

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Füüsika instituut

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias (12 EAP)

**Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla ehitusmaterjali vabastamine kiirgusohutuse
nõuetest**

Liis Lumisalu

Juhendaja: Siiri Salupere, PhD

Tartu 2026

Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla ehitusmaterjali vabastamine kiirgusohutuse nõuetest

Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla dekomissioneerimiseks on tehtud varasemaid uuringuid ning mõõdetud ehitusmaterjalis esinevate radionukliidide aktiivsuskontsentratsioone. Selle töö eesmärk on uurida Tammiku betoonmaterjali saastatust varasemate mõõtetulemuste põhjal ja võrrelda saadud tulemusi kiirgusohutuse nõuetest vabastamise tingimustega. Varasemate uuringute põhjal tuuakse välja enimesinevad radionukliidid, milleks Tammiku betoonmaterjalis on C-14, Cs-137, Ra-226 ja Sr-90.

Töös analüüsitakse statistilistel meetoditel radionukliidide aktiivsuskontsentratsioone. Võrdlusesse võetakse erinevad hoidla osad: põrand-, sein- ja katteplakid. Võrreldakse pinnaproove, mis on võetud kuni 0,2 cm sügavuselt ja ruumiproove, mis on võetud 2-4 cm sügavuselt.

Analüüsi tulemusena selgub, et pinnakihi mõõdetud aktiivsuskontsentratsioonid on suuremas osas kõrgemad ruumiproovide tulemustest. Põrandast mõõdetud Cs-137, Ra-226 ja Sr-90 tulemused ületavad vabastamistasemeid pinnal ja sügavamas kihis. Seintel on puhastatud pindadelt ning sügavamast kihist tuvastatud vabastamistaseme ületamist vaid Ra-226 puhul. Katteplakid on praeguste mõõtmistulemuste järgi vabastamise nõuetele vastavad. Töö tulemusena ilmneb vajadus täiendavate proovide võtmiseks, eriti Sr-90 ja C-14 aktiivsuskontsentratsiooni mõõtmiseks, mille kohta on olemasolevate proovide arv ebapiisav.

Märksõnad: ioniseeriv kiirgus, radioaktiivsed jäätmed, vabastamine, dekomissioneerimine

CERCS kood: T270 Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

Clearance of Tammiku radioactive waste repository construction materials from radiation safety requirements

Previous studies have been conducted in the decommissioning process of the radioactive waste repository in Tammiku in which the most prominent radionuclides have been found to be: C-14, Cs-137, Ra-226 and Sr-90. This study aims to analyse previously measured activity concentrations in the facility's concrete and compare them to clearance levels. Different parts of the repository are compared: floor, walls and cover blocks. To assess depth of the contamination samples taken from the surface (depth of <0.2 cm) were compared to samples taken from inside the concrete (depth of 2-4 cm).

The results of the study find highest levels of contamination in the floor, where activity concentrations for Cs-137, Ra-226 and Sr-90 exceed clearance levels even in the deeper layer. In the deeper layer of the walls only Ra-226 has been found to exceed the clearance levels. The cover blocks meet the clearance requirements according to the current measurement results. This work also reveals the need for additional sampling, especially for measuring the activity concentration of Sr-90 and C-14, for which the number of existing samples is insufficient.

Keywords: ionizing radiation, radioactive waste, clearance, decommissioning

CERCS: T270 Environmental technology, pollution control

Sisukord

Mõisted	4
Sissejuhatus.....	5
1. Teoreetiline taust.....	7
1.1. Tammiku objekti ajalugu	7
1.2. RADON-tüüpi jäätmeheidlate ülevaade	9
1.3. Tammiku dekomissioneerimine	10
1.4. Vabastamine.....	13
1.5. Aktiivsuskontsentratsiooni määramine	16
2. Materjal ja meetodid	17
3. Tulemused.....	19
3.1. Foon	19
3.2. I etapi analüüs	20
3.2.1. Seinad.....	20
3.2.2. Põrand	21
3.2.3. Katteplakid.....	23
3.2.4. Eu-152, Eu-154	23
3.3. II ja III etapi analüüs	24
3.3.1. Seinad.....	24
3.3.2. Põrand ja katteplakid	25
3.4. Ruumiproovid ehk saaste jõudmine sügavamatesse kihtidesse	26
4. Arutelu	30
4.1. Järeldused probleemsetest radionukliididest.....	30
4.1.1. C-14	30
4.1.2. Cs-137	30
4.1.3. Pb-210	31
4.1.4. Ra-226.....	32
4.1.5. Sr-90.....	34
4.2. Järeldused ehitusmaterjali puhtusest.....	34
Kokkuvõte	40
Summary	42
Kasutatud allikad	44
Lisad.....	46
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	51

Mõisted

Töös kasutatakse IAEA Tuumaohutuse ja julgeoleku sõnastikus (2022) defineeritud mõisteid:

Aktiivsus (A) – Kindlas energiaseisundis oleva radionukliidi koguse aktiivsus A kindlal ajahetkel:

$A = dN / dt$, kus dN on spontaansetele tuumasiirete arvu oodatud väärtus selles energiaseisundis ajavahemikus dt . Ühik bekrell (Bq).

Aktiivsuskontsentratsioon – radionukliidi aktiivsus nukliidi massiühiku kohta, kus radionukliidid on ühtlaselt jaotunud. Selles töös on aktiivsuskontsentratsioon toodud ühikus Bq/g.

Efektiivdoos (E) – ioniseeriva kiirguse stohhastiline terviserisk, mis väljendub kogu kehale. Esmalt arvutatakse iga koe või elundi efektiivdoos korrutades vastava koe/elundi ekvivalentdoosi koefaktoriga. Seejärel summeeritakse efektiivdoosid: $E = \sum_T w_T \cdot H_T$, kus H on ekvivalentdoos koes või organis T ning korrutatud vastava koefaktoriga w_T . Efektiivdoos nätab Ühik siivert (Sv).

Ekvivalentdoos ($H_{T,R}$) – kiirguse liigist põhjustatud koe või elundi neeldunud doos, mis on korrutatud vastava kiirguse liigi kaaluteguriga. Defineeritud kui:

$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$, kus $D_{T,R}$ on neeldunud doos, mis on põhjustatud kiirguse liigi R poolt, keskmistatud koes või organis T ning w_R on kiirguse liigi R kiirgusfaktor. Ühik siivert (Sv).

Radionukliid – mingi elemendi isotoop, mis ebastabiilse oleku tõttu iseeneslikult laguneb ja selle käigus radioaktiivset kiirgust kiirgab. Iga radionukliid kiirgab unikaalse intensiivsusega, mille abil on võimalik erinevaid radionukliide tuvastada.

Radioaktiivne jääde - radionukliide sisaldavad või nendega saastunud ained, materjalid või esemed, mille aktiivsus on suurem kiirgusseaduse alusel sätestatud vabastamistasemetest.

Vabastamistase - radioaktiivse aine aktiivsuskontsentratsiooni väärtus (Bq/g), millega võrdse või väiksema väärtuse korral võib kiirgustegevuse käigus tekkivad materjalid, mis sisaldavad radioaktiivseid aineid, vabastada kiirgusseadusest tulenevate nõuete kohaldamisest ning nende töötlemine ja ladustamine radioaktiivse jäätmena pole kiirgusohutuse seisukohalt vajalik.

Sissejuhatus

RADON-tüüpi Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla asus Saku vallas ning oli kasutusel aastatel 1963-1995. Tammiku hoidla, kogumahuga 200 m³, koosnes üheksast betoonseintega eraldatud sektsioonist. Igat sektsiooni katsid betoonist katteplokid. Hoidlase oli sulgemise ajaks kogunenud 110 m³ ehk 97 tonni radioaktiivseid jäätmeid (SKB, 2005). Tammiku hoidla alal asus ka vedelate radioaktiivsete jäätmete mahuti. Alates hoidla sulgemisest on võetud käsile hoidla dekomissioneerimine. Esmalt eemaldati hoidlast radioaktiivsed jäätmed ning hiljem viidi hoidla alalt ära selle ehitusmaterjal: hinnanguliselt 150 tonni betooni ja 56 tonni paekivi (Kiisk, 2023). Kõik tahked materjalid on viidud Paldiski radioaktiivsete jäätmete vaheladustuspaika. Hoidla 0,2 ha suurune maa-ala on tänaseks kiirgustegevuse nõuetest vabastatud ja ei kujuta endast kiirgusohu.

Radioaktiivseid jäätmeid vaheladustatakse spetsiaalsetes hoidlates ja lõppladustatakse maapõue nende jäädava isoleerimise eesmärgil. Lõppladustamisele kuuluva materjali hulga minimeerimiseks on kiirgustegevusega tegeleval osapoolel on kohustus tagada radioaktiivsete jäätmete minimaalne aktiivsus ning hulk (Kiirgusseadus, 2025). Sellest tuleneb ka töö olulisus ning teema püstitus, eesmärgiga teada saada, kui saastunud on Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla betoonmaterjal ning kas materjali on võimalik vabastada kiirgusohutuse nõuetest. Kiirgusohutuse nõuetest vabastatud materjali ei pea radioaktiivse jäätmena ladustama ja materjali saab ilma piiranguteta uuesti kasutusse võtta.

Käesoleva töö uurimisobjektiks on Tammiku hoidla betoonist ehitusmaterjal, mida uuritakse seinte-, põranda- ja katteplakkide kaupa. Selle töö raames võetakse kokku Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla ehitusmaterjali käsitlevad varasemad uuringuid alates aastast 1994, et kombineerida kõige olulisem info, mille eesmärk on luua alus betoonmaterjali vabastamisele.

Töö eesmärk on anda esmane hinnang, kas uuritav materjal vastab vabastamistingimustele. Selle jaoks analüüsitakse aastatel 2013-2025 ehitusmaterjalist kogutud aktiivsuskontsentratsioonide mõõtetulemusi radionukliidide kaupa, et tuvastada probleemseimad radionukliidid, hinnata saaste levikut betoonis ja leida kohad, millele seni pole piisavalt tähelepanu pööratud. Töös analüüsitakse, kuidas on saaste levinud betooni pinnalt sügavamasse kihti ning kuidas on mõjutanud materjali saastetaset aastatel 2015-2018 läbi viidud puhastamistööd, mille käigus eemaldati betoonplakkidelt jäätmetega otseselt kokku puutunud pindmine kiht. Lisaks uuritakse,

kas kogu hoidlas esinev saaste on inimtekkeline või esineb seal looduslikke mõjutusi, millega peab analüüsi puhul arvestama.

Uurimisküsimustena tõstetakse hüpoteesid:

1. Saaste on pinnasaaste iseloomuga ja betooni sügavamas kihis vähenevad aktiivsuskontsentratsioonid.
2. Betoonis leiduv Pb-210 on lisaks jäätmetes esinenud Ra-226le mõjutatud looduslikust radooni lagunemisest. Vabastamistaset ületavad Pb-210 väärtused pole inimtekkelise iseloomuga seega ei saa neid vabastamistingimustega võrrelda.
3. Põrandaplokid on saastunud rohkem kui seina- ning katteplokid.

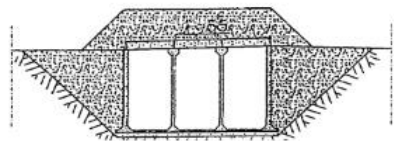
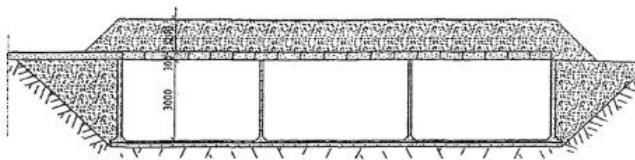
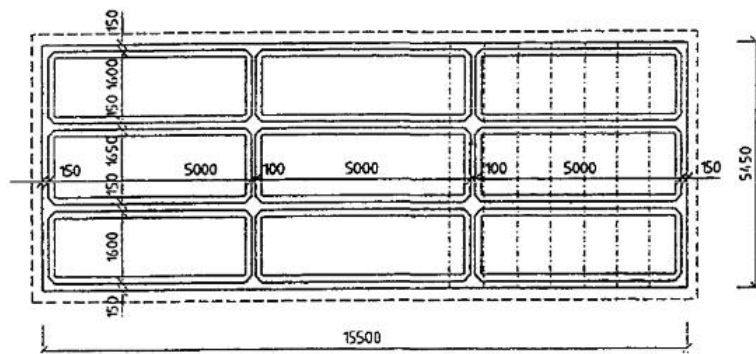
1. Teoreetiline taust

1.1. Tammiku objekti ajalugu

Tammiku RADON-tüüpi radioaktiivsete jäätmete hoidla on nõukogudeaegne ehitis, mis asus Tallinnast lõuna pool Saku vallas Männiku külas. Hoidla asus männimetsas, elamutest eemal. Lähimad majad olid objektist enam kui kilomeetri kaugusel. (Ideon jt, 2007) Tammiku objekti eesmärk oli ladestada radioaktiivseid jäätmeid, mis olid tekkinud tööstusettevõtetes, teadus- ja meditsiinasutustes. Ladustamiseks polnud sobilik sõjalise taustaga materjal (Horak jt, 1997), mille käitlemisega tegeleti Paldiskis asunud tuumaallveelaevnike õppekeskuses (Alara, i.a).

