Viimastel aastatel on selgunud, et kõrgendatud loodusliku radioaktiivsusega Kambrium-Vendi (Cm-V) põhjavee puhastamise tulemusel võib vees sisalduv radioaktiivne materjal kuhjuda suurel hulgal veetöötlusjaamadesse. See muudab jaamad töötajatele kiirgusrisiki allikaks. Nii võib joogivee tootmine muutuda seadusandluse silmis kiirgustegevuseks.

Kambrium-Vendi põhjaveekiht on väga hästi kaitstud pindmise reostuse eest, kuna asub enam kui 70-meetrise kivimite kihi all. Eestis hakati Kambrium-Vendi põhjaveekihist joogivett laialdasemalt kasutama 1950-ndatel aastatel.

Cm-V põhjavett kasutab joogiveena rohkem kui 200 000 tarbijat, kellest ligikaudu 90 protsenti<sup>[1,2]</sup> saavad kõrgema radioaktiivsusega joogivett, kui Sotsiaalministri määrus nr 82, „Joogivee kvaliteedi- ja kontrollinõuded ning analüüsimeetod“. (RTL 2001, 100, 1369) kehtestab. Samas on oluline rõhutada, et tegemist on siiski madalate kiirgusriskidega.

Cm-V põhjavee viimiseks seadusega kehtestatud kvaliteedinäitajate tasemele tuleb vett puhastada. Viimaste aastate uuringutulemused kinnitavad, et veetöötlusjaamad kasutavad peamiselt raua ja mangaani ärastamisele suunatud tehnoloogiad, mis ei suuda tagada soovituslikku radioaktiivsuse fooni joogivees. Samas võib eeldada, et ei suudeta vältida ka radioaktiivse materjali teket veetöötlusjaamades.

Käesolev aruanne kajastab uuringu tulemusi, mis hindas esmakordselt Cm-V veehaarde veetöötlusjaamades tekitatavaid madal-aktiivsete radioaktiivsete jäätmete koguseid. Uuringu eesmärgiks oli anda kvantitatiivne hinnang tekkivatele radioaktiivse materjali kogustele Cm-V veetöötlusjaamadest ning samuti karakteriseerida tekitatav radioaktiivne materjal.

Uuringu läbiviimise ajendiks oli Viimsi Vesi ASi veetöötlusjaama uuringutest 2013. a. saadud teave radioaktiivsete materjalide tekkimise kohta ning alates 2012. a. laekuma hakanud teavet uute veetöötlusjaamade rajamistest, mis on muuhulgas konstrueeritud raadiumi eemaldamiseks põhjaveest.

## 1. PROJEKTI EESMÄRGID ja KIRJELDUS

Projekti sisulised tegevused jaotati kaheks – andmete kogumine ja projekti kaasatavate veetöötusjaamade valiku tegemine kogutud andmete põhjal; proovide kogumine, mõõtmine ning tulemuste analüüs. Projekti tegevuskava on esitatud tabelis 1.

Tegevuste 1 ja 4 läbiviimisel abistas Eesti Vee-ettevõtete Liit info vahendamise ning projektis osalemisega seotud selgitustöö tegemisega vee-ettevõtete seas.

Tegevuse lühikirjeldus	Väljund/tulemus	Hinnanguline kestvus kuni	Tegelik kestvus kuni
<b>1)Radioaktiivseid jäätmeid tekitavate veetöötusjaamade kaardistamine</b>	Radioaktiivseid jäätmeid potentsiaalselt genereerivate veetöötusjaamade hulk on hinnatud, mahud on hinnatud ning on tehtud valik uurimise alla võetavatest veejaamadest	september 2014	oktoober 2014
<b>2)Jäätmemahtude hindamine</b>	Proovid on kogutud ja analüüsitud. Jäätmemahtude hulk on hinnatud.	jaanuar 2015	märts 2015
<b>3)Jäätmekäitlus-uuringute kokkuvõte, teabepäeva korraldamine</b>	Uuringutulemustest on tehtud kokkuvõte. On teavitatud huvitatud osapooli	mai 2015	mai 2015
<b>4)Aruandluse koostamine</b>	Aruandlus koostatud	mai 2015	mai 2015

Tabel 1. Projekti tegevuskava koos planeeritud ning tegeliku ajakavaga

## 2. METOODIKA KIRJELDUS

### 2.1. Valimi koostamine ja valim

Valimi aluseks on Terviseameti (TA) poolt koostatud Eesti veevõrkide ülevaatlik tabel seisuga august 2014. Tabel on esitatud lisas 1. Tabeli nimistus on 1095 veevärki, sellest 137 Cm-V või selle alamveehaarde vett töötlevad jaamad ning 21 veevärki, kus töödeldakse Cm-V ja mõne teise veehaarde seguvett. TA poolt koostatud tabel pärineb andmebaasist, mis on tekkinud järelevalve alla võetud veevõrkide lisamisega TA Vee Terviseohutuse infosüsteemi,

kust on võimalik teha väljavõte kõigist järelevalves osalevatest veevõrkidest. Andmebaasi peab Terviseamet ning selle avalik moodul on kättesaadav veebiaadressil <http://vtiav.sm.ee/>. Andmed tootmismahu ning tarbijate arvu kohta pärinevad veekäitlejatelt, andmed on TA hinnangul üldjuhul kooskõlas vastava piirkonna elanike arvuga.

Veetöötlusjaamade (VTJ) valim koostati kolme kriteeriumi alusel:

- Kambrium-Vendi või alamveehaarde tarbimine täielikult või osaliselt;
- Fe ja Mn ja/või Ra-ärastus;
- Veetarbijate ja veetoodangu hulk.

Lõplikku valimisse kuulusid 22 veetöötlusjaama, millest 18 soovisid projektis osaleda. Valim on esitatud tabelis 2. Tabelis on esitatud ka uuringu tulemuste analüüsi seisukohast olulisim tehniline info veevärgi kohta. Jämeda kirjaga välja toodud veetöötlusjaamadesse on paigaldatud raadiumi ärastussüsteem ning nimekirja lõpus on välja toodud esialgsest valimist välja jäänud veetöötlusjaamad. Antud veetöötlusjaamad jäid välja kas tehnilistel põhjustel (Strantum OÜ, proovivõtt ei osutunud tehnilistelt teostatavaks), ei soovitud projektis osaleda või juriidilistel põhjustel (proovivõtmise riskid sooviti kindlustada, milleks oleks pidanud sõlmima lepingu proovivõtja ja uuritava veekäitleja vahel. Eelarveliselt selliseid vahendeid ette näha ei osatud).

Vastavalt Terviseameti Eesti veevõrkide ülevaatlilikule tabelile on kogu Cm-V veehaaret kas täielikult või osaliselt kasutatavate veetöötlusjaamade tootlikkus ööpäevas 15 200 000 m<sup>3</sup> ning teenindavate elanike arv ca 233 000. Käesoleva projekti valimisse kuuluvate veetöötlusjaamade ööpäevane tootlikkus on 7 200 000 m<sup>3</sup> ning teenindavate elanike arv ca 116 000. Seega on projekti valimis veetöötlusjaamade ööpäevane tootlikkuse järgi 47,4% ja teenindavate elanike arvu järgi 49,8% Terviseameti poolt koostatud tabelist olevatest veetöötlusjaamadest.

Tabel 2. Projekti valim

<b>VTJ</b>	<b>Põhjaveekiht</b>	<b>Tootlikkus ööpäevas</b>	<b>Teenindavate elanike arv</b>	<b>Põhjavee puhastuse eesmärk</b>	<b>Kasutatav filtermaterjal</b>	<b>Filtermaterjali kogus [t]</b>	<b>Filtermaterjali kasutusiga [a]</b>
<b>Viimsi Vesi AS</b>	Cm-V	4 500 m <sup>3</sup>	11 000	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S, Ra	Kruus, liiv, FMH <sup>®</sup> , Zeolith <sup>®</sup>	160	2,9
Järve Biopuhastuse OÜ – Ahtme VTJ	Q+V2vr	3 000 m <sup>3</sup>	45 500	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , CH <sub>4</sub>	Dansand <sup>®</sup> nr 3, 4, 7	194	2,7
Rakvere Vesi AS	Cm-V	1 650 m <sup>3</sup>	16 000	Fe, Mn	Graniitliiv	101	14
<b>Paldiski Linnaholduse OÜ</b>	Cm-V	1 500 m <sup>3</sup>	4 150	Fe, Mn, Ra	-	56	1,3
Loo Vesi OÜ – Loo aleviku VTJ	Cm-V / O-C	700 m <sup>3</sup>	2 200	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S	Kruus, kvartslüiv, Aqua Mandix <sup>®</sup>	2,95	5,9
Kovek AS – Vanamõisa VTJ	Cm-V / O-C	445 m <sup>3</sup>	4 500	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S	Kvartslüiv, Aqua Mandix <sup>®</sup>	7,9	3,5
Tallinna Vesi AS – Toome-Õitse VTJ	Cm-V	430 m <sup>3</sup>	4 650	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S	Kvartslüiv, Aqua Mandix <sup>®</sup>	6,7	9
<b>TS Energia AS OÜ</b>	Cm-V	400 m <sup>3</sup>	0	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , CH <sub>4</sub> , Ra	Kruus A, C, nr3, Nevtraco I <sup>®</sup> , Hydrolit MN-I <sup>®</sup> , Magno- DOL <sup>®</sup>	6,2	2,6
Kunda Vesi AS	V2vr	360 m <sup>3</sup>	4 500	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S	Kvartslüiv	17	15,9
<b>Esmar Vesi OÜ</b>	Cm-V	350 m <sup>3</sup>	3 000	Fe, Mn, Ra	Kruus, kvartslüiv, Everzit N type <sup>®</sup> , Everzit Mn <sup>®</sup>	13,25	0,1
<b>Järve Biopuhastus OÜ – Püssi VTJ</b>	V2vr	270 m <sup>3</sup>	1 083	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S, Ra	kvartslüiv, kruus, Manganees Greensand Plus <sup>®</sup>	1,79	0,6
<b>VTJ</b>	<b>Põhjaveekiht</b>	<b>Tootlikkus</b>	<b>Teenindavate</b>	<b>Põhjavee puhastuse</b>	<b>Kasutatav</b>	<b>Filtermaterjali</b>	<b>Filtermaterjali</b>

		<b>ööpäevas</b>	<b>elanike arv</b>	<b>eesmärk</b>	<b>filtermaterjal</b>	<b>kogus</b>	<b>kasutusiga</b>
Tallinna Vesi AS – Raba VTJ	Cm-V	245 m <sup>3</sup>	6 000	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S	kvartslüiv, kruus	5,95	9,8
Järve Biopuhastuse OÜ – Kohtla-Nõmme VTJ	V2vr+Gdov	220 m <sup>3</sup>	1 015	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S	kvartslüiv, kruus	4,1	20,2
Tallinna Vesi AS – Jugapuu VTJ	Cm-V	200 m <sup>3</sup>	3 070	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , CH <sub>4</sub>	Kruus A, C, nr3, Nevtraco I <sup>®</sup> , Hydrolit MN-I <sup>®</sup> , Magno-DOL <sup>®</sup>	3,3	13,4
<b>Saku Maja AS – Kannikese VTJ</b>	Cm-V	150 m <sup>3</sup>	1 000	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S, Ra	kvartslüiv, Manganese Greensand Plus <sup>®</sup>	1,7	1,1
Tallinna Vesi AS – Segu VTJ	Cm-V	100 m <sup>3</sup>	1 245	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S	Kvartslüiv, Aqua Mandix <sup>®</sup>	5,6	8,1
Tallinna Vesi AS – Pika-Voolu VTJ	Cm-V	195 m <sup>3</sup>	5 900	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S	Kvartslüiv, Aqua Mandix <sup>®</sup>	6,7	9
Tallinna Vesi AS – Laagri VTJ	Cm-V	80 m <sup>3</sup>	307	Fe, Mn, H <sub>2</sub> S, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , CH <sub>4</sub>	Kruus A, C, Hydrolit Mn <sup>®</sup> , Nevtraco I <sup>®</sup>	2,8	13,9
<b>Algses valimis olnud, kuid uurimistööst välja jäänud veekäitlejad:</b>							
AS Saku Õlletehas							
Loksa Haljastus OÜ							
Keila Vesi AS							
Strantum OÜ							

## **2.2. Proovide kogumine, ettevalmistus ja analüüs**

Tahkete ja veeproovide kogumine toimus perioodil 19.11. 2014 – 27.02.2015.