Tammiku hoidlat kasutati aastatel 1963–1995. Hoidla paiknes 0,2 ha suurusel aiaga ümbritsetud territooriumil. Tammiku hoidla koosnes 200 m³ suurusest vedeljäätmete mahutist ning maapinnalähedasest tahkete materjalide hoidlast. Tahkete jäätmete hoidla pikkus oli 17,8 meetrit, laius 7,9 meetrit ning sügavus 3,35 m. Hoidla ruumalaks oli planeeritud 200 m³, ning objekti sulgemise ajaks oli sellest kasutatud 110 m³. (Ideon jt, 2007) Hoidla oli jagatud 150 mm paksuste betoonist seintega üheksaks sektsiooniks (joonis 1), millest 6 olid hoidlana kasutusel ning 3 seisis tühjana - sektsioonid 7, 8, 9. Sektsioonid 1, 2 ja 3 oli tellisseintega jagatud veelkord kaheks (joonis 2). Igat sektsiooni katsid omakorda 1,7 m pikkused, 0,8 m laiused ning 0,3 m kõrgused betoonplokid. Nende eeldatavaks raskuseks arvestati umbes 850 kg. Hoidla kasutusaja lõppedes oli tahket radioaktiivset materjali kogunenud umbes 110 m³, mis kaalus ligikaudu 97 tonni. (SKB, 2005)

Hoidla dekomissioneerise vajadusele tõi tähelepanu aastal 1994 toimunud kiirgusõnnetus, kus hoidlast varastatud suure aktiivsusega (1,6 TBq) tseesium-137 kiirgusallikas põhjustas ühe surma ning tekitas kiirgusest tulenevaid tervisekahjustusi mitmetele inimestele. (International Atomic Energy Agency, 1998)



Joonis 1. Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla põhiplaan, piki- ja ristlõige (SKB, 2005)

3A	3B	6	9
2A	2B	5	8
1A	1B	4	7

←
Sissepääs

Joonis 2. Sektsioonide numeratsioon (Ideon jt, 2007)

1.2. RADON-tüüpi jäätmehoidlate ülevaade

RADON-tüüpi radioaktiivsete jäätmete hoidlad olid kasutusel Nõukogude Liidu territooriumil. Kokku oli hoidlaid 36, millest 16 olid Venemaal, 5 Ukrainas ning 1 igas ülejäänud liidu riigis. Neisse ladustati madala ja keskmise radioaktiivsusega jäätmeid. Prügi koguti peamiselt meditsiinist, tööstusest, põllumajandusest ja teadusvaldkondadest. Tavaliselt ei kuulunud jäätmete hulka materjal, mis pärineb tuumajaamade tööst. (Horak jt, 1997)

RADON-tüüpi jäätmehoidlad ehitati standardse plaani järgi, mida kohandati võttes arvesse jäätmete hulka ning kohalikke tingimusi (Horak jt, 1997). RADON-tüüpi hoidlate disain oli üles ehitatud ühtsele põhimõttele – pinnasesse kaevatud hoidla koosnes betoonseintega sektsioonidest, mis ulatasid umbes 3-4 meetri sügavusele. Sektsioonidesse koguti radioaktiivseid jäätmeid nii pakendatud kui ka lahtised kujul. Radioaktiivsed jäätmed moodustasid sektsioonides sorteerimata hunniku, mis võis ulatuda kuni katteplokkideni. (International Atomic Energy Agency, 2025)



Joonis 3. Radioaktiivsete jäätmete ladustamine Tammiku hoidlas (Alara, i.a)

Kõik kiirgusohutusega seotud tegevused toimusid Tammiku hoidla ja ka teiste RADON-tüüpi hoidlate kasutamise perioodil Nõukogude Liidus seatud ohutusnormide ning reeglite järgi, mis olid kehtestatud radioaktiivsete jäätmete käitlemise sanitaar-eeskirjades „Radioaktiivsete jäätmete käitlemise sanitaar-eeskirjad“, ja „Radioaktiivsete jäätmete ja muude ioniseeriva kiirguse allikate

käitlemise sanitaareeskirjad“ (Horak jt, 1997). RADON-tüüpi hoidlate puhul on tihti murekohaks vähene või puuduv hoidla tegutsemisajast pärinev dokumentatsioon, mis kirjeldaksid kogutud radioaktiivseid jäätmeid ja nende omadusi, tausta ja hulka (International Atomic Energy Agency, 2025).

Tänapäevased kiirgusohutusnõuded on rangemad ning radioaktiivsete jäätmete hoidmiseks kasutatakse turvalisemaid lahendusi, mille tõttu on mitmetes endise Nõukogude Liidu riikides dekomissioneerimisel vanu RADON-tüüpi hoidlaid ning jäätmed transporditud uude, ohutusnõuetele vastavasse hoidlasse. Rahvusvaheline Aatomenergiaagentuur (IAEA) on loonud rahvusvahelised standardid „*General Safety Requirements*“, mis hõlmavad näiteks radioaktiivsete jäätmete käitlemist, ohutusnõudeid, tööprotsessi ja dekomissioneerimise etappe (International Atomic Energy Agency, 2025). RADON-tüüpi radioaktiivsete jäätmete hoidlate dekomissioneerimistööd käivad peale Eesti paljudes teistes endise Nõukogude Liidu riikides näiteks Maišiagala hoidla Leedus (Maišigala..., 2026) ja Chisinau hoidla Moldovas (Xu ja Kłos, 2021).

1.3. Tammiku dekomissioneerimine

Esmase kiirgusohutushinnangu tegi Tammiku objektile Rootsi Kiirguskaitse Instituudi poolt 1994. aasta septembris. Tulemusena kaardistati hoidla seisund ja mõõdeti jäätmete doosikiirused. Kõige kõrgemad väärtused mõõdeti sektsioonist 6. (SSI, 1994) Hoidlas paiknenud pakendatudjäätmete aktiivsusest moodustasid umbes 75% Sr-90 ja 24% Cs-137 allikad. Lahtiste jäätmete seast tuvastati Pu-239 ja Am-241 sisaldavaid suitsuandureid ning Ra-226 sisaldavaid esemeid. Am-241, Pu-239 ja Ra-226 aktiivsuseks anti hinnanguliseks väärtuseks 0,4 TBq. (International Atomic Energy Agency, 1998)

Alates 1995. aastast on hoidla suletud, sest see ei vastanud kehtivatele ohutusnõuetele. Samuti oli hoidla ebasobiv radioaktiivsete jäätmete lõpphoidlaks. Sellel põhjusel oli vajalik radioaktiivse materjali eemaldamine ning selle transport Paldiski radioaktiivsete jäätmete vahelhoidlasse. Hoidla alal paiknenud vedeljäätmete mahutist mõõdetud aktiivsus oli madal ning see ei kujutanud ohtu elanikkonnale ega keskkonnale. Sellel põhjusel likvideeriti vedeljäätmete mahuti ning vedeljäätmed juhiti kanalisatsioonisüsteemi aastal 2000. (Ideon jt, 2007)

Aastal 2005 tegi Rootsi inseneribüroo *SKB International Consultants* radioaktiivsete jäätmete eemaldamise eelanalüüsi Tammiku hoidlale, mille käigus mõõdeti jäätmete aktiivsust neis esinevate radionukliidide kaupa ning esitati strateegiad jäätmete eemaldamiseks. Jäätmetes tuvastatud radionukliidideks olid Am-241, C-14, Co-60, Cs-137, Eu-152, Eu-154, H-3, Ni-63, Pu-239, Ra-226 ja Sr-90. Hoidlasse kogunenud jäätmete koguaktiivsuseks mõõdeti $7,00 \cdot 10^{13}$ Bq. Suurima osakaaluga jäätmete koguaktiivsusest mõõdeti radionukliidid Sr-90 ning (67% koguaktiivsusest) ning Cs-137 (24% koguaktiivsusest). (SKB, 2005)

Kõige suurem doosikiirus mõõdeti sektsioonis 6. Sellele järgnesid sektsioonid 5 ja 3B. (Ideon *et al*, 2007) Aastal 2008 eemaldati sektsioonist 6 kõrgaktiivsed jäätmed, mille aktiivsus moodustas 90% jäätmete koguaktiivsusest. 2011. aastaks olid kõik jäätmed hoidlast eemaldatud ning viidud Paldiski radioaktiivsete jäätmete vahehoidlasse. (Alara, i.a)

Dekomissioneerimistöode protsessi saab jagada kolme etappi. I etapp „Tammiku hoidla radioloogiline iseloomustamine“ viidi läbi 2013-2015. See hõlmas endas seinte, põranda ja katteplakkide saastetaseme mõõtmist (Alara, i.a). Mõõdeti kõiki SKB 2005. aastal tuvastatud radionukliide (Kiisk, 2023). I etapi andmete kokkuvõtteks leiti, et probleemseimateks radionukliidideks on Cs-137 ja Ra-226, kuna nende radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonide tulemuste puhul esines enim vabastamistaseme ületamist (Alara, 2025a). Nendele kahele radionukliidile on pööratud palju tähelepanu ning selle tõttu on võetud nende uurimiseks palju proove (Kiisk, 2023). Probleemsete radionukliididena tuvastati ka C-14 ja Sr-90, mille kohta on küll vähem proove, kuid vabastamistaset ületavate proovide arv on märkimisväärne. Vabastamistaset ületamist esines ka Pb-210 puhul. Eu-152 ja Eu-154 tulemused jäid alla määramistaseme ning kogu materjalist tuvastati ühel korral Am-243 esinemine (Alara, 2025a), mida hilisematel mõõtmistel uuesti ei tuvastatud (Kiisk, 2023). Ülejäänud SKB 2005 aasta töös tuvastatud radionukliidid jäid alla vabastamistaseme (Alara, 2025a).

II etapiga alustati 2015 ning viidi lõpule 2018, etapi eesmärgiks oli hoidla sisepindade puhastamine. Hoidla ehitusmaterjali kaardistati CoMo mõõtmisseadmega, millega mõõdeti pindade saastetaset alfakiirguse ning beeta- ja gammakiirguse tuvastamise režiimis (ühik cps - ingl *counts per second*). Alfakiirguse režiimis kehtestati pinna puhastamiseks piirmäär 100 cps; beeta- ja gammakiirguse režiimis 600 cps. Puhastamise eesmärgiks seati eemaldada seinte pindadelt pealne kiht, kuni saavutatakse piirmääradele vastav mõõtmistulemus (100 ja 600 cps).

Lihvimismasinaga eemaldati pealmine saastunud betoonikiht ning kohtades, kus CoMo mõõtmisseadega tuvastatud saastetase ulatus sügavale, eemaldati saastunud materjal piikvasaraga kuni saastetaseme vähenemiseni. (Kiisk, 2023)

Tekkinud betoonipuru ja puhastamisest tekkinud materjal transporditi Paldiski radioaktiivsete jäätmete vahelhoidlasse. Saastetaset mõõdeti pinnasaastemonitoriga CoMo enne ning pärast lihvimist, lisaks võeti proove radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonide määramiseks. Pärast proovidest aktiivsuskontsentratsioonide tulemuste saamist sai kinnitada, et saaste ei ole vaid betooni pindmises, vaid kohati ka sügavamates kihtides. Kõige suurem saastumine tuvastati II etapi tulemustest sektsioonide 2B, 3B ja 4 sein ja põranda liitekohtades. Kohtades, kus mõõdeti CoMo seadmega saastumine kogu sein sügavuses, eemaldati betoon puhastamise piirmäära saavutamiseni, mis võis jätta seintesse suuremaid avasid. Kogu sügavuses määrati saastunuks ka sektsioonides 1 ja 2 paiknenud vaheseinte alumised osad, mis seejärel eemaldati. (Kiisk, 2023)

III etapp algas aastal 2019 ning siia kuuluvad põhjalikumad analüüsid, hoidla lammutamine ja vabastamine, millega seotud tööd on endiselt käimas (Alara, 2025b). 2020. aastal toimusid täpsed mõõtmised eeltoodud radionukliidide (C-14, Cs-137, Pb-210, Ra-226 ja Sr-90) määramiseks, kuid kohati ületasid mõõdetud aktiivsuskontsentratsioonid vabastamistaset (Alara, 2025a).

Praeguseks on objektilt eemaldatud kõik ehitusmaterjalid - hinnanguliselt 150 t betooni ja 56 t paekivi - ning viidud aastal 2022 Paldiski vaheladustuspaika. Paekivi pärines hoidla alla ehitatud toetusest. Lammutustöödel kasutati CoMo seadet täiendava kaardistuse tegemiseks igas sektsioonis. Kaardistamise käigus saastunud materjali ei leitud. Muld selle all on põhjalikult analüüsitud ning sealt pole kiirgussaastet tuvastatud, seega võib arvata, et paekivi radionukliidide saastetase on madalam betoonist. Siiski ei saa eeldada, et paekivi on radioaktiivsest saastest mõjutamata, enne kui seda on laboratoorsete mõõtmistulemustega kinnitatud. (Kiisk, 2023)

2024. aastal vabastati Tammiku maa-alal olnud asfaltplats ning see eemaldati hoidla territooriumilt. (Alara, 2025b) Tammiku hoidla maa-ala on tänaseks vabastatud kiirgustegevuse nõuetest. 2025. aasta kevadel tehti hoidla maa-ala vabastamiseks doosihinnang tuginedes pinnase mõõtmistulemustele. See tõestas, et maa-ala pole radioaktiivselt saastunud. 2025. aasta lõpuks vabastati maa-ala kiirgustegevuse nõuetest. Hoidla betooni puhtus on seni tõestamata ja vajab täiendavaid mõõtmistulemusi. 2026. aasta aprilli lõpus toimusid Paldiskis proovide võtmine

betoonmaterjali aktiivsuskontsentratsiooni määramiseks, mille tulemused, koos selle töö raames analüüsitud varasemate proovidega, annab lõpliku ülevaate betoonmaterjali puhtusest.

Varasemate mõõtmiste (SSI, 1994; Alara 2025a) käigus on kindlaks tehtud radionukliidid, mille aktiivsuskontsentratsioon on Tammiku ehitusmaterjalis märkimisväärne ning kohati ületab lubatud vabastustasemeid. Kõikidest betoonmaterjalist mõõdetud radionukliididest pööratakse enim tähelepanu neile neljale: C-14, Cs-137, Ra-226 ja Sr-90.

Radionukliid, mis koos eelnimetutega ületab mõõtmistel vabastamistaset on Pb-210. Seda peetakse looduslikult tekkinuks, seega ei käsitleta hoidlasse inimõjul tekkinud radionukliidina ehk Pb-210t ei arvestata vabastamisel. Kiisk (2023) toob välja, et hoidla sektsioonides 1-6 esinev Pb-210 võib olla tekkinud ka hoidlas esineva Ra-226 lagunemisel.

Lisaks töös käsitletavatele andmetele on C-14 detekteeritud Tammiku objekti põhjavee- ja pinnaseproovides, pinnaseproovides on tuvastatud ka Cs-137 ja Sr-90, mis kinnitab nende radionukliidide olemasolu ja vajadust nende uurimiseks (Kiisk, 2023).

1.4. Vabastamine

Materjali klassifitseerimine radioaktiivse jäätmena sõltub materjalis esinevate radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonidest. Kiirgusseaduse rakendusakt keskkonnaministri määrus „Kiirgustegevuses kasutatavate või tekkivate radioaktiivsete ainete väljaarvamise ja vabastamise tingimused ning väljaarvamise ja vabastamise taotlusele esitatavad nõuded“ (edaspidi keskkonnaministri määrus nr 40, 2021) seab tingimused radioaktiivse materjali vabastamisele tuues välja iga radionukliidi vabastamistase ehk aktiivsuskontsentratsiooni piirmäära, millest madalama väärtuse korral ei pea materjali radioaktiivse jäätmena käitlema. Materjali, mille aktiivsuskontsentratsioon on madalam vabastamistasemest, saab olla Keskkonnaameti poolt vabastatud kiirgusseaduse nõuetest. Selle töö puhul lähtutakse määruse lisast 4 „radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonide vabastamistasemed kiirgustegevusega seotud ehitise ja selle lammutamisel tekkiva betooni- ja kiviprahi taaskasutamiseks või ringlusse võtmiseks“, mis käsitleb kiirgustegevusega seotud ehitise lammutamisel tekkinud ehitusprahile kehtivaid aktiivsuskontsentratsioonide vabastamistasemeid eri radionukliidide kaupa (tabel 1). Töös on välja

toodud ka radionukliide, mis kordagi vabastamistaset ei ületanud, nende vabastamistasemed on leitavad lisa 1 tabelites.

Tabel 1. Töös käsitlevate radionukliidide vabastamistasemed (Kiirgustegevuses..., 2021) ja poolestusajad (Britannica, 2026).

Radionukliid	Am-243	C-14	Cs-137	Eu-152	Eu-154	Pb-210	Ra-226	Sr-90
Vabastamistase (Bq/g)	0,1	10	1	0,1	0,1	0,1	0,1	1
Poolestusaeg (aasta)	7370	5700	30	13,5	8,59	22,3	1600	28,8

Vabastamistase on iga radionukliidi puhul tuletatud selle põhjal, kui suur aktiivsuskontsentratsioon põhjustaks aastase efektiivdoosi 10 mikroSv. Juhul kui materjal on saastunud enam kui ühe radionukliidiga, tuleb vabastamises kasutada summeerimisvalemit:

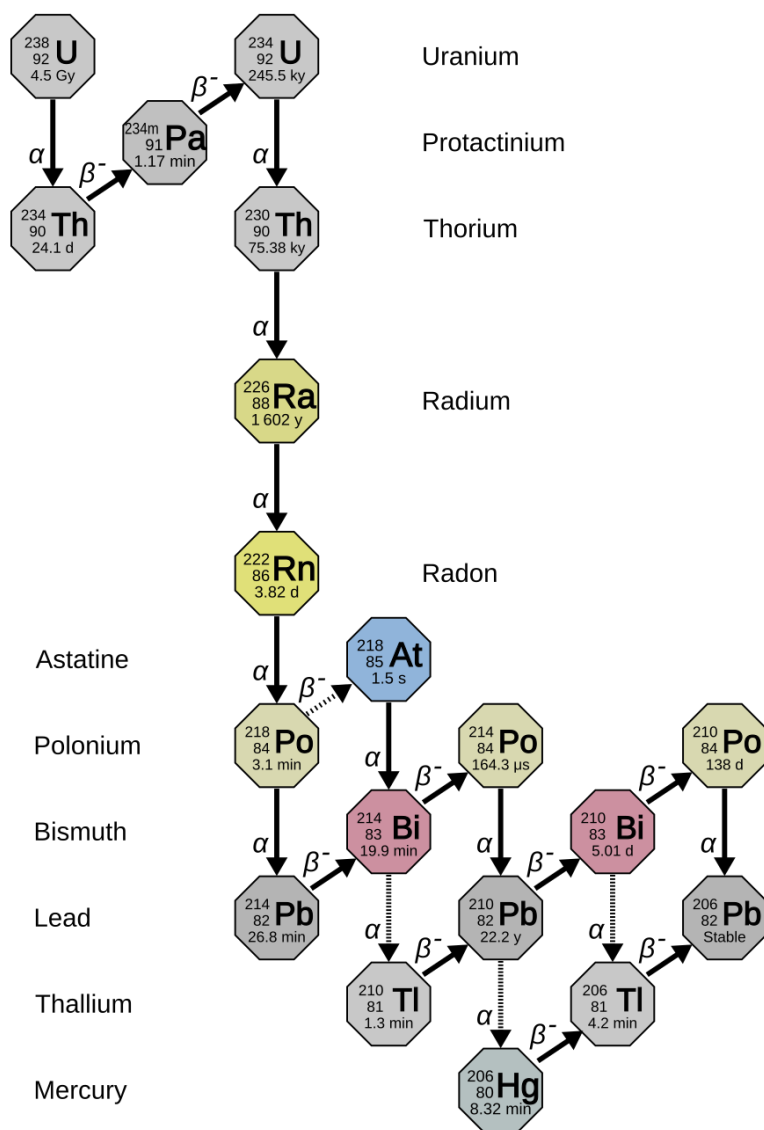
$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A_{Li}} < 1,$$

, kus:

A_i on radionukliidi i aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g) ning A_{Li} on radionukliidi i vabastamistase, mis on samuti antud aktiivsuskontsentratsiooni ühikutes. Materjal on vabastatav siis, kui summeerimisvalemi tulemus on väiksem kui 1. (Kiirgusseadus, 2025)

Radioaktiivseid jäätmeid, mis ületavad vabastamistaset ka pärast puhastamist saab sulgeda betooni ehk tsementeerida või bitumineerida. Seejärel ladestatakse suletud materjal radioaktiivsete jäätmete lõpphoidlasse. Üks võimalus on radioaktiivset materjali hilisema vabastamise eesmärgil ladustada, mis laseb radionukliididel loomulikult laguneda (International Atomic Energy Agency, 2023), see on moodus vähendada lõppladustamisele mineva materjali mahtu. Kiirgusseaduse §32 punkt 13 kohustab kiirgustegevusega tegelevat osapoolt tagama radioaktiivsete jäätmete minimaalse aktiivsuse ning hulga (Kiirgusseadus, 2025). Tammiku hoidla ehitusmaterjali puhul oleks ladustamine ebaefektiivne, sest betoonis esinevad radionukliidid, mis on väga pika poolestusajaga (tabel 1).

Radioaktiivsete jäätmete puhul eristatakse NORM-jäätmeid. See on materjal, mis sisaldab looduslikult esinevaid radionukliide (NORM – *Naturally Occurring Radioactive Material*) nagu toorium-232 ja uraan-238 (joonis 4) ja nende lagunemisridadesse kuuluvaid tütar nukliide nt Ra-226 ja Pb-210 (Kiirgusseadus, 2025). Kuigi ka Tammiku hoidla ehitusmaterjalides sisaldub Ra-226 ning Pb-210, ei arvata neid Tammiku hoidla ehitusmaterjale puhul automaatselt looduslikeks, sest hoidlas paiknev saaste on tulenenud inimtegevusest.



Joonis 4. Uraani (U-238) lagunemisahel. (Tosaka, Decay chain(4n+2, Uranium series).PNG, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33293646>)

1.5 Aktiivsuskontsentratsiooni määramine

Käesolev alapeatükk annab lühiülevaate, kuidas on määratud Tammiku hoidlast tuvastatud radionukliidide aktiivsuskontsentratsioon. Mõõtemetodite ülevaade loob aluse andmekvaliteedi mõistmiseks mõõtmistulemuste analüüsimise ja interpreteerimise käigus.

Selles töös analüüsitud Cs-137, Ra-226 ning teiste gammakiirgavate radionukliidide sh Pb-210, mõõtmistulemused on saadud gammaspektromeetria mõõtmist kasutades. Gammaspektromeetria mõõdab ergastatud aatomituumade poolt kiiratud gammafootonite energiat, mis pooljuhtkristallis needlumisel loovad gammaspektri. Moodustavad iseloomulikud piigid, mis vastavad kindlatele gammakiirgavatele nukliididele. Spektri abil on võimalik kindlaks teha, milliseid radionukliide ja kui palju proovis esines. (Iskar ja Suursoo, 2013)

Sr-90 ja C-14 määramiseks on kasutatud vedelikstsintillatsiooni (ingl *liquid scintillation count* ehk LSC mõõtemetodit. LSC sobib tuvastamaks radionukliide, mis kiirgavad beetaosakesi. Mõõtmisele eelneb proovi materjali lahustamine happelises keskkonnas (*wet acidifying procedure*). Saadud lahus segatakse stsintillatsioonvedelikuga. Kui uuritav radionukliid kiirgab beetaosakesi, ergastub stsintillatsioonvedeliku molekul ning kiirgab relaxseerudes valgusfootoni. Kiirgunud valguse hulka on võimalik mõõta ning see on proportsionaalne beetaosakeste energiale. (Knoll, 2010). Sr-90 aktiivsuskontsentratsiooni tuvastatakse selle tütar nukliidi Y-90 kaudu. Spektrilt tuvastatav Y-90 energiahulk on võrdne aines oleva Sr-90 energiahulgale. (VacaP jt, 1998)

2. Materjal ja meetodid

Töö raames analüüsiti ehitusmaterjali mõõtetulemusi perioodist 2013-2025. Mõõtetulemused, millest analüüsi tegemisel lähtuti on failis Tammiku_Radionukliidide_tulemuste_andmebaas_uus.xlsx (Alara, 2025a), mille andis ette töö juhendaja. Andmestiku põhjal tehti statistilistel meetoditel analüüse hoidla betoonmaterjali seinte, põranda ja katteplakkide kohta.