### **2.2.1. Tahked proovid**

Tahkeid proove koguti kas avatud või suletud süsteemist (olenevalt veetöötlusjaamast) filtermaterjali pinnalt mitmest erinevast punktist eesmärgiga saada võimalikult täpne pinnalaotuse keskvärtus. Kuid vaid pinnaproovide võtmine ei pruugi tagada kogu filtreerimismaterjali keskmist aktiivsuse kontsentratsiooni. Kahjuks projekti maht ei võimaldanud rakendada proovivõtumetoodikat (nt. sügavusprofili määramist), millega keskvärtuse tagamine oleks täpsem. Sellise metoodika rakendamine oleks vajanud oluliselt pikemat tehnilist ettevalmistus- ja veevõrkidega kooskõlastusaega ning vajaliku tehniliste varustuse hankimist. Juba kooskõlastamine veevõrkidega on keeruline küsimus, kuna pikaajalised tööd kohapeal takistaks veevõrkide tööd oluliselt, mistõttu ei saa vabatahtlikku osalemist eeldavas uuringus tagada veevõrkide nõustumist oma ressursside rakendamisega uuringu teenistusse.

Mõõtmiste ettevalmistamiseks proovid kuivatati, hoides neid vähemalt 24 h jooksul kuivatuskapis temperatuuril 95 °C. Seejärel suleti proovid hermeetiliselt metallanumasse.

Filtermaterjali proove mõõtmiseks kasutati gamm-spektromeetrilist mõõtemetodit. Mõõtmised teostati madalafoonilisel HPGe gamm-spektromeetril BEGe BE3830-P, tootja Canberra. Gamm-spektrite analüüsiks kasutati tarkvara GammaVision-32 versiooni 6.07, tootja Ortec.

Ra-226 aktiivsuse kontsentratsioon määrati Ra-226 gammajoone 186,21 keV kaudu. Analüüsi kalibreerimiseks kasutati Tšehhi Metroloogia Instituudi sertifitseeritud standardallikat CBSS-2 (sertifikaat nr. 9031-OL-776/12).

Ra-228 aktiivsuse kontsentratsioon leiti tema tütar nukliidi Ac-228 gammajoonte 911,20 keV ja 338,32 keV põhjal, eeldades sekulaarset tasakaalu ema- ja tütar nukliidi vahel. Analüüs kalibreeriti IAEA sertifitseeritud referentsmaterjaliga IAEA/RGTh-1 (sertifikaat IAEA/RL/148).

Th-228 aktiivsuse kontsentratsioon leiti tema tütar nukliidi Pb-212 gammajoonte 238,68 keV põhjal, eeldades sekulaarset tasakaalu ema- ja tütar nukliidi vahel. Analüüs kalibreeriti IAEA sertifitseeritud referentsmaterjaliga IAEA/RGTh-1 (sertifikaat IAEA/RL/148).

### **2.2.2. Veeproovid**

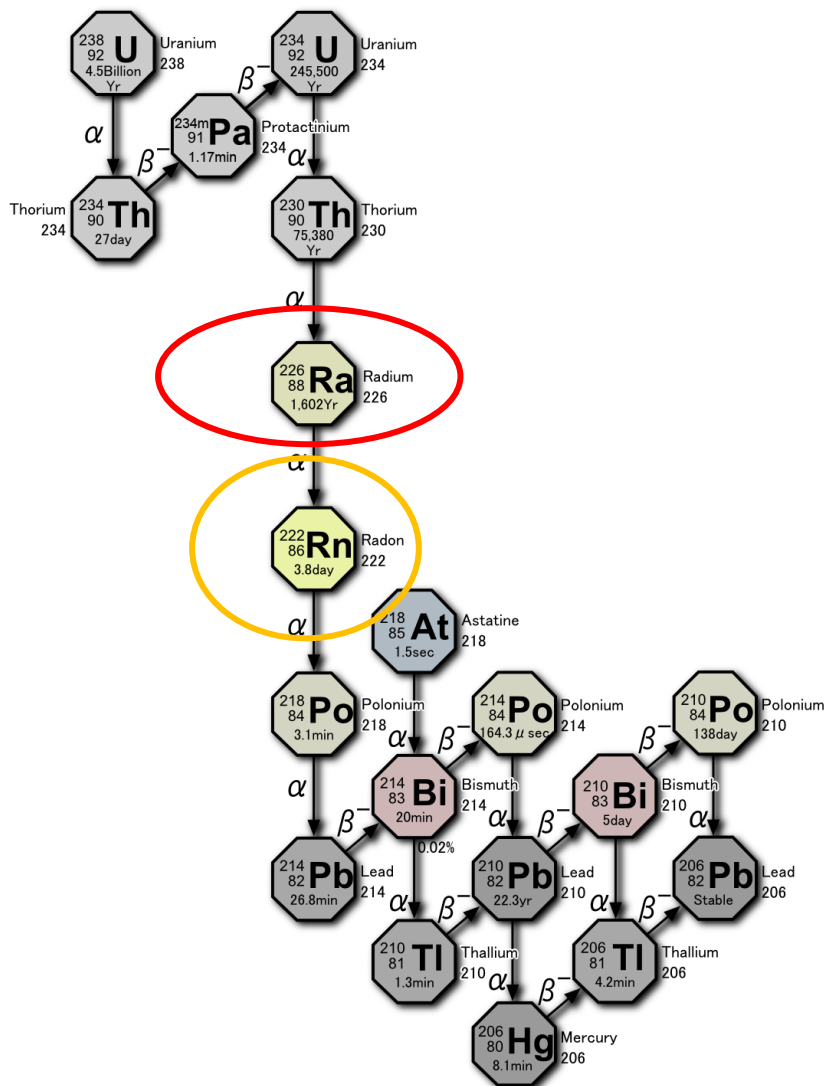
Veeproovid koguti nii toor- kui ka tarbijaveest ning valmistati ette ja analüüsiti akrediteeritud metoodikaga (M601: Raadiumi isotoopide aktiivsuse kontsentratsioonide määramine vees gamm-spektromeetrilisel mõõtemetodil). TÜ katsekoda vastab EN ISO/IEC 17025:2005



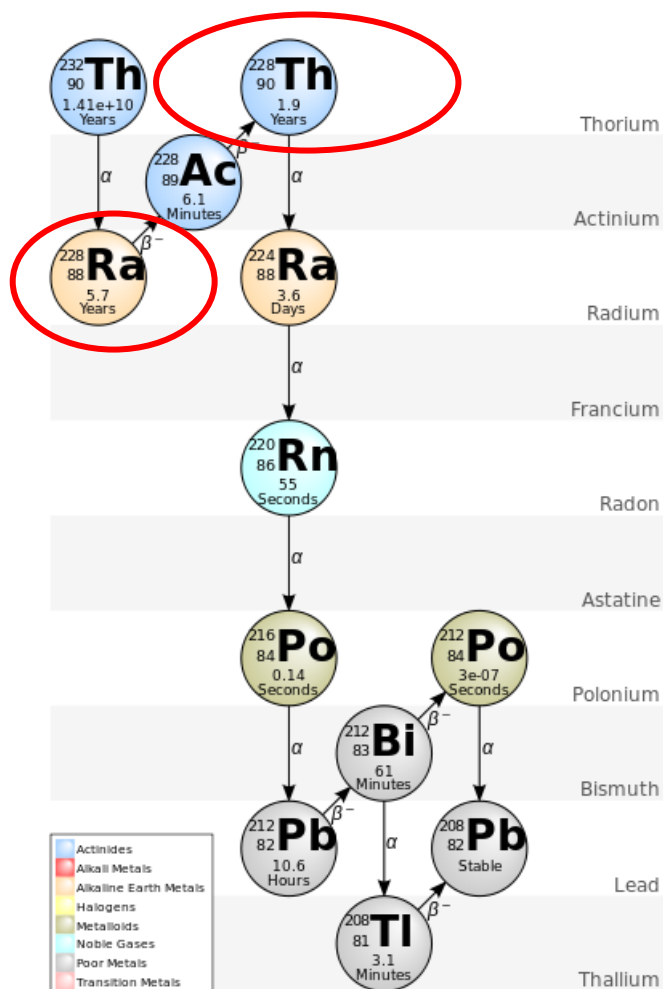
nõuetele kui katselabor keemiliste analüüside, töökeskonna mõõtmiste, meditsiiniseadmete katsetuste ja gammaspetsimeetria valdkonnas (Eesti akrediteerimiskeskuse tunnistuse nr L1511, kehtivus 02.11.2018).

### 2.2.3. Analüüsitava radionukliidide Ra-226, Rn-228 ja Th-228 päritolu

Erialakirjandusele tuginedes esinevad Ra-228 (poolestusiga 5,7 a.) ja Ra-226 (poolestusiga 1600 a.) põhjavees lahustunud katioonidena, Th-228 (poolestusiga 1,9 a.) on vees lahustumatu ning selle päritolu on VTJ-de filtermaterjalis, kohapeal Ra-228 lagunemise tulemusena genereeritud Th-228 koos teiste lühiealiste tütar nukliididega (sh. Ra-224). Ra-226 ja Ra-228 looduslik päritolu vastavalt U-238 ja Th-232 nukliidide perekondadest koos lagunemisahelatega on esitatud joonistel 1 ja 2. Kui Ra-228 lagunemisel filtrites tekib Th-228, siis Ra-226 lagunemisel tekib Rn-222, mis võib avatud filtrite korral potentsiaalselt põhjustada lisadoose VTJ töötajatele ning tuginedes viites nr. 3 nimetatud projektis saadud teabele, suurendab radooni kontsentratsiooni tarbijale edastatavas vees mõeldukal määral.



Joonis 1.  $^{238}\text{U}$  lagunemisahel. Punase sõõriga on märgitud Ra-226, kollase sõõriga Rn-222 asukoht lagunemisahelas.



Joonis 2.  $^{232}\text{Th}$  lagunemisahel. Punase sõõriga on märgitud Ra-228, Th-228 asukoht lagunemisahelas.

### 2.3. Seadusandlus

Vastavalt Vabariigi Valitsuse määrusele nr 163 (RT I 2004, 39, 265) „Väljaarvamistasemete tuletamise alused ja radionukliidide väljaarvamistasemed“ on Ra-226, Ra-228 ja Th-228 väljaarvamistasemed järgmised:

Tabel 3 Radionukliidide väljaarvamistasemed (Allikas: Riigi Teataja, 2004)

Radionukliid	Väljaarvamistase	Väljaarvamistase
Ra-226	10 000 Bq/kg	10 MBq/t
Ra-228	10 000 Bq/kg	10 MBq/t
Th-228	1 000 Bq/kg	1 MBq/t

Vastavalt Vabariigi Valitsuse määrusele nr 82 (RTL 2001, 100, 1369) „Joogivee kvaliteedi- ja

kontrollinõuded ning analüüsimeetodid“ on lubatud efektiivdoos **0,10 mSv/a.** (Riigi Teataja, 2001).

Efektiivdoosi arvutamise eeskiri on sätestatud keskkonnaministri 26.05.2005. a määrusega nr 45 „Kiirgustöötaja ja elaniku efektiivdooside seire ja hindamise kord ning radionukliidide sissevõetust põhjustatud dooside doosikoefitsentide ning kiirgus- ja koefaktori väärtused“ lisa 4 esitatud doosikoefitsentide ning vee aastase sissevõetud koguse põhjal (täiskasvanute puhul 730 l).

### **3. TULEMUSED**

#### **3.1. Radionukliidide sisaldus filtermaterjalis**

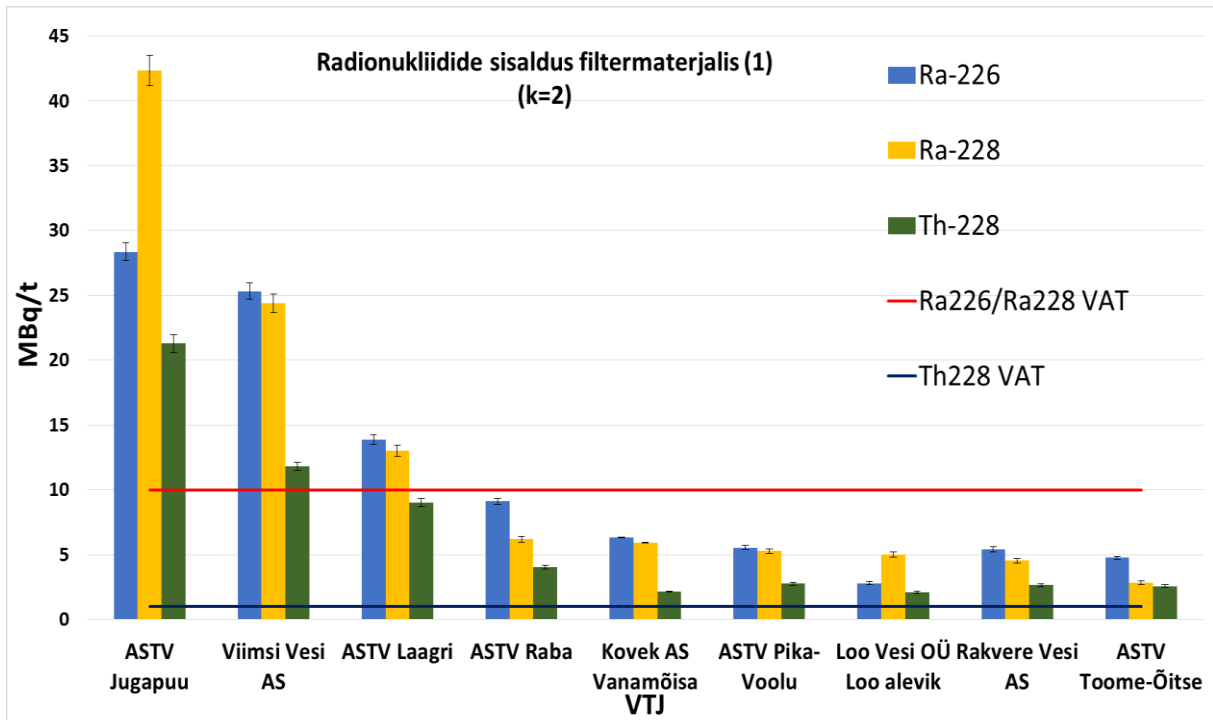
Joonisel 3 ja 4 on esitatud radionukliidide aktiivsuse kontsentratsioonid filtermaterjalis. Joonisel 3 on esitatud kõrgema aktiivsuse kontsentratsiooniga grupi proovide tulemused (kuni 45 MBq/t) ning joonisel 4 on esitatud madalama eriaktiivsusega grupi proovide tulemused (kuni 5 MBq/t). Samuti on joonistel esitatud pideva joonena kõigi kolme radionukliidi väljaarvamistasemed. Tabel kõikide proovide analüüsitulemustega on esitatud lisas 2.

Ra-226 ja Ra-228 mõõtmistulemustest väljaarvamistasemeid ületavad 3 veetöötlusjaama ehk 16,6(6)% koguvalemist:

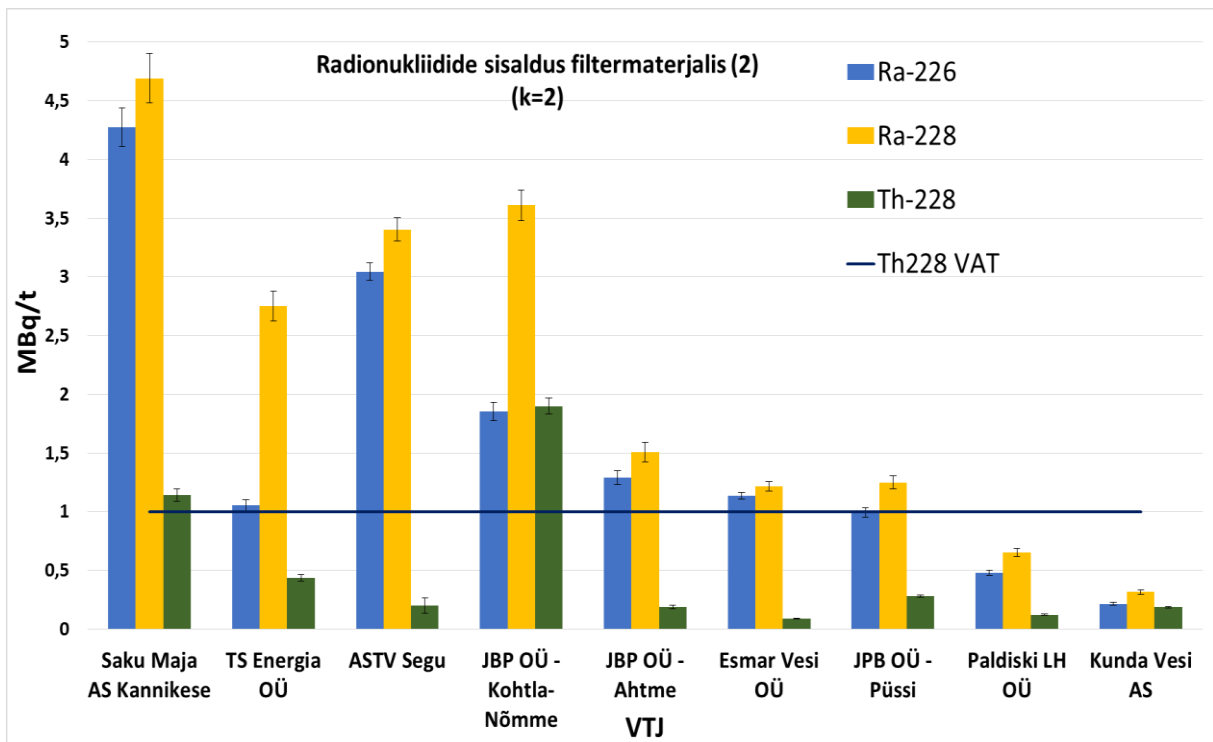
- Jugapuu (AS Tallinna Vesi);
- Viimsi Vesi AS;
- Laagri (AS Tallinna Vesi).

Th-228 väljaarvamistasemeid ületavad 11 veetöötlusjaama ehk 61,1(1)% koguvalemist:

- Jugapuu (AS Tallinna Vesi);
- Viimsi Vesi AS;
- Laagri (AS Tallinna Vesi);
- Raba (AS Tallinna Vesi);
- Vanamõisa (AS Kovek);
- Pika-Voolu (AS Tallinna-Vesi);
- Loo aleviku VTJ (OÜ Loo Vesi);
- Rakvere Vesi AS;
- Toome-Õitse (AS Tallinna Vesi);
- Kannikese (AS Saku Maja);
- Kohtla-Nõmme (OÜ Järve Biopuhastus).



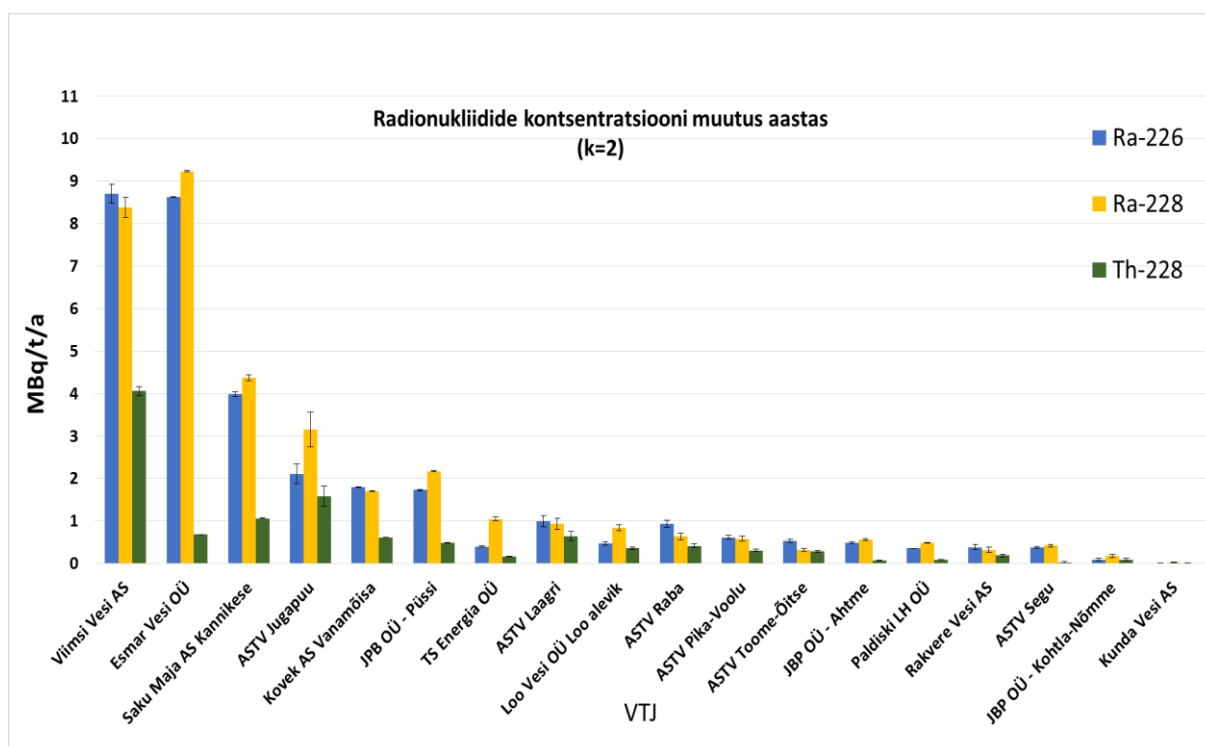
Joonis 3 Radionukliidide sisaldus filtermaterjalis (1). Esitatud väärtuste mõõtemääramatused on esitatud katteteguriga  $K=2$ , s.t. tõeline väärtus asub antud väärtuste vahemikus 95 % tõenäosusega. Kiirgusseaduse kohaselt defineeritud väljaarvamistase (joonisel märgitud lühendine VAT) on esitatud pidevjoonena. Mõõtetulemuste referentskuupäevaks on proovivõtukuupäev (vt. lisa 2)