Andmestikus on lisaks informatsioonile betoonmaterjali kohta mõõtmistulemused hoidla all olevast pinnasest. Pinnasest pärineb 11 proovi. Pinnaseproove töös ei analüüsita, sest need on kogutud hindamaks pinnase saastetaset ja ei anna infot ehitusmaterjali seisuga kohta. Andmestikus on, ilma pinnaseproove arvestamata, 127 proovi betoonmaterjalist, mis annab 652 radionukliidide aktiivsuskontsentratsiooni tulemust. Andmestikku on märgitud sektsioon, kust proov võeti, kas proov võeti seinalt, põrandalt või katteplakilt koos täpsustusega näiteks milline sein ja milline osa seinast. Proovide võtmist illustreeriv pilt lisas 3. Eristatakse pinnaproove, mis on tehtud sügavuselt <0,2 cm ja ruumi- ehk sügavusproove, mis on võetud 2-4 cm sügavuselt. Andmestikku on lisatud radionukliidi vabastamistase, mõõtmise kuupäev ja dekomissioneerimistööde etapi number koos selgitusega.

Andmestikus olevaid aktiivsuskontsentratsioonide tulemusi on mõõdetud järgmiste institutsioonide laborites: Keskkonnaamet, Tartu Ülikool, Leedu Füüsika Instituut.

Andmeanalüüsi tegemiseks ja tulemuste visualiseerimiseks kasutati MS Excel, JASP ja RStudio programme. Olukorras, kus radionukliidi mõõtmistulemus jäi allapoole mõõtemetodi määramispiiri, kasutati radionukliidi aktiivsuskontsentratsioonina määramispiiri väärtust.

Betoonmaterjali pinnaproovide analüüs käib I etapi ehk pindade puhastamise eelse etapi ja hilisemate mõõtmistulemuste võrdlusena. I etapist saadi tulemused 15 eri radionukliidi kohta, proovide arv oli 71, millest saadi 401 tulemust radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonide kohta. I etapil kogutud pinnaproovid on olnud otseses kontaktis radioaktiivsete jäätmetega ja mõõdetud aktiivsuskontsentratsioonide tulemused on võrreldes järgnevate etappide proovidega kõige kõrgemad. I etapil mõõdeti kõiki varasemalt (SKB, 2005) tuvastatud radionukliide.

Pindade puhastamise efektiivsuse analüüsiks võrreldakse omavahel puhastamata proove I etapist ning puhastatud proove II ja III etapist. II ja III etapist pärineb 77 pindade

aktiivsuskontsentratsioonide tulemust. Keskenduti radionukliidele, mis olid I etapis kõige märkimisväärsamad: C-14, Cs-137, Pb-210, Ra-226 ja Sr-90. II ja III etapi tulemusi saab vaadata koos, sest need on mõlemad puhastusjärgsed ja ei erine proovide võtmise mõistes üksteisest. II ja III etapi pinnaproovid kirjeldavad betoonmaterjali pinnakihi praegust seisust.

Analüüsimaks saastetaseme jõudmist sügavamatesse kihtidesse võrreldakse omavahel ruumiproove ja pinnaproove. Ruumiproove on kogutud I, II ja III etapi jooksul ja on oma omadustelt samad, kõik on võetud 2-4 cm sügavuselt. Ruumiproovide aktiivsuskontsentratsioonide tulemusi on kõikide etappide peale kokku 174. Ruumiproovide analüüs näitab, kas ja kui sügavale on saaste jõudnud.

Tammiku ehitusmaterjali vabastamise eesmärgil võrreldakse saadud mõõtmistulemusi radionukliidide kaupa keskkonnaministri määruses nr 40, 2021 lisas 4 kehtestatud vabastamistasemetega. Lisaks kasutatakse keskkonnaministri määruses kehtestatud summeerimisvalemit (peatükis 1.4.), et analüüsida materjali vastavust vabastamistingimusele seinte, põrandade ja katteplakkide kaupa.

Tammiku hoidla betoonmaterjalis leiduvad Ra-226 ja Pb-210 esinevad ka looduslikult, need tekivad uraan-238 radioaktiivse lagunemise reas (joonis 4). Inimtekkelise saaste väärtuste leidmiseks on vaja arvutada Ra-226 ja Pb-210 loodusliku fooni tasemed ning need ehitusmaterjali mõõtetulemustest lahutada. Selleks kasutati mõõtmistulemusi hoidla kasutamata sektsioonide 7, 8, 9 sise- ning väliskülgedest.

Käesolevas töös on kasutatud Anthropic keelemudelit Claude Sonnet 4 (2026) programmeerimise abivahendina, et luua Rstudio programmi kasutades joonis 16 peatükis 4.1.3 Pb-210. Selles töös pole kasutatud tehisintellekti teisteks tegevusteks nagu tekstiloomeks või kirjanduse ja tulemuste analüüsiks.

3. Tulemused

3.1. Foon

Loodusliku fooni arvutamiseks kasutati 21 Pb-210 aktiivsuskontsentratsiooni mõõtetulemust, mis pärinesid kasutamata sektsioonidest 7, 8 ja 9. Keskmiseks Pb-210 aktiivsuskontsentratsiooniks arvutati 0,667 Bq/g (tabel 2). Ra-226 mõõtetulemuste arv oli 25, mis andsid keskmiseks Ra-226 loodusliku fooni väärtuseks 0,03 Bq/g. Saadud keskmised on lahutatud edasistest Pb-210 ja Ra-226 aktiivsuskontsentratsioonide tulemustest.

Tabel 2. Loodusliku fooni arvutamiseks kasutatud mõõtetulemuste info Pb-210 ning Ra-226 kohta.

		Aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g)					
	Mõõte- tulemuste arv	Mediaan	Keskmine	Standard- hälve	Miinum	Maksimum	Vabastamis- tase
Pb-210	21	0,072	0,667	1,131	0,027	3,3	0,1
Ra-226	25	0,029	0,03	0,007	0,016	0,045	0,1

Tammiku ehitusmaterjalis on näha kõrged Pb-210 väärtused, mida põhjustab loodusliku Rn-222 olemasolu. Maapinnas asuv uraan (U-238) laguneb gaasiliseks radooniks (Rn-222), mis väljub pinnasest atmosfääri. Kui radoon jõuab pinnasest kinnisesse ruumi siis pole radoonil võimalik atmosfääri hajuda. Radoon ja selle lühikeste poolestusaegadega tütar nukliidid (joonis 4), kaasaarvatud neist pikima poolestusajaga Pb-210, sadenevad betooni pinnale, kus toimub Pb-210 kuhjumine. Juhul kui hoidla betoonpindadelt mõõdetud Pb-210 oleks looduslikust radoonist mõjutamata, oleks ootuspärane näha sekulaarset tasakaalu Pb-210 ning Ra-226 vahel, mis väljendub selles, et Ra-226 ja Pb-210 aktiivsuskontsentratsioonid on võrdsed.

3.2. I etapi analüüs

I etapist pärineb ehitusmaterjali pinnalt mõõdetud radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonide kohta 401 tulemust. Need proovid on võetud pärast jäätmete eemaldamist, kuid enne pindade puhastamist. Ehitusmaterjali pinda analüüsivad proovid ei ulatu sügavamale kui 0,2 cm. I etapil mõõdetud ruumiproovide ehk sügavamast kihist (2-4 cm) võetud proovide tulemusi selles alapeatükis ei käsitleta, vaid vaadeldakse koos hilisemate mõõtmistulemustega alapeatükis 3.4. Ruumiproovid.

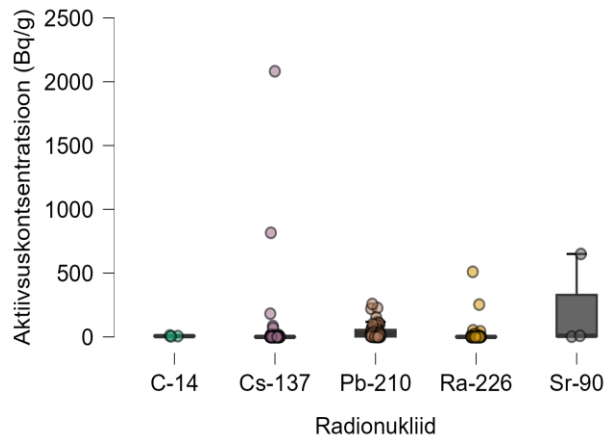
Radionukliidideks, mille aktiivsuskontsentratsioon oli üle vabastamistaseme, leiti: Am-243, C-14, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Pb-210, Ra-226, Sr-90. I etapil mõõdeti ka Am-241, Co-60, H-3, K-40, Ni-63, Pu(239+240) ning Th-232 aktiivsuskontsentratsioone ning nende tulemused olid vabastamistasemest madalamad.

3.2.1. Seinad

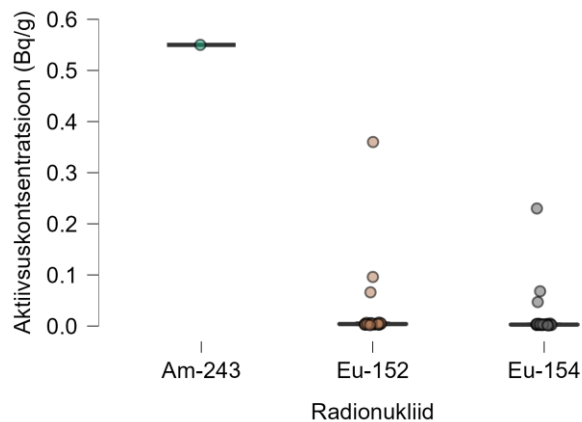
Seintelt võeti I etapis 55 proovi. Proovidest saadi 428 aktiivsuskontsentratsioonide tulemust, vabastamistaset ületas neist kokku 103 ehk 24% kõikidest võetud proovidest (lisa 1, tabel L1). Enim esines saastunud proovides radionukliide Ra-226 ja Cs-137 (joonis 5). Välja tuleb tuua ka radionukliid Sr-90, millest on võetud vähem proove, kuid mille puhul on vabastustaset ületanud proovide osakaal mõõdetud proovide seas oli suur. C-14 puhul ületas kolmest võetud proovist vabastamistaset (10 Bq/g) üks proov väärtusega 11,0 Bq/g. Sr-90 puhul ületasid kolm proovi kolmest vabastamistaset. Radionukliidi Am-232 on tuvastatud vabastamistasemest kõrgema aktiivsuskontsentratsiooniga ühel korral, hilisematel mõõtmistel seda radionukliidi enam ei esine. Eu-152 ja Eu-154 puhul ületas mõlemal juhul üks proov 19st vabastamistaset. Seintelt mõõdetud aktiivsuskontsentratsioonide väärtuseid, mis ületasid vabastamistasemeid esines järgmistel radionukliididel: Am-243, C-14, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Pb-210, Ra-226 ja Sr-90. Joonisel 5 on toodud radionukliidid, mis ületavad vabastamistaset ja omavad kõrgeid väärtuseid (>1 Bq/g). Joonisel 6 on kujutatud radionukliidid, mis ületavad vabastamistaset, kuid mille väärtused jäävad alla ühe Bq/g.

Mõõtetulemusi visualiseeritakse selles peatükis karpdiagrammidena, kus iga aktiivsuskontsentratsiooni tulemus on esitatud punktina. Kvartiilid moodustavad karbi piirid, mille

vahele jääb kriipsuna mõõtmistulemuste mediaan. Karbist väljuvad vurrud, mille tippudeks on maksimum- ja miinimumväärtused, aga kui leidub arve, mis jäävad mediaani kaugusest kaugemale kui poolteist kvartiili ehk kui tegu on ekstreemsete väärtustega, on need tähistatud iseseisvate punktidenä.