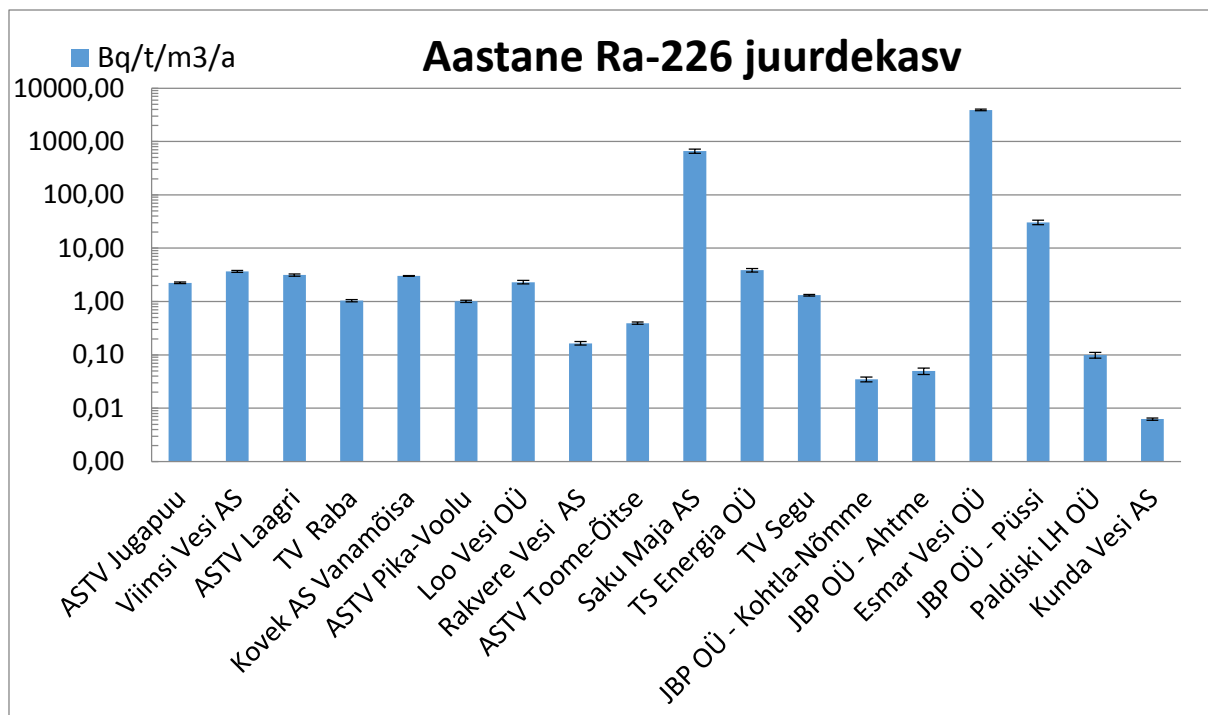
Joonis 4 Radionukliidide sisaldus filtermaterjalis (2). Esitatud väärtuste mõõtemääramatused on esitatud katteteguriga  $K=2$ , s.t. tõeline väärtus asub antud väärtuste vahemikus 95 % tõenäosusega. Kiirgusseaduse kohaselt defineeritud väljaarvamistase (joonisel märgitud lühendine VAT) on esitatud pidevjoonena. Mõõtetulemuste referentskuupäevaks on proovivõtukuupäev (vt. lisa 2)

### 3.2. Radionukliidide kontsentratsiooni muutus aastas

Joonisel 5 on esitatud radionukliidide kontsentratsiooni muutus aastas. Selle leidmiseks jagati veetöötlusjaama filtermaterjali aktiivsuse kontsentratsioon (mõõtetulemuste referentskuupäevaks on proovivõtukuupäev (vt. lisa 2)) filtermaterjali kasutusajaga. Täpsed numbrilised väärtused on leitavad lisa 2 esitatud analüüsitulemuste tabelis.



Joonis 5 Radionukliidide kontsentratsiooni muutus aastas filtreerimismaterjalid ühiku kohta. Esitatud väärtuste mõõtemääramatused on esitatud katteteguriga  $K=2$ , s.t. tõeline väärtus asub antud väärtuste vahemikus 95 % tõenäosusega. Mõõtetulemuste referentskuupäevaks on proovivõtukuupäev (vt. lisa 2)



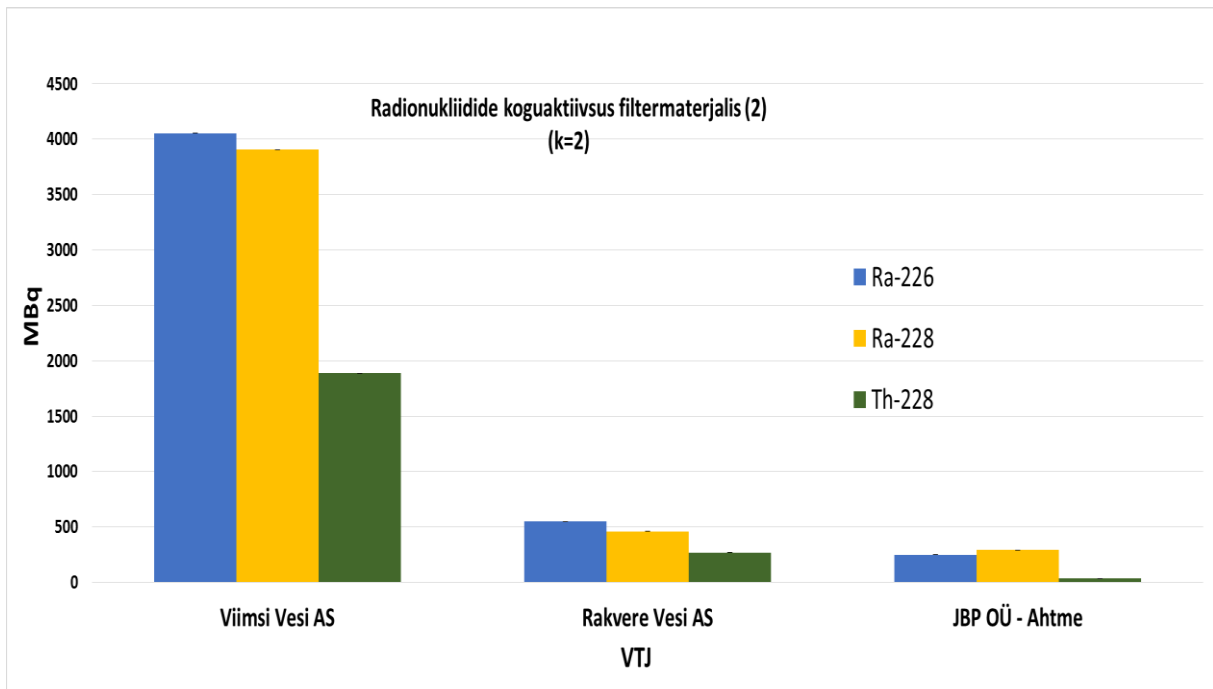
Joonis 6 Aastane Ra-226 juurdekasv veetöötusjaamades aastas filtreerimismaterjalid ühiku ja toodetava veekoguse ühiku kohta [Bq/t/m<sup>3</sup>/a]. Esitatud väärtuste mõõtemääramused on esitatud katteteguriga K=2, s.t. tõeline väärtus asub antud väärtuste vahemikus 95 % tõenäosusega. Mõõtetulemuste referentskuupäevaks on proovivõtukuupäev (vt. lisa 2)

Joonisel 6 esitatud veevõrkide Ra-226 aastased juurdekasvud väljendavad, millises suhtes on toorvee Ra-226 kontsentratsioon, jaama puhastusvõime ning filtreerimismaterjali koguse suhe vee tootmismahutu. Iga toodetud vee kuupmeetri kohta kontsentreeritakse Ra-226 filtreerimismaterjalis Esmar Vesi OÜ ja Saku Maja ASi VTJ-des mitme suurusjärgu võrra kiiremini võrreldes teise veetöötusjaamadega, sh. Viimsi Vesi AS-ga. Tulemused viitavad võimalusele reguleerida kontsentreerumiskiirust, muutes filtreerimismaterjali kogust. Siiski saab kontsentreerumiskiirust või materjali absoluutkoguseid mõjutada teineteise arvelt.

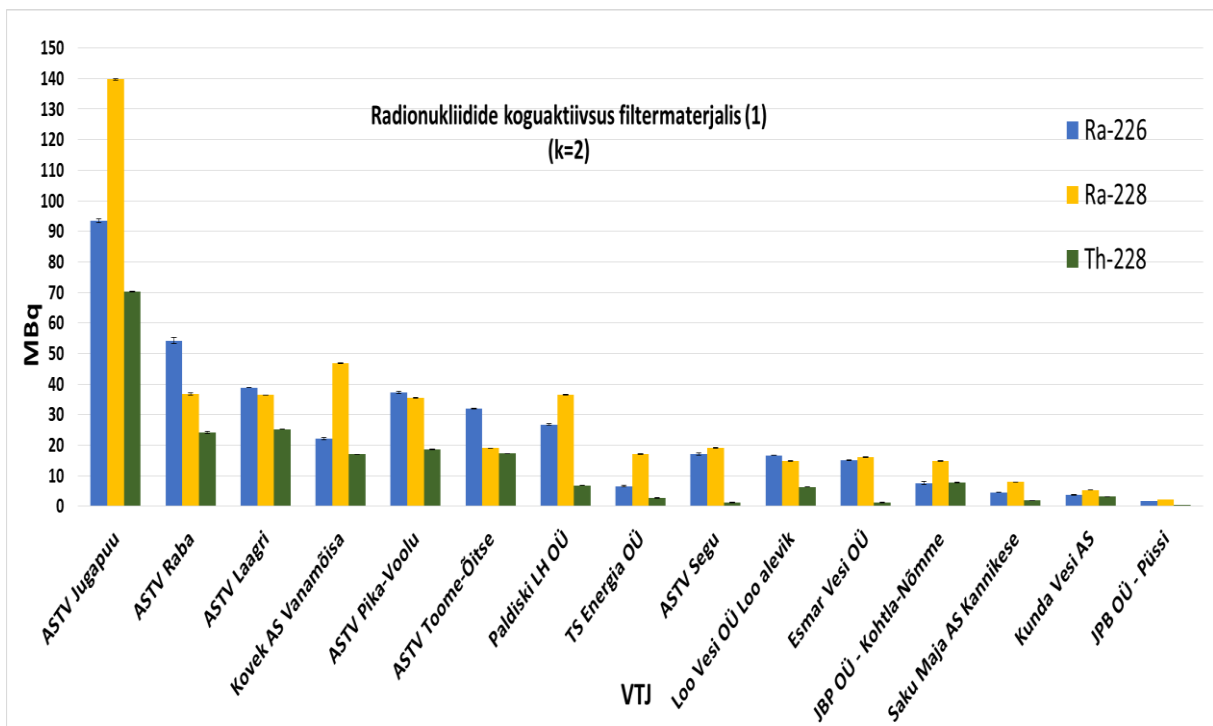
### 3.3. Radionukliidide koguaktiivsus filtermaterjalis

Joonisel 7 ja 8 on esitatud radionukliidide koguaktiivsused filtermaterjalis. Joonisel 7 on esindatud 3 kõrgema koguaktiivsusega filtermaterjali (kuni 4500 MBq) ning joonisel 8 on esitatud madalama koguaktiivsusega filtermaterjalid (kuni 150 MBq). Tulemused on arvutatud lisa 2 tabelis esitatud VTJ'de filtreerimismaterjali masside ja pinnaproovist mõõdetud aktiivsuse kontsentratsiooni korrutisena. Tuginedes varasemale kogemusele Viimsi Vesi ASi VTJ'des saadud uuringutulemustele (avaldamata tulemused<sup>[3]</sup>) ning teades, et filtrimaterjali läbimine on puhastatava vee poolt ühesuunaline, võib eeldada, et filtrimaterjalis võib tekkida puhastatava elemendi kontsentratsioonide sügavusjaotus filtrisambas. Seetõttu võib kasutatav koguaktiivsuste meetodika suure tõenäosusega ülehinnata leitud

koguaktiivsusi. Peatükis 2.2.1 nimetatud põhjustel ei olnud võimalik teisi meetodikaid kasutada.