Joonis 5. Seinte I etapi kõrgete väärtustega radionukliidide tulemused.

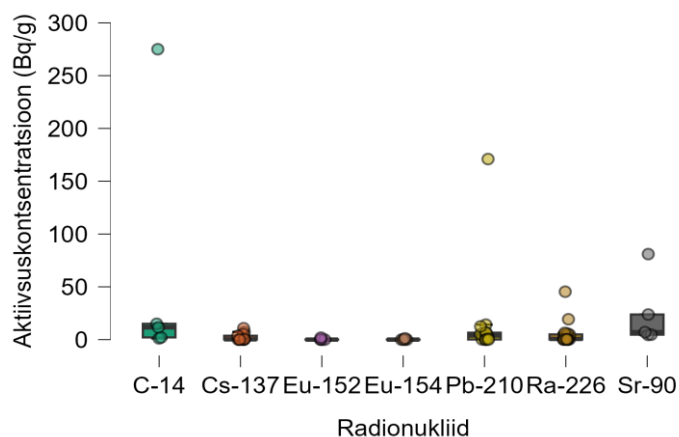


Joonis 6. Seinte I etapi radionukliidid vabastamistasemega (0,1 Bq/g).

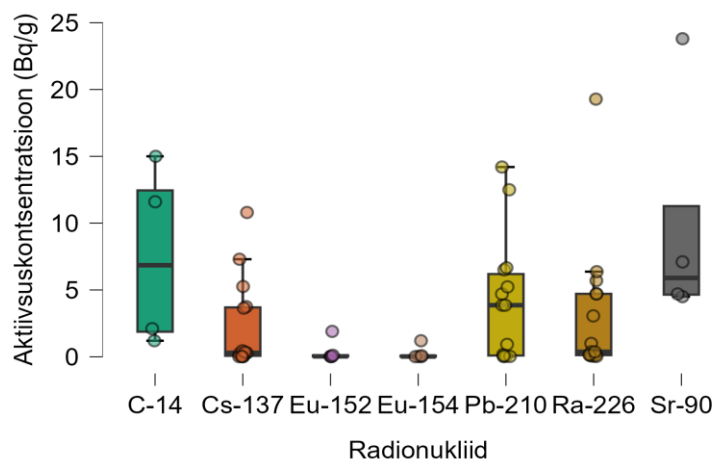
3.2.2. Põrand

Põrandaproovidest saadi 66 aktiivsuskontsentratsioonide tulemust, vabastamistaset ületas neist kokku 33 (50% kõikidest proovidest). Põrandaproovidest ületasid vabastustaset C-14, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Pb-210, Ra-226 ja Sr-90 (joonised 7 ja 8). Proovide täpsemad andmed on näidatud tabelis L2 (lisa 1). I etapi põrandaproovide tulemustest tuleb tähelepanu pöörata radionukliididele

C-14, Ra-226 ja Sr-90. Nendel radionukliididel oli suurim vabastamistaset ületavate proovide osakaal proovide koguarvust. I etapil mõõdeti põrandas enim vabastamistaset ületanud tulemusi sektsioonidest 4 ja 2B. Hüpoteesi - põrand on betoonmaterjalist saastunuim - toetab vabastamistaset ületanud proovide hulk kõikide proovide kohta (50%). I etapi kõrgeim mõõdetud aktiivsuskontsentratsioon pärineb samuti I etapil mõõdetud põrandaproovist: sektsioonist neli mõõdetud Cs-137 pinnaproov tulemusega 6737 ± 325 Bq/g. Kuna põrand puutus enim kokku radioaktiivsete jäätmetega, on kõrgeima saastetase paiknemine põrandas tõenäoline. Täpsemalt analüüsitakse seda hüpoteesi peatükis 4.



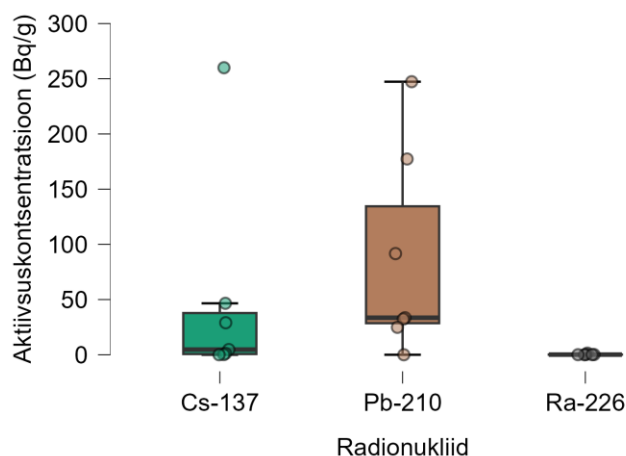
Joonis 7. Põranda I etapil vabastamistaset ületanud radionukliidid. Graafikult puudub üks Cs-137 tulemus väärtusega 6737 Bq/g.



Joonis 8. Põranda I etapil vabastamistaset ületanud radionukliidid ilma üksikute kõrgemate tulemusteta (välja jäetud maksimumväärtused C-14, Pb-210, Ra-226 ja Sr-90 puhul, neid on võimalik leida lisa 1 tabelist L2).

3.2.3. Katteplokid

Katteplokkidelt tehti enne puhastamist 30 proovi, millest 14 (46,6%) ületasid vabastamistaset (lisa 1, tabel L3). Mõõdeti Am-241, Cs-137, K-40, Pb-210, Pu-(239+240), Ra-226 ning Th-232 aktiivsuskontsentratsioone. Radionukliidid, mis ületasid vabastamistaset olid Cs-137, Pb-210 ning Ra-226.



Joonis 8. Katteplokkide I etapil vabastamistaset ületanud radionukliidid.

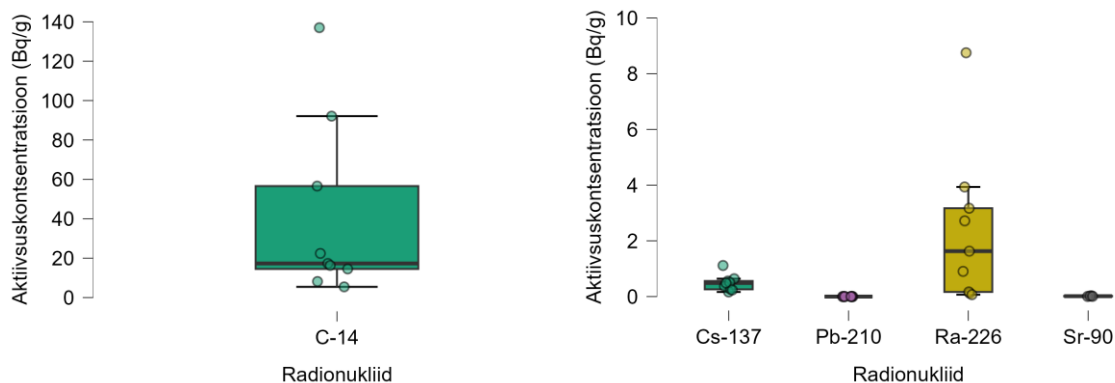
3.2.4. Eu-152, Eu-154

I etapis on leitud euroopiumi radionukliidide puhul vabastamistaseme (0,1 Bq/g) ületamine viiel korral. Tegelikult jäid I etapis mõõdetud Eu-152 ja Eu-154 väärtused alla määramispiiri, mis oli mõõtmiste jaoks ebasobiv ehk kõrgemal vabastamistasemest. Mõõdetud väärtusteks, mis ületasid I etapil vabastamistaset, olid 0,36; 0,11; 1,9; 0,23 ning 1,2 Bq/g (väärtused vastavad määramispiirile ehk tegelik aktiivsuskontsentratsioon on sellest väärtusest väiksem). Need tulemused pärinesid sektsiooni 3B seinast ning sektsioonide 3B ning 4 põrandast. Hilisemates mõõtmistulemustes Eu-152 ega Eu-154 ei tuvastatud. Saab järeldada, et I etapis polnud tegu kõrgete Eu-152 ning Eu-154 aktiivsuskontsentratsioonidega, vaid mõõtemetodi määramispiir oli ebasobiv.

aktiivsuskontsentratsioone mõõdetud. Kogu seina usaldusväärseks kirjeldamiseks oleks vaja koguda rohkem proove, millelt C-14 ja Sr-90 aktiivsuskontsentratsioone mõõta.

3.3.2. Põrand ja katteplokid

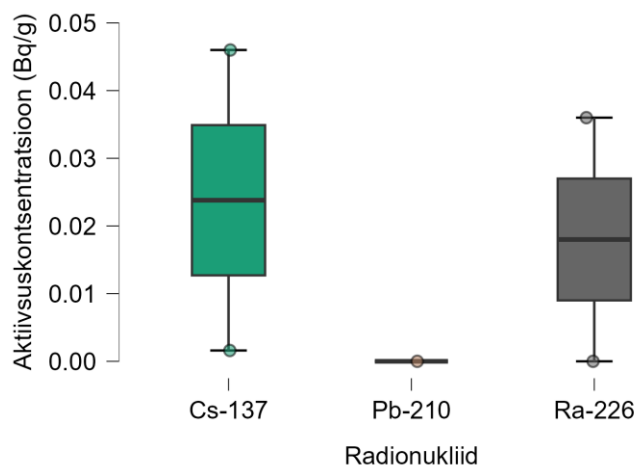
Põrandaproovidest on II ja III etapist 40 mõõtmistulemust. Vabastamistaset ületas nendest 16 ehk 40% (lisa 1, tabel L5). Vabastamistaset ületasid C-14, Cs-137 ning Ra-226 (joonis 10). Sr-90 kohta võeti 4 proovi, millest ükski vabastamistaset ei ületanud. Põrandat ei saa praeguste pinnaproovide põhjal pidada Sr-90st puhtaks, sest ruumiproovidest on tuvastatud vabastamistaset ületavaid tulemusi. Arvesse tuleb võtta, et põrandalt on võetud vaid üks ruumiproov, mis ületas Sr-90 vabastamistaset, kuid see ei anna usaldusväärset pilti kogu põranda saastetaseme kohta.



Joonis 10. Põranda II ja III etapi radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonid.

Ra-226 puhul, ületas vabastamistaset kaheksa mõõtmistulemust üheksast. C-14 kohta on saadud üheksa mõõtmistulemust, millest seitse ületasid vabastamistaset (10 Bq/g). Cs-137 puhul ületas vabastamistaset (1 Bq/g) üks proov kümnest.

Pärast puhastamist on katteplokkidelt võetud 2 proovi ja saadud 5 aktiivsuskontsentratsioonide tulemust Cs-137, Pb-210 ja Ra-226 kohta (lisa 1, tabel L8). Kõik saadud aktiivsuskontsentratsiooni tulemused olid madalamad vabastamistasemest (joonis 11).



Joonis 11. Puhastatud katteplakkide II ja III etapi radionukliidide aktiivsuskontsentratsioonid.

3.4. Ruumiproovid ehk saaste jõudmine sügavamatesse kihtidesse

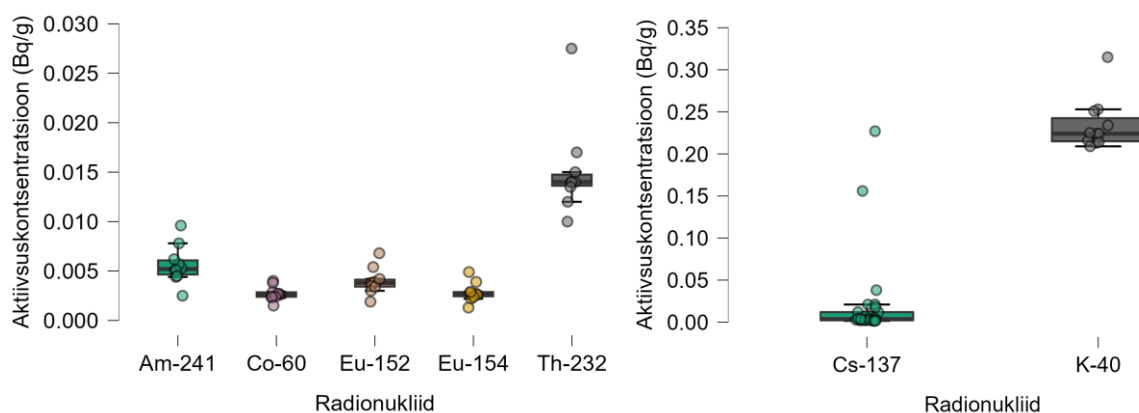
Eristada saab pinna- ning ruumiproove. Pinnaproovid on võetud otse betooni pinnalt, mitte sügavamalt kui 0,2 cm. Ruumiproovid on võetud betoonist 2-4 cm sügavuselt. Ruumiproovid annavad selge ülevaate, millised radionukliidid on põhjustanud betooni sügavamate kihtide saastumise. Ruumiproovide puhul ei pea arvestama mõõtmisetappidega, sest mõõtmised on tehtud sügavamast betooni kihist, milleni puhastamine ei ulatanud. Ka I etapis mõõdetud proovid annavad praeguse ni kehtivat infot betooni sügavamate kihtide saastetaseme kohta, kuna ruumiproovid on puhastamisest mõjutamata.