Joonis 7 Radionukliidide koguaktiivsus filtermaterjalis (1/2). Mõõtemääramatused on esitatud katteteguriga  $K=2$ , s.t. tõeline väärtus asub antud väärtuste vahemikus 95 % tõenäosusega. Mõõdetulemuste referentskuupäevaks on proovivõtukuupäev (vt. lisa 2)



Joonis 8 Radionukliidide koguaktiivsus filtermaterjalis (2/2). Mõõtemääramatused on esitatud katteteguriga  $K=2$ , s.t. tõeline väärtus asub antud väärtuste vahemikus 95 % tõenäosusega. Mõõdetulemuste referentskuupäevaks on proovivõtukuupäev (vt. lisa 2).



### 3.4. Filtermaterjali analüüsitulemuste üldtabel

Tabelis 4 on esitatud radionukliidide kontsentratsioonid filtermaterjalis ning tabelis 5 radionukliidide kontsentratsiooni muutus aastas. Mõlemas tabelis on välja toodud valimi keskvärtus, standardhälve ning miinimum- ja maksimumvärtus. Esitatud numbrid illustreerivad selgelt, kui heterogeenne on valikus olnud veetöötusjaamade olukord raadiumi akumulereerumise osas.

Tabel 4. Radionukliidide kontsentratsioonid filtermaterjalis – üldtabel [MBq/t]. Mõõtetulemuste referentsajaks on periood nov.2014-veebr.2015.

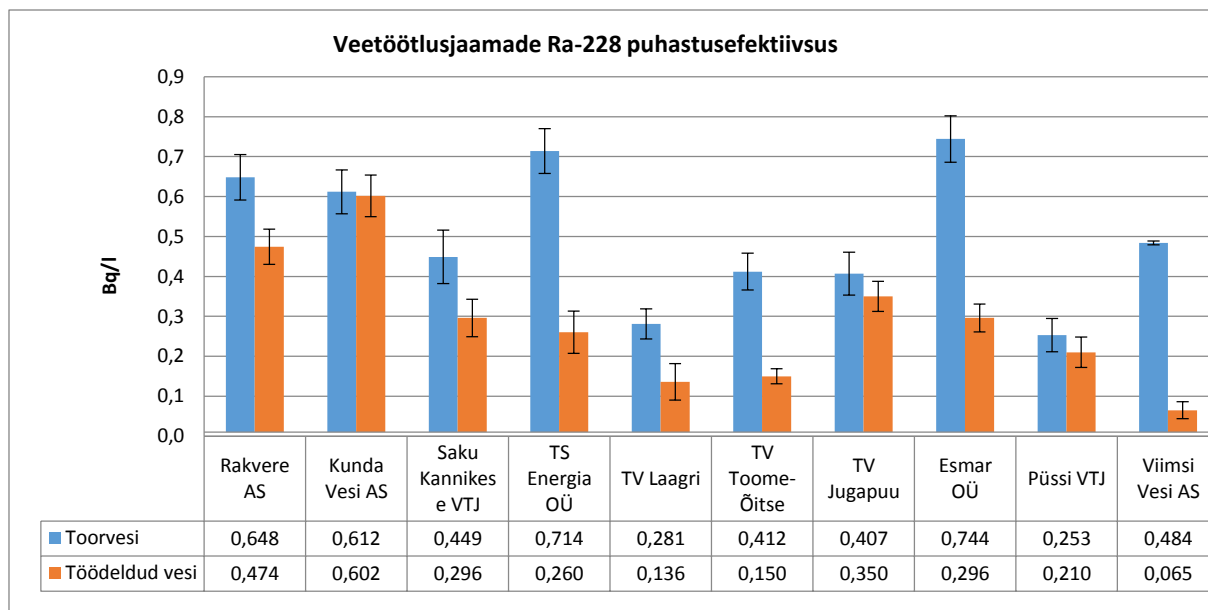
	<b>Ra-226</b>	<b>Ra-228</b>	<b>Th-228</b>
KESKMINE	6,44	7,16	3,50
STANDARDHÄLVE	8,19	10,43	5,45
MIN	0,21	0,32	0,09
MAX	28,3	42,3	21,2

Tabel 5. Radionukliidide kontsentratsiooni muutus aastas – üldtabel [MBq/t/a]. Mõõtetulemuste referentsajaks on periood nov.2014-veebr.2015.

	<b>Ra-226</b>	<b>Ra-228</b>	<b>Th-228</b>
KESKMINE	1,81	1,96	0,62
STANDARDHÄLVE	2,67	2,73	0,95
MIN	0,01	0,02	0,01
MAX	8,71	9,23	4,06

### 3.5. Veetöötusjaamade Ra-228 puhastusefektiivsus

Veetöötusjaama toor- ja tarbijavett analüüsiti 10 veetöötusjaama puhul eesmärgiga leida jaama puhastusefektiivsus Ra-228 suhtes. Veetöötusjaamadest kogutud veeproovid võimaldavad määrata, kui suur on eri VTJ'de Ra-iostoopide puhastusefektiivsus ning arvutada Ra-226 ja Ra-228 akumulereerumiskiirust, eeldades VTJ-de stabiilset toimimist filtermaterjali tööea kestel. Veevõrkide toorvee ja tarbijavee aktiivsuse kontsentratsioonid perioodil november 2014-veebruar 2015 on esitatud joonisel 9. Tabelis 6 on esitatud veetöötusjaama puhastusefektiivsused.



Joonis 9. Veevõrkide toorvee ja tarbijavee aktiivsuse kontsentratsioonid perioodil nov.2014-veebr.2015. Esitatud väärtuste mõõtemääramatused on esitatud katteteguriga  $K=2$ , s.t. tõeline väärtus asub antud väärtuste vahemikus 95 % tõenäosusega.

Suurim tuvastatud puhastusefektiivsus on leitud Viimsi Vesi AS VTJ korral, ka Esmar OÜ ja TS Energia OÜ ja Tallinna Vesi Toome-Õitse VTJ'd efektiivsused on üsna kõrged. TS Energia OÜ veetöötlus toimub teadaolevalt kahe paralleelse töötusliiniga – filtreerimine ning pöördosmoos. Tahkete proovide põhjal arvatud Ra-228 akumulatsiooniskiirus ning veepuhastusefektiivsuse tulemuste põhjal arvatud potentsiaalne akumulatsioonifiltris erinevad suurusjärgu võrra, millest võib järeldada, et raadiumi puhastamine toimub TS Energia OÜ VTJ-s peamiselt pöördosmoosiga.

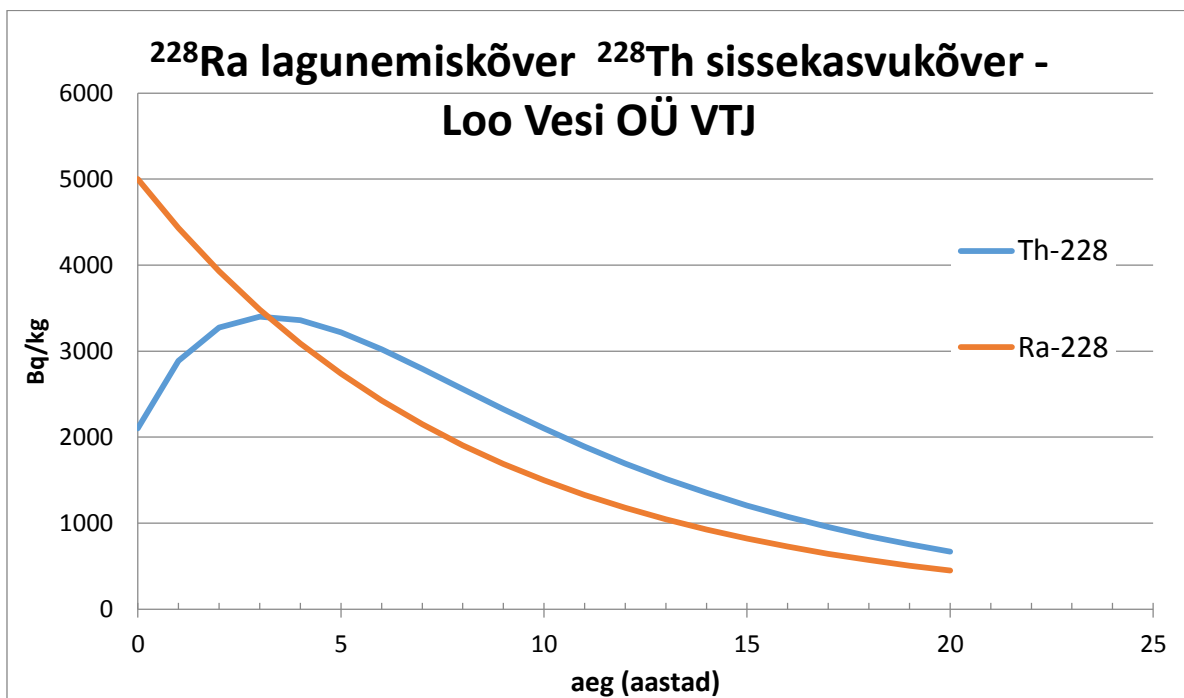
Tabelis esitatud puhastusefektiivsused varieeruvad suures ulatuses, uuritud jaamadest vaid AS Tallinna Vesi Laagri VTJ suudab alandada raadiumi kontsentratsioone, millele vastav oodatav efektiivdoos on ca 0,1 mSv/a. Suurim oodatav efektiivdoos valimis on Kunda Vesi AS VTJ-s ja Rakvere Vesi AS VTJ-s, kus vastavaks oodatava efektiivdoosi väärtuseks on ca 0,35 - 0,40 mSv/a. Oodatav efektiivdoos on arvatud Ra-226 ja Ra-228 baasil ja eeldusel, et toorvee Ra-226/Ra-228 suhe on võrdne filtermaterjalisisel määratud isotoopide suhtega.

Tabel 6 VTJ'de Ra-228 puhastusefektiivsused. Punases kirjas VTJ'd on konstrueeritud muuhulgas ka raadiumi eemaldamiseks.

VTJ	efektiivsus %	VTJ	efektiivsus %
Rakvere AS	27±3	TV Toome-Õitse	64±3
Kunda Vesi AS	0	TV Jugapuu	14±3
<b>Saku Kannikese VTJ</b>	<b>34±3</b>	<b>Esmar OÜ</b>	<b>60±3</b>
<b>TS Energia OÜ</b>	<b>64±3</b>	<b>Püssi VTJ</b>	<b>17±3</b>
TV Laagri	52±3	<b>Viimsi Vesi AS</b>	<b>87±7</b>

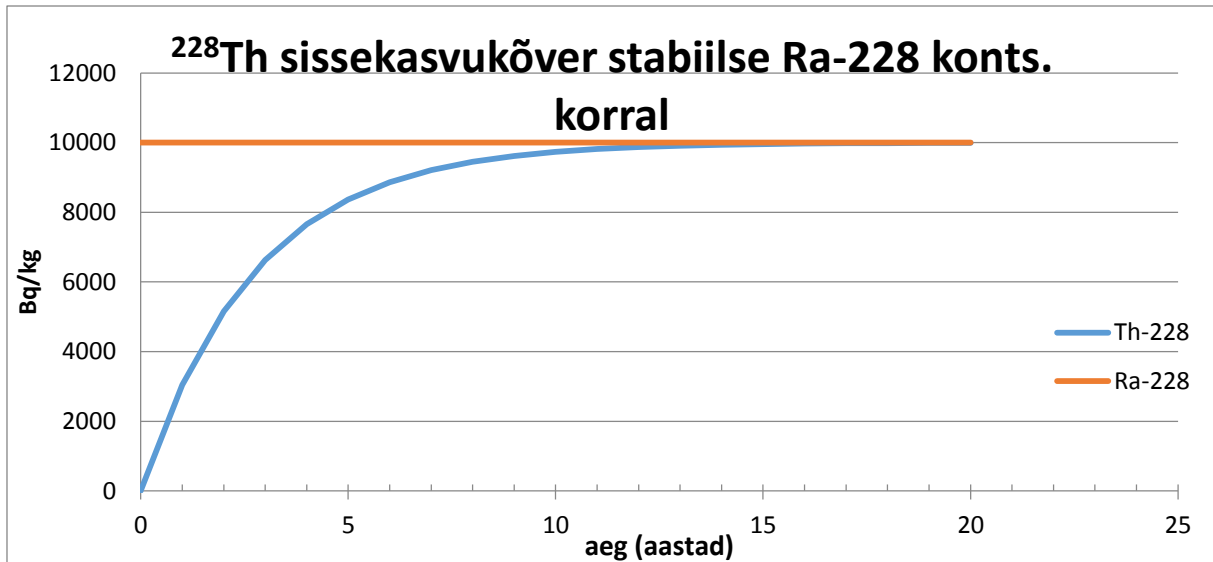
### 3.6. Ra-228 ja Th-228 dünaamika

Joonisel 3 ja 4 esitatud tulemused näitavad, et põhiliseks probleemiks, miks täidisfiltermaterjal klassifitseerib radioaktiivseks materjaliks, on Th-228 aktiivsuse kontsentratsioonid. Seepärast peaksime lähemalt vaatama Th-228 teket ja dünaamikat. Joonis 10 esitab teoreetilise Th-228 sissekasvukõvera (eeldame, et nii Ra-228 kui Th-228 on uuritavas materjalis immobiilsed) juhul, kui ajahetkel  $t=0$  on Ra-228 aktiivsuse kontsentratsioon 5 kBq/kg ning Ra-228 edasist akumulereerumist ei toimu. Th-228 kontsentratsioon ajahetkel  $t=0$  on 2,1 kBq/kg. Joonis 11 esitab teoreetilise Th-228 sissekasvukõvera (eeldame, et nii Ra-228 kui Th-228 on uuritavas materjalis immobiilsed) juhul, kui ajahetkel  $t=0$  on Ra-228 aktiivsuse kontsentratsioon 10 kBq/kg ning Ra-228 kontsentratsioon säilib konstantsena kogu uuritava perioodi jooksul. Th-228 kontsentratsioon ajahetkel  $t=0$  on 0 kBq/kg. Joonis esitab teoreetilist olukorda, kui kiiresti kasvab filtrisse Th-228 kontsentratsioonini, mis on võrreldav Ra-228 omaga. Th-228 sissekasv ning sekulaarne tasakaal Ra-228 ja Th-228 vahel saavutatakse ca kuue Th-228 poolestusaja ( $t_{1/2} = 1,8$  a) jooksul.

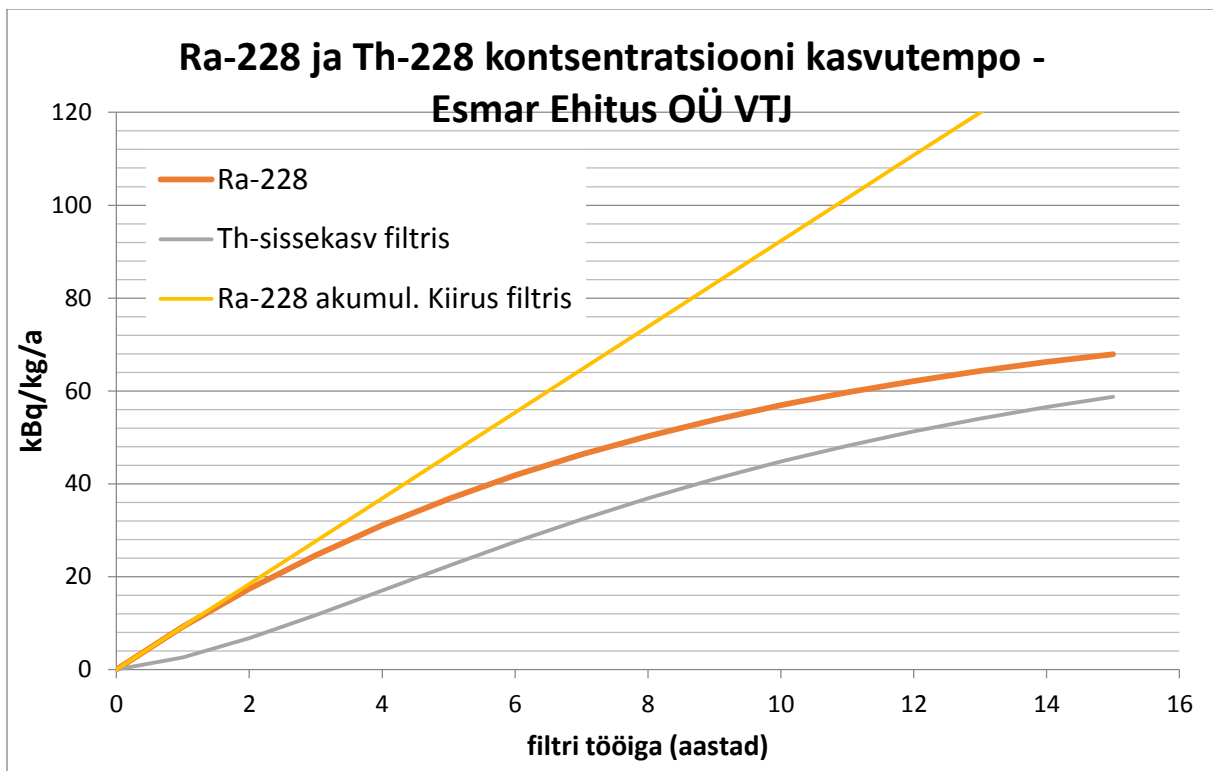


Joonis 10. Ra-228 lagunemis- ning Th-228 sissekasvu ja lagunemiskõver pärast kasutamise lõpetamist Loo Vesi OÜ VTJ näite põhjal.

Joonisel 10 esitatud Ra-228 ja Th-228 väärtused on esitatud Loo Vesi OÜ VTJi näitel. Seega, juhul, kui muud protsessid kontsentratsioone ei mõjutaks, langeks Th-228 aktiivsuse kontsentratsiooni väärtused lagunemisprotsessi tulemusena allapoole väljaarvamistaset ca 16-17 aastat pärast filtermaterjali kasutuse lõpetamist. Seda võib vaadelda, kui üht jäätmekäitlusstsenariumit, kus pikaajalise ladustamisaja möödudes materjal vabastatakse.



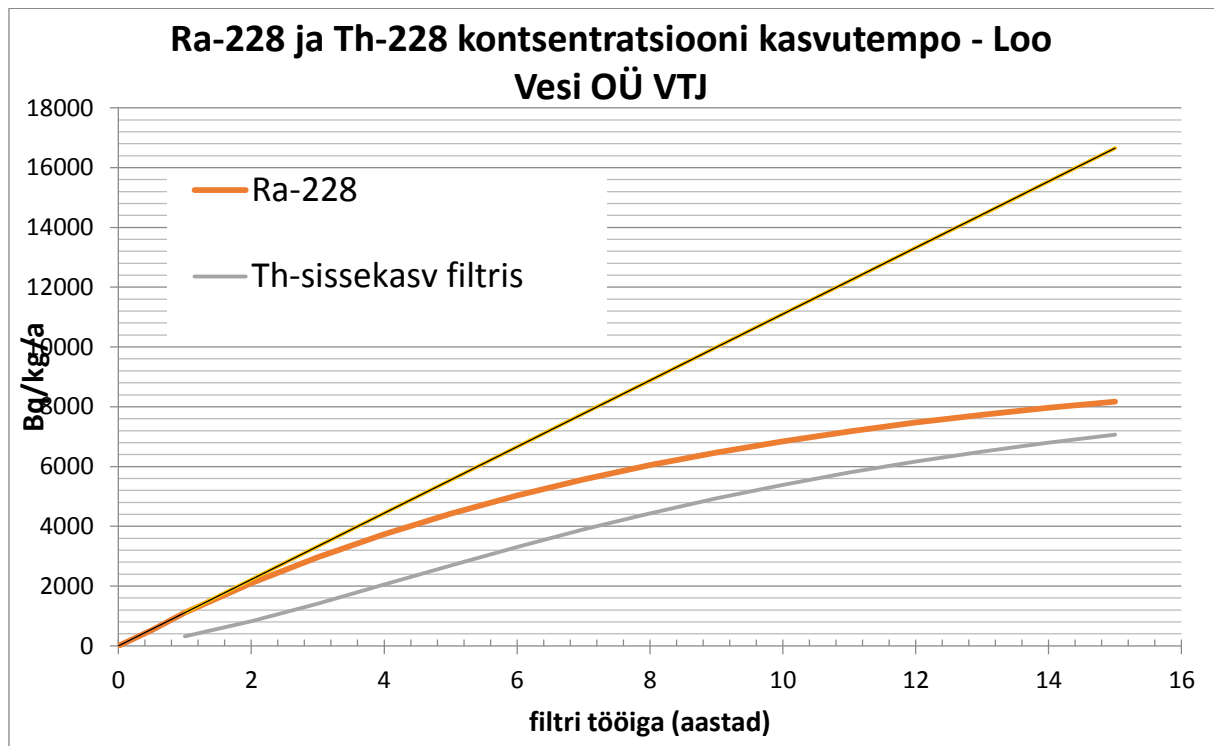
Joonis 11. Stabiilne Ra-228 aktiivsuse kontsentratsioon ning Th-228 teoreetiline sissekasvukõver.



Joonis 12. Esmar Ehitus OÜ VTJ näitel, kuidas muutuvad aja jooksul Ra-228 (joonisel tähistatud punase joonega) ja Th-228 aktiivsuse kontsentratsioonid (joonisel tähistatud lilla joonega), mis võtab arvesse iga-aastast, stabiilset, Ra-228 akumulatsioonikiirust (joonisel tähistatud kollase joonega) ja Ra-228 lagunemist ning Th-228 sissekasvu ja lagunemist.