I etapis võeti 29 ruumiproovi, mis andis 159 aktiivsuskontsentratsioonide tulemust. Radionukliidid, mida mõõdeti, kuid mille puhul mõõtmistulemused ruumiproovides vabastamistaset ei ületanud, olid Am-241, C-14, Co-60, Eu-152, Eu-154, H-3, K-40, Ni-63, Th-232. Mõnede eelmainitud radionukliidide puhul nagu Am-241, Co-60, Eu-152, Eu-154 ja Ni-63 oli mõõdetud aktiivsuskontsentratsioon madalam määramispiirist. Mõõdeti ka radionukliide Cs-137, Pb-210, Ra-226 ja Sr-90.

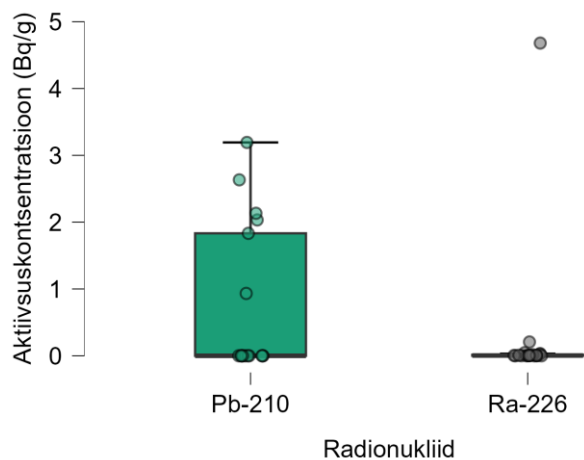
II ja III etapist pärineb 5 ruumiproovi, mis andis 15 aktiivsuskontsentratsioonide tulemust. Radionukliidid, mille aktiivsuskontsentratsioone II ja III etapi käigus mõõdeti, olid Cs-137, Ra-226, ja Pb-210.

Seinte ruumiproovide arv on 21 ning aktiivsuskontsentratsioonide tulemusi saadi 116 (lisa 1, tabel L7). Lisaks on võetud 5 proovi ja saadud 19 tulemust välisseinast. Välisseina ruumiproovid näitavad loodusliku fooni taset, neid proove kasutati eelnevalt fooni arvutamiseks ja selles peatükis ei käsitleta.

Seinte puhastatud pinnaproovide tulemused on sarnased ruumiproovidega. Vabastamistaset ületavad radionukliidid Pb-210 ja Ra-226. Proove on võetud ka järgmiste radionukliidide kohta: Am-241, Co-60, Cs-137, Eu-152, Eu-154, K-40 ning Th-232. Nende tulemused jäid alla vabastamistaseme (joonis 12).



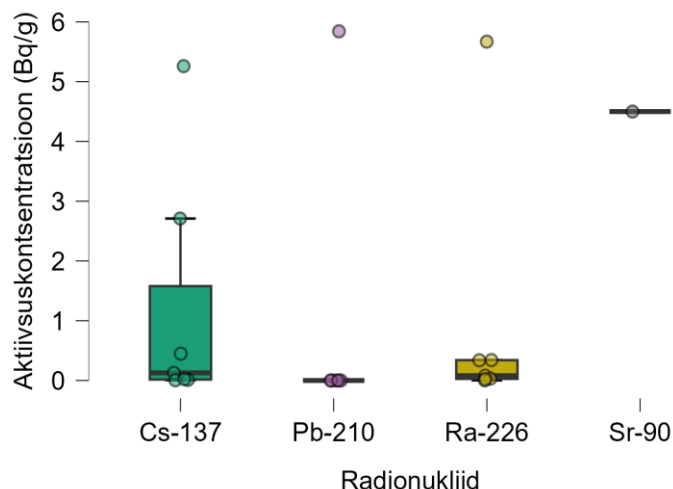
Joonis 12. Seina ruumiproovid, mis ei ületa vabastamistaset.



Joonis 13. Seina ruumiproovide Pb-210 ja Ra-226 tulemused.

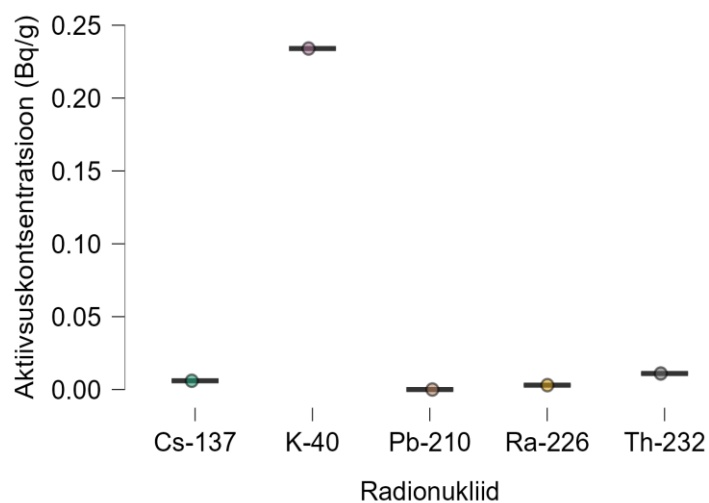
Suuremalt jaolt (19 proovi 21st) jäävad inimtekkelise Ra-266 tulemused alla vabastamistaseme (joonis 13). Seinte ruumiproovides esineb Ra-226 puhul vabastamistaseme ületamist kahel korral (väärtustega 4,68 ja 0,207 Bq/g) ja betoonseinte sisemus on üldiselt puhas, mida kinnitab Ra-226 mediaan väärtusega 0,004 Bq/g.

Põranda ruumiproovid (lisa 1, tabel L8) näitavad sarnaseid tulemusi II ja III etapi mõõtmistulemustega. Ruumiproovides ületavad mõõtmistulemusi 4 radionukliidi: Cs-137, Pb-210, Ra-226 ja Sr-90 (joonis 14). Suurima saastunud proovide osakaaluga on Sr-90 mõõtetulemused - saadud on üks mõõtetulemus (väärtusega 4,5 Bq/g), mis ületas vabastamistaset (1 Bq/g). Vabastamistaset ületav proov pärineb I etapist. Cs-137 ületab vabastamistaset kahes proovis seitsmest, Pb-210 puhul üks proov kuuest ja Ra-226 puhul kolm proovi seitsmest.



Joonis 14. Põranda ruumiproovides vabastamistaset ületavad radionukliidid

Katteplokkidest on võetud 5 radionukliidi (Cs-137, Ra-226, Pb-210, K-40, Th-232) aktiivuskontsentratsiooni määramiseks üks proov (lisa 1, tabel L9). Proov pärineb sektsioonist 4. Ükski tulemus vabastamistaset ei ületanud (joonis 15).



Joonis 15. Katteplakkide ruumiproovi tulemused.

Ruumiproovidest tuvastati vabastamistaseme ületamist radionukliidide C-14, Cs-137, Ra-226 ja Sr-90 puhul. Probleemseimaks radionukliididiks on Sr-90, mida mõõdeti põranda betoonplakkidest, kuid mitte seintest ega katteplakkidest.

4. Arutelu

4.1. Järeldused probleemsetest radionukliididest

4.1.1. C-14

Põrandat saab pidada kohati C-14ga saastunuks, sest puhastamise eelsed ja järgsed tulemused ei erine üksteisest märkimisväärselt. I etapil ületas vabastamistaset (10 Bq/g) 75% pinnaproovidest (aritmeetiline keskmine aktiivsuskontsentratsioon 75,9 Bq/g) ning II ja III etapil 77% pinnaproovidest (aritmeetiline keskmine aktiivsuskontsentratsioon 41,1 Bq/g). Põrandast pärineb 1 ruumiproov, mis on küll alla vabastamistaseme, kuid kuna senise puhastamise käigus on C-14 keskmine aktiivsuskontsentratsioon jäänud vabastamistasemest kõrgemaks, saab arvata, et saaste võib ulatuda pinnast sügavamale.

Seintest pärineb üks proov, mis jääb alla vabastamistaseme. Seinade ruumiproovid puuduvad. Nende andmete põhjal ei saa kinnitada seinte puhtust.

Katteplokkidest tulemused puuduvad. Võttes arvesse trendi radionukliide puhul, mille kohta pärineb rohkem andmeid (nt Cs-137 ja Ra-226), kus seinte ja katteplokkide aktiivsuskontsentratsioonide väärtused on põranda aktiivsuskontsentratsioonidest madalamad, saab arvata, et see on kehtib ka C-14 puhul. Lõplikku hinnangut ehitusmaterjali puhtusele C-14st pole võimalik anda, kuna puuduvad mõõtmisandmed.

4.1.2. Cs-137

Puhastatud põrandaproovidest on näha, et Cs-137 aktiivsuskontsentratsiooni tase ületab kohati (1 tulemus 9st ehk 11%) vabastamistaset, kuid puhastatud põrand, keskmise aktiivsuskontsentratsiooniga 0,482 Bq/g, on palju madalamate väärtustega võrreldes I etapi mõõtmistulemustega, kus vabastamistaset ületas 5 proovi 10st (50%) ning aktiivsuskontsentratsiooni keskmine oli 676,4 Bq/g. Pindade puhastamine on viinud pinnaproovide aktiivsuskontsentratsiooni taseme alla vabastamistaseme. Küll aga esineb põranda ruumiproovides vabastamistaseme ületamist (2 tulemust 7st). Praeguste tulemuste järeldusena

saab kinnitada, et Cs-137 saaste on põrandaplokkides üle vabastamistaseme ja ulatub ka betooni sügavamatesse kihtidesse.

Seinu saab pidada Cs-137-st puhtaks. Võrreldes puhastamata ja puhastatud proove on näha, et pärast puhastamist (kõigi 10 mõõtmistulemuse puhul) on nende aktiivsuskontsentratsioonid vabastamistasemest madalamad. Samuti ei esine Cs-137 vabastustaset ületavaid tulemusi seinte ruumiproovides (26 mõõtmistulemust).

Kuigi katteplakkide kohta on puhastusjärgseid mõõtmistulemusi ning ruumiproove vähe (2 pinna- ja 1 ruumiproov), saab olemasolevate proovide põhjal järeldada, et katteplakid on sarnased seintele, mitte põrandale. Ükski puhastamisjärgsetest mõõtetulemustest (pinna- ega ruumiproov) vabastamistaset ei ületanud. Enne puhastamist esines katteplakkidel vabastamistaseme ületamist. Kuigi praegused tulemused on näidanud vabastamistasemest madalamaid tulemusi, on need ebapiisavad katteplakkide puhtuse hindamiseks. Katteplakidelt on vaja võtta täiendavaid mõõtmisi.

4.1.3. Pb-210

Tammiku hoidlas on loodusliku radooni lagunemise tõttu Pb-210 aktiivsuskontsentratsioonid väga kõrged pinna- ning ka ruumiproovides. Analüüsides Pb-210 aktiivsuskontsentratsiooni tulemusi sektsioonide kaupa (joonis 16) on näha, et joonistub erinevus kasutatud ja kasutamata sektsioonide vahel, kus kasutatud sektsioonides mõõdetud tulemused on kõrgemad kasutamata sektsioonidest. Sellest saab järeldada, et hoidla sektsioonides 1-6 esinev Pb-210 pärineb tõenäoliselt Ra-226 sisaldanud radioaktiivsetest jäätmetest (Kiisk, 2023) lisaks loodusliku Rn-222 lagunemisel tekkinud Pb-210le.