Joonisel 12 on esitatud Esmar Ehitus OÜ VTJ näitel, kuidas muutuvad aja jooksul Ra-228 (joonisel tähistatud punase joonega) ja Th-228 aktiivsuse kontsentratsioonid (joonisel tähistatud lilla joonega), mis võtab arvesse iga-aastast, stabiilset, Ra-228 akumulatsioonikiirust (joonisel tähistatud kollase joonega) ja Ra-228 lagunemist ning Th-228

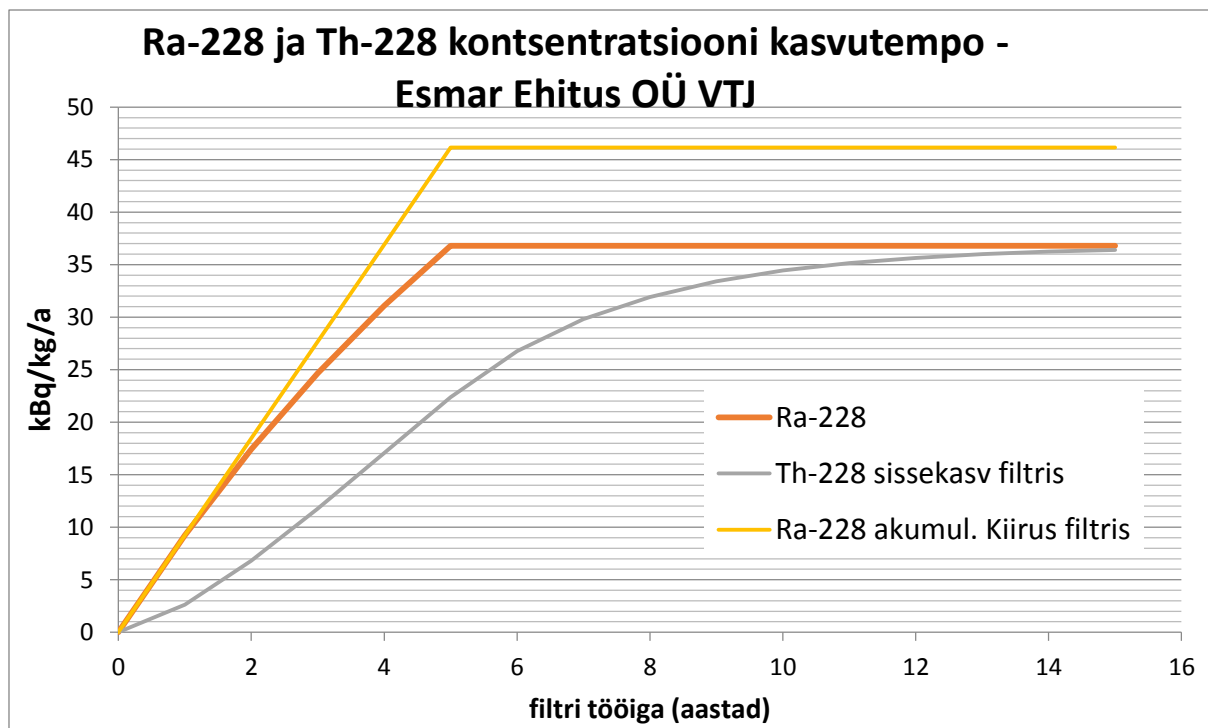
sissekasvu ja lagunemist. Mõõdetud ja teoreetilise Th-228/Ra-228 võrdluse põhjal on võimalik hinnata, kas Ra-228 akumulatsioon on olnud stabiilne või võib toimuda ka Ra-228 või Th-228 desorptsiooni- ja ja/või migratsioon. Kuna muutujaid on vähemalt kolm, siis vajaks analüüs lisateabe kogumist filtrite kohta.



Joonis 13. Loo Vesi OÜ VTJ näitel on arvatud Ra-228 või Th-228 kontsentratsioonide sissekasvude põhjal, milline peaks olema filtri Th-228 kontsentratsioon ja Ra-228/Th-228 suhe pärast 5,9 aastat.

Joonisel 13 esitatud juhtum Loo Vesi OÜ VTJ näitel on arvatud Ra-228 või Th-228 kontsentratsioonide sissekasvude põhjal, milline peaks olema filtri Th-228 kontsentratsioon ja Ra-228/Th-228 suhe pärast 5,9 aastat. Mõõdetud Th-228 väärtuse (2120 Bq/kg, esitatud lisas 2) ja teoreetilise väärtuse (3300 Bq/kg) erinevus on selgelt üle mõõte- ja arvutusmääramatuste ning viitab sellele, et kas Ra-228 või Th-228 on filtris mobiilne.

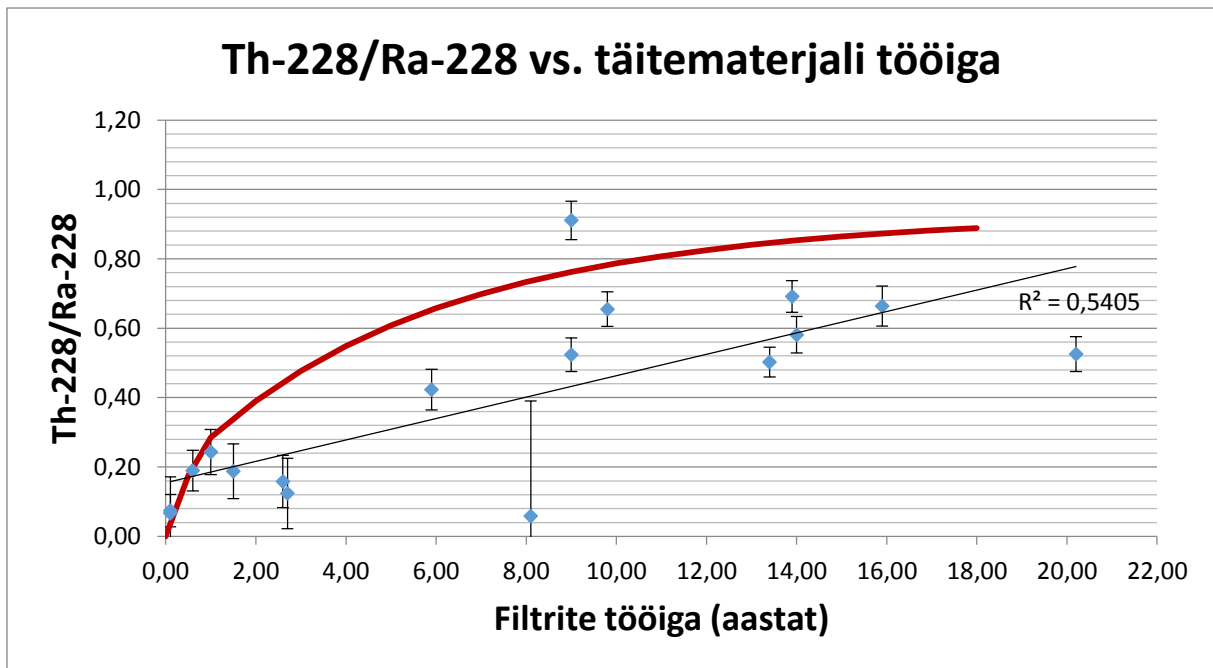
Joonisel 14 on esitatud Esmar Ehitus OÜ VTJ näitel, mis juhtub, kui filter on küllastunud Ra-228 suhtes, kontsentratsioon alates ca 5 tööea aastast ei muutu ning kuidas muutub sellisel juhul Th-228 aktiivsuse kontsentratsioon sissekasvamise tõttu.



Joonis 14. Ra-228 ja Th-228 kontsentratsioonide dünaamika Esmar Ehitus OÜ VTJ näitel, kus filter on pärast 5 a pikkust tööiga küllastunud ning Ra-228 kontsentratsioon jääb sellest hetkest muutumatuks.

Joonisel 15 on esitatud Th-228/Ra-228 aktiivsuse kontsentratsioonide suhte ja eri uuringus vaatluse all olnud VTJ-de filtretäidismaterjalide kasutusea korrelatsioon. Üldnimetatud põhjustel ei ole tegemist kindlasti lineaarse korrelatsiooniga ning kuna valimis olevate filtrite materjalid on erinevad (mitmetes VTJ-des siiski kas samad, või sama tüüpi materjal) on põhjust arvata, et ka adsorptsiooni/desorptsiooniprotsessid on neis erinevad. Teoreetiline Th-228/Ra-228 ja filtri tööea korrelatsioonikõver on esitatud joonisel punase joonega. Mõõdetud Th/Ra suhteväärtused on suurema tööea korral valdavalt madalamad, mis viitab sellele, et valdavalt võib filtrites osa Th-228 olla immobiilne. Selleks, et Th-228 immobiilsust kontrollida ning teha kindlaks, ega osa Th-228 välju tarbijatele suunatud vette (st. jaama töötlusprotsessid täiendavad oodatavat efektiivdoosi, lisades looduslikult eksisteerivatele Ra-isotoopidele juurde Th-228), vajaksime Th-228 lisamõõtmisi nii uhte- kui tarbijate veest. Tuginedes viites 3 mainitud projektile, võib jaama poolt emiteeritav Th-228 olla tarbijavees tuvastatav, kuid senised mõõtmised kinnitavad, et võrreldes Ra-isotoopidega on selle roll vähemalt Viimsi Vesi ASi VTJ-s esimestel aastatel tagasihoidlik.

Juhul kui Ra-228 akumulatsioon on ajas lineaarne, ning filtermaterjalide adsorptsiooni, desorptsioonikoefitsendid Ra-228 ja Th-228 radionukliididele on teada, oleks võimalik arvutada filtermaterjali kasutusiga Ra-228 ja Th-228 mõõtmiste kaudu suure täpsusega.



Joonis 15 Th-228/Ra-228 aktiivsuse kontsentratsioonide suhte ja eri uuringus vaatluse all olnud VTJ-de filtretäidismaterjalide kasutusea korrelatsioon. Esitatud mõõtmistel tuginevad eri VTJ-de suhteväärtuste mõõtemääramatused on esitatud katteteguriga  $K=2$ , s.t. tõeline väärtus asub antud väärtuste vahemikus 95 % tõenäosusega. Esitatud on korrelatsiooni lineaarsuse eeldusel põhinev korralatsioonitegur ja teoreetiline Th-228/Ra-228 suhte korrelatsioonikõver (tähistatud punase joonega).

## KOKKUVÕTE JA JÄRELDUSED

18 veevärki hõlmavas uuringus mõõdeti filtreerimismaterjalide aktiivsuse kontsentratsioonid radionukliididele Ra-226, Ra-228 ja Th-228 ja hinnati tekkiva radioaktiivse materjali absoluutkoguseid. **Uuringu valimi suuruseks saadi veevõrkide hulk, mille ööpäevane tootlikkus ulatus 47,4% ja teenindavate elanike arv 49,8% kogu Cm-V või Cm-V ja mõne teise veehaarde seguvett kasutavate veevõrkide koguhulgast.** Töös leiti, et kiirgusseaduses defineeritud väljaarvamistaset ületavad (seisuga 2015 a. jaanuar) 11 veevärki 18-st:

- a) Ra-226 – TV Laagri, TV Jugapuu, Viimsi
- b) Ra-228 - TV Laagri, TV Jugapuu, Viimsi
- c) Th-228 – 11 tk (TV Laagri, TV Jugapuu, Viimsi, Saku Kannikese, Loo vesi, Rakvere, TV Õitse-Toome, TV Pika-Voolu, TV Raba, Kovek As, Järve Biopuhastus Kohtle-Nõmme vtj.)