Pb-210 aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g) sektsioonides



Joonis 16. Pb-210 aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g) hoidla sektsioonides 1-9 koos loodusliku fooniga. Miinimumväärtused sektsioonides 3A, 3B ja 4 jäävad alla määramispiiri väärtuse. Sektsioonist 7 puuduvad mõõtetulemused.

Pb-210 aktiivsuskontsentratsioonide varieeruvus on suur. Puhastatud pindadel esinevad enamasti madalad väärtused, kuid seinte ruumiproovides on Pb-210 aktiivsuskontsentratsiooni väärtused kõrged. Kõrged aktiivsuskontsentratsiooni tulemused pärinevad peamiselt sektsioonidest 8 ja 9. Pb-210 tulemuste suur varieeruvus teeb keeruliseks lõppjäreldeste tegemise, aga tehtud jooniselt (joonis 16) on näha, et Pb-210 väärtusi ei saa seletada vaid loodusliku fooniga. Pb-210 on osaliselt hoidlasse akumulunud ka seal laguneva Ra-226 tõttu.

4.1.4. Ra-226

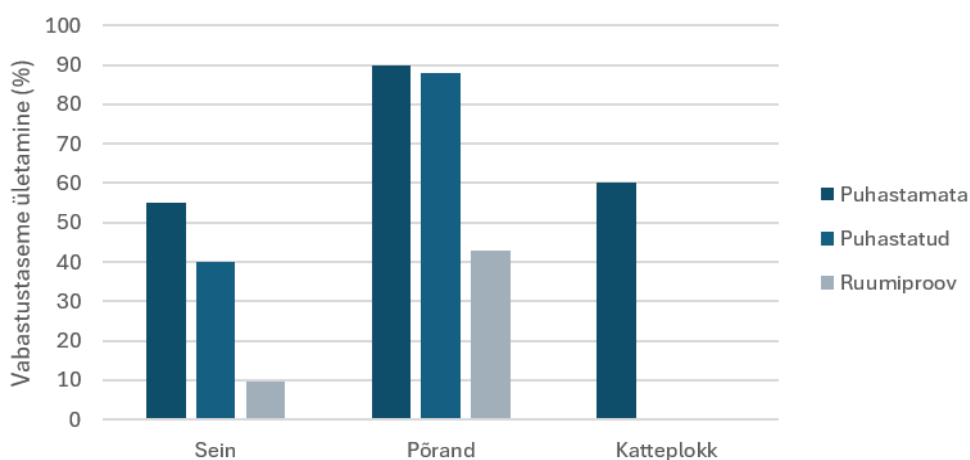
Fooni lahutamine peatükis 3.1. mõjutas viit Ra-226 proovi, mis varem ületasid vabastamistaset ning pärast fooni lahutamist enam mitte. Need proovid olid:

- Sektsioon 2A põranda ruumiproov
- Sektsioon 5 puhastamata seina pinnaproov
- Sektsioon 5 puhastamata seina pinnaproov
- Sektsioon 6 katteploki ruumiproov
- Sektsioon 1B puhastatud seina pinnaproov

Seintelt pärinevatest mõõtmistulemustest on näha, kuidas puhastamise mõjul saastetase väheneb. Puhastamata seintel ületas 55% tulemustest vabastamistaset, puhastatud seintel 40% ning ruumiproovidel 9,5% tulemustest. Seinte puhul on puhastatud pinnad veel suurel hulgal saastunud. Seintest pärineb 21 ruumiproovi, esines kaks vabastamistaset ületamist sektsioonides 2B ning 3A. Seintes asuva Ra-226 aktiivsuskontsentratsioonide mediaaniks on 0,004 Bq/g. Seinte ruumiproovides esineb kahel korral vabastamistaseme ületamist, kuid suures osas on sügavam kiht Ra-226 saastest puutumata.

Põrandast tuvastati enne puhastamist vabastustaseme ületust 9 proovi puhul 10st (mediaaniga 3,85 Bq/g). Pärast puhastamist ületas vabastamistaset 8 proovi 9st (88%), pindade mediaaniks saadi siis 1,63 Bq/g. Sügavamas kihis ületas vabastustaset 3 proovi 7st (43%). Kõikide ruumiproovide mediaaniks saadi 0,08 Bq/g. Põranda puhastatud pinna- ning ruumiproovidest pärinevad hoidla kõige kõrgemad Ra-226 aktiivsuskontsentratsioonid. Puhastamisjärgselt on põranda pinnad veel saastatud. Vabastustaseme ületamist esineb ka põranda ruumiproovides.

Katteplakkide puhul oli puhastuseelsete ning -järgsete proovide arv kõige väiksem. Võetud on kaks puhastamise järgset proovi ja üks ruumiproov. I etapil tuvastati vabastustaseme ületamine 60% proovidel. Puhastatud pindade proovid ja ruumiproovid ei ületa vabastamistaset. Katteplakkide saastatuse hindamiseks on vajalik teha täiendavaid mõõtmisi.



Joonis 17. Ra-226 vabastustaset ületavate proovide osakaal (%) kõikidest proovidest.

Ra-226 on Tammiku hoidlas üks enimesinev radionukliid ning varasemate etappide käigus pole suudetud kogu betoonmaterjali Ra-226 saastest puhastada.

4.1.5. Sr-90

Põranda puhul ületasid kõik ruumiproovid (1 proov) ning puhastamata pinnaproovid (4 proovi) vabastamistaset. Puhastusjärgselt on põrandalt võetud 4 pinnaproovi, mis vabastamistaset ei ületa. Kõik seintelt võetud puhastamata pinnaproovid (3 proovi) ületasid samuti vabastamistaset. Pärast puhastamist on seintelt võetud 2 pinnaproovi, mis on madalamad vabastamistasemest. Katteplakkidelt pole Sr-90 analüüsiks proove võetud.

Kolmandast etapist pärinevad proovide tulemused näitavad pindade puhastamise efektiivsust. Puhastamiselsete põranda proovide aktiivuskontsentratsioonid jäävad vahemikku 4,5 kuni 81 Bq/g. Järgnevate etappide proovid on vahemikus ($<0,005$ (alla määramispiiri) kuni 0,0272 Bq/g (alla vabastamistaseme). Seintelt võetud proovide puhul oli muster sama, enne puhastamist jäid Sr-90 aktiivuskontsentratsiooni tulemused vahemikku 1,8 - 650 Bq/g (3 proovi). Puhastusjärgsete proovide tulemused ($<0,02$ (alla määramispiiri) ning 0,0117 Bq/g on eelnevatest kordi väiksemad. Seintest ruumiproove võetud pole, kuid on võimalik, et seinad on pärast puhastamist saastest vabad ning saaste ei ulatu sügavale. Selle näiteks: I etapil mõõdeti pinnaproov, väärtusega 650 Bq/g, sektsioonist 3B (sein C, ruut d3). Pärast puhastamist on samast kohast võetud täiendav pinnaproov, mille väärtus jäi alla määramispiiri ($<0,02$ Bq/g).

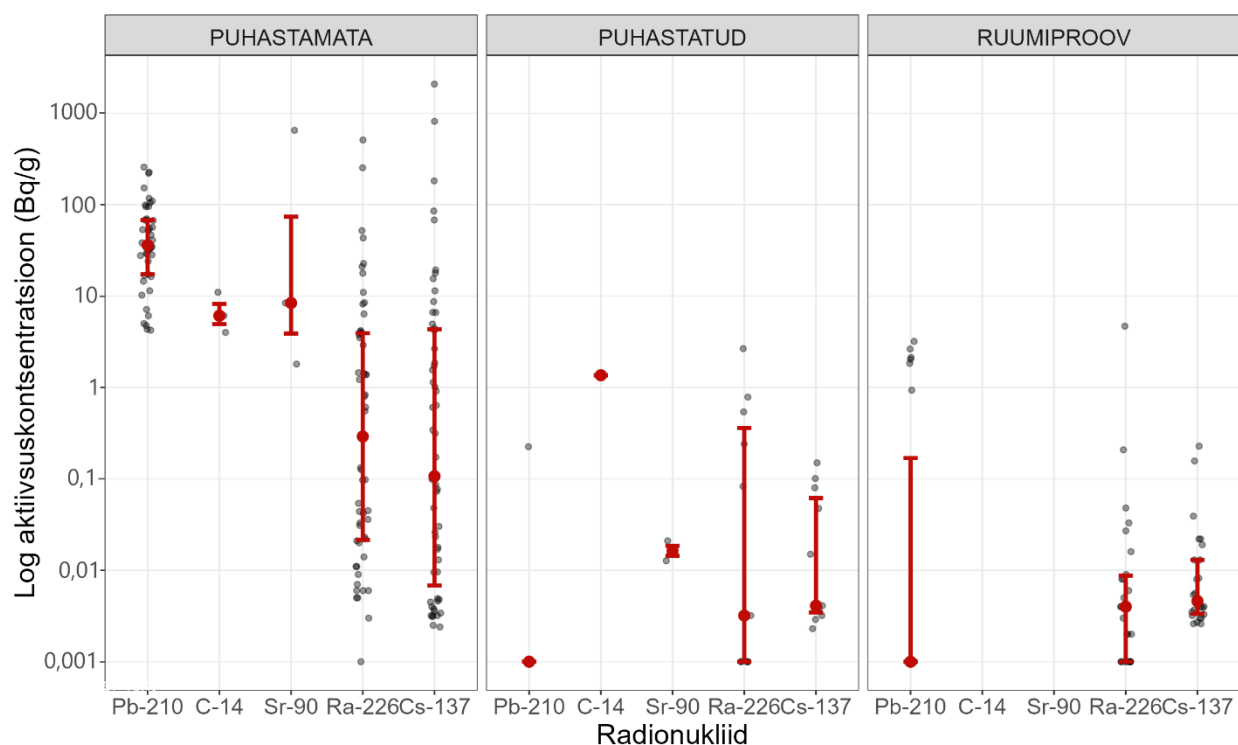
Põranda vabastamistaset ületav ruumiproov kinnitab vajadust põhjalikema mõõtmiste järgi eriti põrandaplokkide puhul. Uute mõõtmistulemuste abil oleks võimalik välja selgitada kas esineb veel kohti, kus Sr-90 aktiivuskontsentratsioon võib vabastamistaset ületada. Praegused tulemused pole piisavad, et hinnata betooni puhtust Sr-90st.

4.2. Järeldused ehitusmaterjali puhtusest

Kasutamata sektsioonides 8 ja 9 mõõdetud radionukliidide (välja arvatud Pb-210) aktiivuskontsentratsioonid on madalamad vabastamistasemest. I etapil võetud pinna- ning ruumiproovid näitasid kõikide mõõdetud radionukliidide (välja arvatud Pb-210, mis pole nendes sektsioonides inimtekkelist päritolu) puhul vabastamistasemest madalamat aktiivuskontsentratsiooni. II ja III etapil võetud lisaproovid samadest sektsioonidest kinnitasid betoonseinte puhtust. Pb-210 kõrgeid aktiivuskontsentratsiooni tasemeid pinnal ning sügavamates kihtides saab pidada looduslikult tekkinuks. Kasutamata sektsioonist 7 puuduvad

mõõtetulemused. Sektsioonis 7 paiknes proovide saamiseks kasusel olev kraana, mida kasutati katteplakkide tõstmiseks ja sektsioonidesse ligipääsu saamiseks. Sektsioonide 8 ja 9 põhjal võib arvata, et ka sektsioon 7 on saastest puhas ja esineb vaid looduslikult tekkinud Pb-210 saaste.

Betoonis leiduvate radionukliidide analüüsiks on võrreldud proove puhastamata, puhastatud ja sügavamast kihist seinte (joonis 18), põranda (joonised 19 ja 20) ja katteplakkide (joonis 21) kaupa. Võrdlusest selgub puhastusjärgne aktiivsuskontsentratsiooni vähenemine ning aktiivsuskontsentratsioonide vähenemine sügavamal kihis. Joonised, mis näitavad puhastamata pindadelt mõõdetud tulemusi (18 ja 19) on paremaks visualiseerimiseks viidud logaritmilisse skaalasse. Ruumiproovide ja puhastatud pinnaproovide võrdlemine on oluline, et teada saada kui palju need üksteisest erinevad. See iseloomustab, kui suures mahus materjal saastunud on.



Joonis 18. Seina mõõtmistulemuste võrdlus logaritmilisel skaalal. Siin ja järgnevatel joonistel visualiseerib kvantiile punane joon, millel asuv punane punkt tähistab mediaani. Kõik aktiivsuskontsentratsiooni väärtused on toodud hallide punktidenä. Punasest joonest kaugemal asuvad punktid on mediaanist kaugemal kui 1,5 kvantiili.