Kui eeldada veetöötusjaamade veetöötusprotsessi pikaajalist stabiilsust uuritud filtreerimismaterjali tööea jooksul, saab arvutada iga-aastaselt lisanduvad radioaktiivse materjali absoluutkogused (vt. joonis 16):

- a) Ra-226 – 1900 MBq/a
- b) Ra-228 – 1700 MBq/a
- c) Th-228 – 700 MBq/a

Joonisel 16 ja 17 esitatud tulemuste põhjal on selge, et tekkiva materjali osas domineerib Viimsi Vesi ASi veevärk andes 1900 MBq (Ra-226) aastasest juurdekasvust peaaegu 75% (1400 MBq/a). Absoluutkoguste poolest domineerivad suuremad veetöötledjad Viimsi Vesi AS, Järve Biopuhastuse OÜ Ahtme veetöötusjaam ning Rakvere vesi AS. Neist Ahtme veetöötusjaama võib käesoleval hetkel radioaktiivsete jäätmete absoluutkoguste arvutamisest välja jätta, kuna väljaarvamistaset lähiajal ei Th-228 ega raadiumi isotoopide jaoks ei ületata. Tuginedes joonisel 17 esitatud tulemustele, **võib prognoosida, et väljaarvamistaset ületavate veevõrkide „klubisse“ lisanduvad lähema 12 kuu jooksul Esmar Ehitus OÜ ja Järve Biopuhastuse OÜ Püssi veetöötusjaamad. Seega, uuritavast 18 VTJst 13 on sisuliselt radioaktiivse materjali tootmise suhtes probleemsed.**

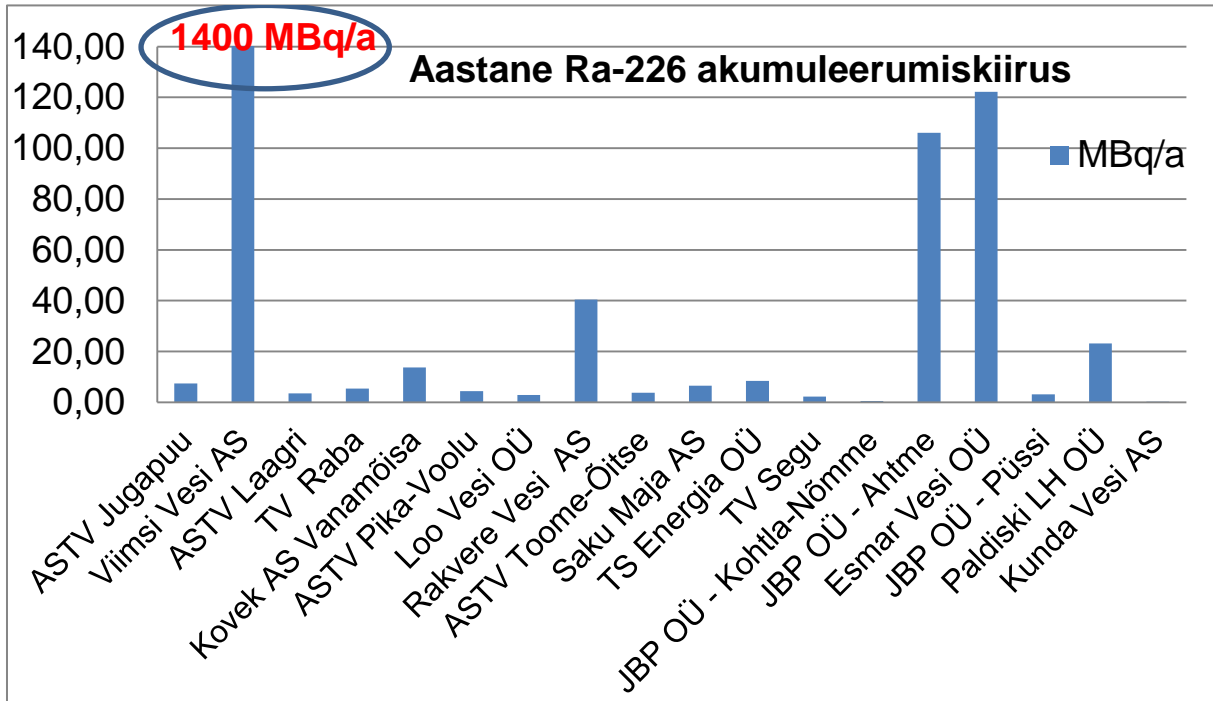
Radioaktiivsete jäätmete koguseid arvutades võime nimetatud väärtustest maha lahutada VTJ'd, mille kontsentratsioonid jäävad hetkel ja lähiaastatel allapoole väljaarvamistaset. Sellisel juhul on iga-aastaselt lisanduvad raadiumi ja tooriumi kogused radioaktiivses materjalis järgmised:

- a) **Ra-226 – 1780 MBq/a**
- b) **Ra-228 – 1550 MBq/a**
- c) **Th-228 – 700 MBq/a**

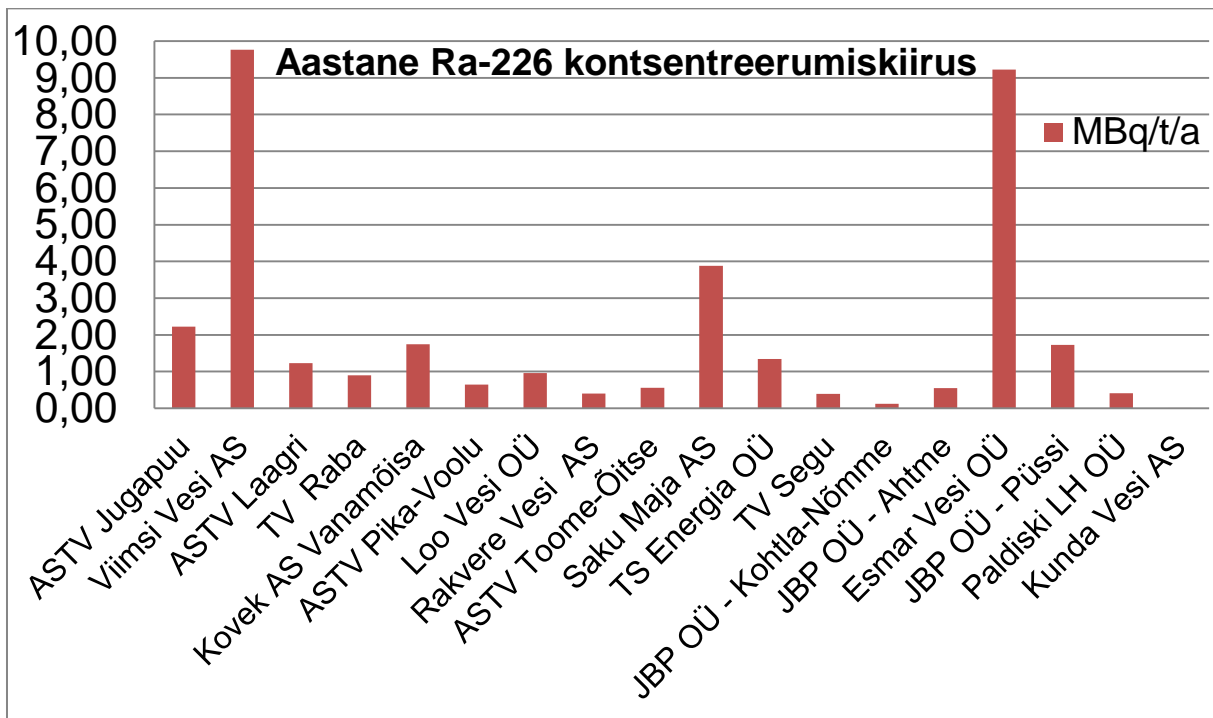
Aruande lisas nr. 2 esitatud tehnilise kirjelduse tabeli põhjal on võimalik arvutada, kui suur on potentsiaalselt iga-aastaselt toodetav radioaktiivse materjali kogus. Jättes kõrvale jaamad, mis radioaktiivset materjali ei tooda ning eeldades, et filtrite **täidismaterjali vahetatakse iga 10 aasta järel**, leiame, et **igal aastal tekib ca 32 tonni radioaktiivset materjali**, mida tuleks



utiliseerida. Joonised 16 ja 17 ning 6 illustreerivad selgelt, kui ebaühtlane on Ra-226 akumulatsioon nii absoluutkoguste kui kontsentratsioonide osas eri veevõrkide lõikes.



Joonis 16 Ra-226 aastane akumulatsioonikiirus veetöötusjaama filtermaterjalis [MBq/a].



Joonis 17 uuritud veevõrkide Ra-226 kontsentratsioonikiirus filtreerimismaterjalis [MBq/t/a]

Tabelis 8 esitatud veetöötlusjaamade Ra-isotoopide puhastusvõimete väärtused illustreerivad, et Ra-ärastuseks konstrueeritud veetöötlusjaamade (Viimsi, Saku Maja AS, Esmar Ehitus OÜ, TS Energia OÜ, Püssi veetöötlusjaam) puhastusvõime on keskmiselt suurem kui selleks mittekonstrueeritud VTS's, kuid siiski omavahel üsna erinev. Nii on see erinev ka selleks mittekonstrueeritud veetöötlusjaamades. Ühekordne mõõtmine viitab puhastusvõime juhuslikkusele, mis näitab, kui vähe kontrollitud on radioaktiivse materjali teke veetöötlusjaamades ning samal ajal ka radioloogilised näitajad väljastatavas joogivees. Tabelis 8 esitatud veepuhastusvõime 10 jaama keskväärtus on ca  $42\% \pm 27\%$  (valimi standardhälve).

Uuring tuvastas, et radioaktiivse materjali teke on valdavalt seotud Th-228 sissekasvamisega filtermaterjalis. Uuringu läbiviijad on valmis välja pakkuma erinevaid stsenaariume, kas ja kuidas ning millistel tingimustel vett raadiumist puhastada ning kuidas käidelda tekitatud radioaktiivset materjali, kuid järgnev tegevus vajab esmalt järgmiste küsimuste väljaselgitamist:

- 1) Milline seisukoht võetakse tekkiva madalaktiivsusega materjali käitlemise suhtes
- 2) On absoluutselt vajalik jõuda praktilise lahenduseni küsimuses, milliste tingimustel on iga veevärgi kaupa veekäitlemine raadiumi isotoopide suhtes on õigustatud ja millistel tingimustel mitte. St., vajame praktikas rakendatavat, joogiveemääruses viidatud terviseriskihinnangu läbiviimist, mis tugineks kulu/tulu (riski/kulu) analüüsil.

Eraldi peaks tõstatama küsimuse, kuidas peavad reageerima need veevärgid, kus käesolev uuring tuvastas radioaktiivse materjali olemasolu. Tuginedes aruande viites 3 nimetatud uuringutega seotud kiirgusohutushinnangutele, võib eeldada, et radioaktiivsete filtermaterjalide poolt põhjustatud kiirgusrisk on suhteliselt madal ja vaid eritingimustel (nt. remonttööd, filtermaterjali käitlemine) võib põhjustada märkimisväärseid doose töötajatele, kuid on siiski erinev ja otseselt seotud iga VTJ tehniliste tingimustega.

## LISAD

### **Lisa 1. Eesti veevõrkude ülevaatlik tabel seisuga august 2014. (Terviseamet)**

*Lisatud eraldi failina.*

### **Lisa 2. Projekti valimi analüüsitulemused**

*Lisatud eraldi failina.*

### **Lisa 3. Ettevõtete kaasamine ja teabepäev**

*Lisatud eraldi failina.*

### **Lisa 4. TÜ poolt väljastatud teabepäevale eelnenud pressiteade**

*Lisatud eraldi failina.*

### **Lisa 5. Teabepäeval esitatud ettekanne**

*Lisatud eraldi failina.*

## **Tänu sõnad**

Uuringute läbiviimist toetas SA Keskkonnainvesteeringute Keskus (projekt nr.7939).

## **Viited**

---

<sup>1</sup> Twinning light Project EE06-IB-TWP-ESC-03 „Estimation of concentrations of radionuclides in Estonian ground waters and related healths risk“, 2009-2010, <http://www.terviseamet.ee/keskkonnatervis/vesi/projektid/tf-radionukliidide-projekt.html> .

<sup>2</sup> M. Forte, L. Bagnato, E. Caldognetto, S. Risica, F. Trotti, R. Rusconi, „Radium isotopes in Estonian groundwater: measurements, analytical correlations, population dose and a proposal for a monitoring strategy“, J. Radiol. Prot. 30 (2010) 761–780.

<sup>3</sup> SA ARchimedes Keskkonnatehnoloogia programmi projekt „Radionukliidide põhjaveest eraldamise tehnoloogia optimeerimine, tekkivate radioaktiivsete jäätmetüüpide ja koguste väljaselgitamine ning veepuhastusjaama kiirgusriskide hindamine“, 2012-2015, <https://www.etis.ee/portal/portaal/projektiAndmed.aspx?VID=9d591698-d9d7-4a27-ac71-f55eeb0b98fd&TextBoxName=madis%20kiisk&PersonVID=36839&lang=et&FromUrl0=isikud.aspx&FromUrl1=isikuProjektid.aspx>