Seinte puhul saab analüüsida saaste jõudmist sügavamatesse kihtidesse Ra-226 järgi. C-14 ja Sr-90 puhul ei saa teha võrdlust sügavamate kihtidega, sest puuduvad ruumiproovide

mõõtmistulemused. Seintelt pärinevad Cs-137 väärtused on puhastatud pinnal ning ruumiproovides madalamad vabastamistasemest ja pinna- ning ruumiproovide vahel erinevus puudub.

Ra-226 aktiivsuskontsentratsiooni väärtus ületas seinte puhastatud pindadel neljal korral 11st vabastamistaset. Ruumiproovidest ületas Ra-226 vabastamistaset 2 tulemust 26st. Ülejäänud käsitletavate radionukliidide puhul (C-14, Cs-137, Sr-90) ei esinenud puhastatud pindadel vabastamistaseme ületamist. Selle põhjal saab arvata, et seintel esineb kohatist saastet pinnal, aga sügavamates kihtides on seinad Cs-137 mõjutamata, Ra-226 puhul on tegu pigem pinnasaastega, mis ulatub kohati sügavamatesse kihtidesse ning C-14 ja Sr-90 kohta oleks vajalik teha seintest kinnitavaid proove.

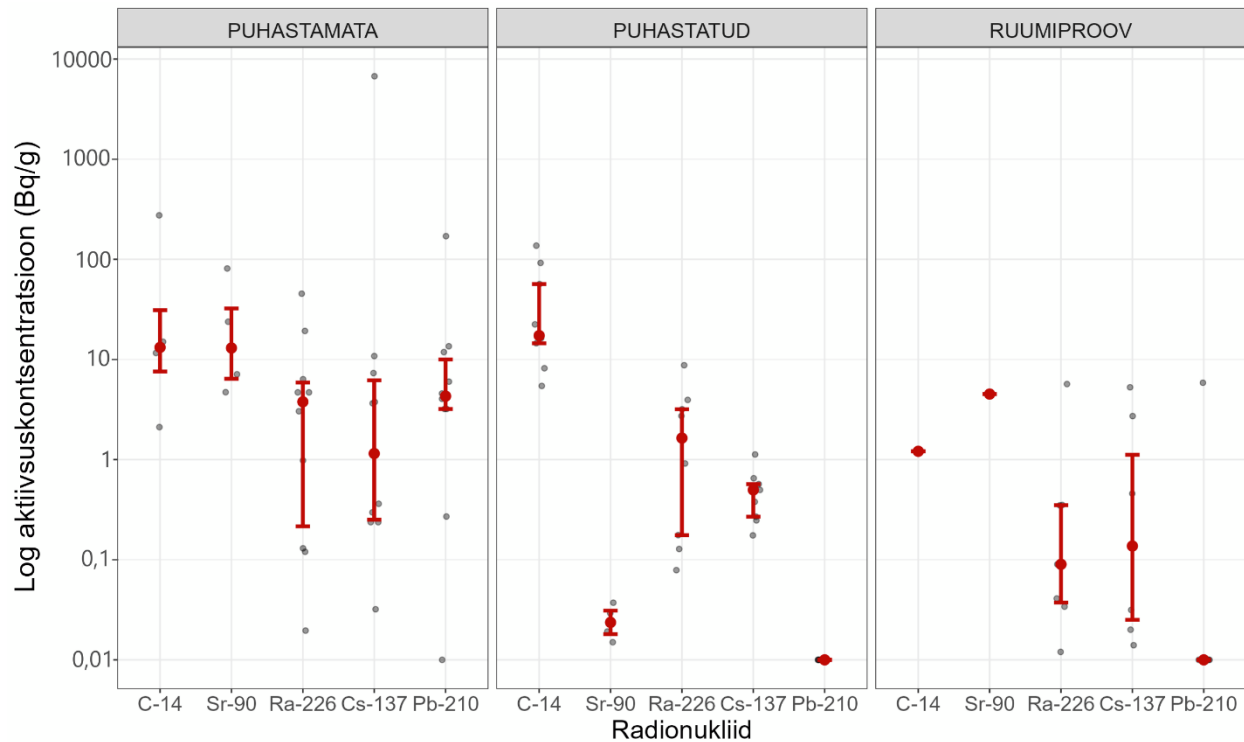
Summeerimisvalemi tulemuste saamiseks vaadatakse puhastatud pinnaproove koos ruumiproovidega ja võetakse arvesse nende aritmeetilist keskmist. Arvestatakse kõikide tuvastatud radionukliidide väärtuseid. Iga radionukliidi keskmine jagatakse radionukliidile vastava vabastamistasemega ning seejärel liidetakse tulemused (vt 1.4. Vabastamine). Seinte summeerimisvalemi tulemuseks arvutati 3,74 (tabel 3), mis ületab vabastamisnõuet: summeerimisvalemi väärtus peab olema <1 (Kiirgusseadus, 2025). Tabelis 3 on toodud radionukliidide aritmeetilisele keskmistele lisaks mediaanide väärtused. Selle eesmärk on võrrelda aritmeetilisel keskmisel põhinevat summeerimisvalemi väärtust mediaanidel põhinevaga. Erinevus tuleb sellest, et aktiivsuskontsentratsioonid ei jagune normaaljaotuse järgi.

Tabel 3. Seinte summeerimisvalemis kasutatud puhaste pindade ja ruumiproovide keskmised aktiivsuskontsentratsioonid koos vabastamistasemetega.

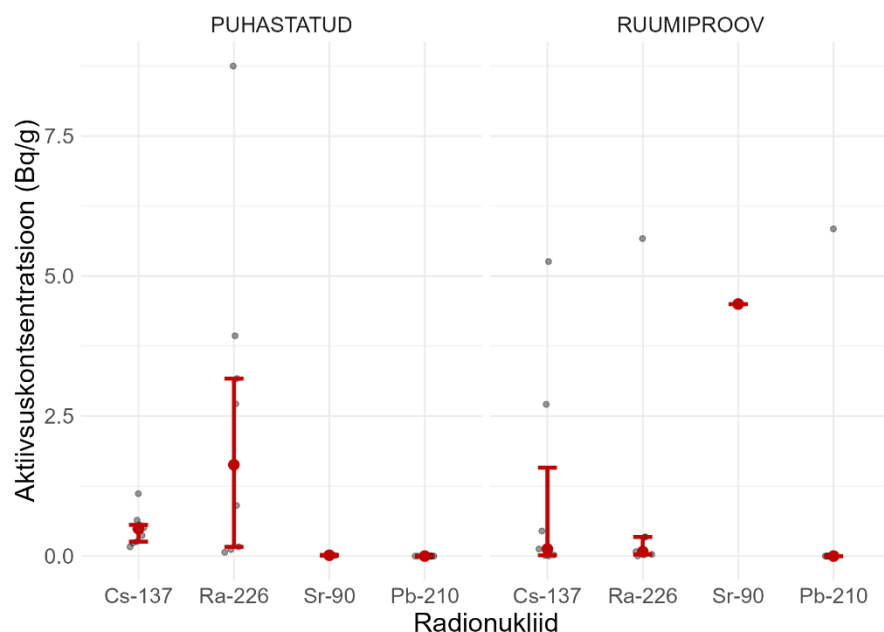
	C-14	Am-243	Co-60	Cs-137	Eu-152	Eu-154	K-40	Ra-226	Th-232	Sr-90	Summeerimisvalemi väärtus
Mediaan (Bq/g)	1,36	0,005	0,003	0,0065	0,004	0,003	0,224	0,023	0,014	0,02	0,57
Aritm. Keskmine (Bq/g)	1,36	0,006	0,003	0,033	0,004	0,003	0,234	0,336	0,015	0,016	3,74
Vabastamistase (Bq/g)	10	0,1	0,1	1	0,1	0,1	10	0,1	1	1	

Põrandaproovide puhul esineb vabastamistaseme ületamist puhastamata ja puhastatud pindade ning ruumiproovide puhul (joonis 19). Põrandaplokkides esineb suurim tuvastatud saastetase, kuid

on näha erinevust põrandaplokkide pindmiste ja sügavamate kihtide vahel (joonis 20). Uuritavate radionukliidide, välja arvatud Sr-90, puhul on näha trendi aktiivsuskontsentratsioonide mediaani vähenemisega sügavamates kihtides. Sr-90 erinevust trendist saab selgitada väga väheste proovide arvuga. Samuti ilmnes C-14 ja Ra-226 maksimumväärtuste langemine sügavamates kihtides.



Joonis 19. Põranda mõõtmistulemuste võrdlus logaritmilisel skaalal.



Joonis 20. Põranda puhastatud pinna võrdlus ruumiproovidega. Võrdlusest on välja jäetud C-14, mille kohta pärineb 1 ruumiproovi tulemus, puhastatud pinna C-14 tulemused on toodud joonisel 20.

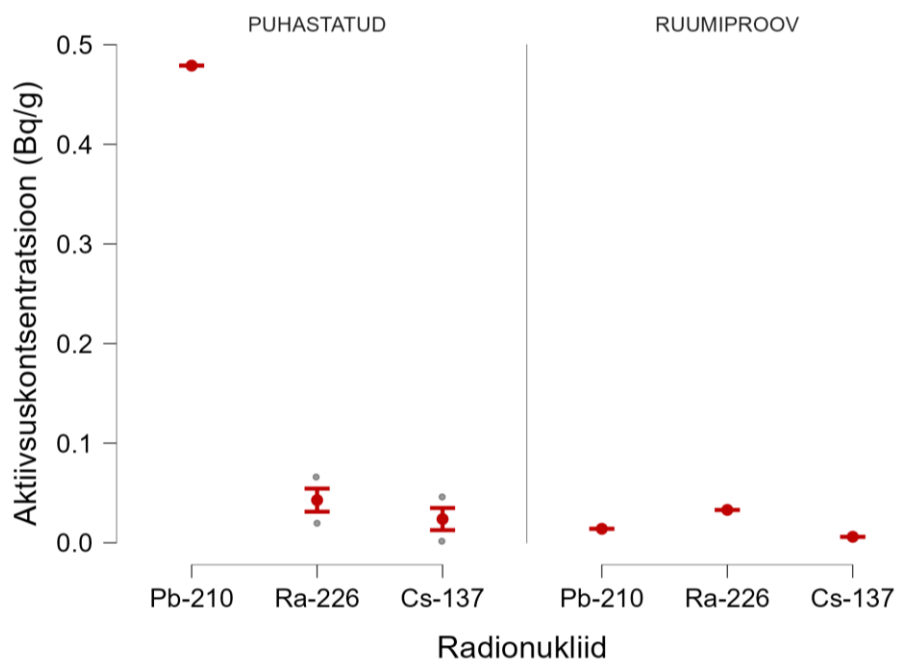
Põranda saastetase seis on puhastamisega paranenud, mida kinnitab aktiivsuskontsentratsiooni mediaani langus, siiski esineb vabastamistaseme ületamist ka sügavamates kihtides Cs-137, Ra-226, Pb-210 ja Sr-90 puhul ja põrandat ei saa pidada saastest puhtaks. Rakendades summeerimisvalemit põranda puhastatud pindadele ning ruumiproovidele on tulemuseks 22,17 (tabel 4), mis ületab vabastamise nõuet: summeerimisvalemi väärtus peab olema <1 (Kiirgusseadus, 2025).

Tabel 4. Põrandaplokkide summeerimisvalemis kasutatud puhaste pindade ja ruumiproovide keskmised aktiivsuskontsentratsioonid koos vabastamistasemetega.

	C-14	Cs-137	Eu-152	Eu-154	H-3	K-40	Ni-63	Ra-226	Sr-90	Th-232	Summeerimisvalemi väärtus
Mediaan (Bq/g)	9,25	0,3075	0,02	0,014	0,19	0,218	0,05	0,855	2,257	0,014	12,42
Aritm. keskmine (Bq/g)	21,145	0,854	0,02	0,014	0,19	0,211	0,05	1,6555	2,2575	0,025	22,17
Vabastamistas (Bq/g)	10	1	0,1	0,1	100	10	1000	0,1	1	1	

Katteplokkide puhul ükski tulemus puhastatud pindadelt ega ruumiproovidest vabastamistaset ei ületanud (joonis 21). Puhastatud pindade proovid on väga sarnased ruumiproovidega. Praeguste

tulemuste põhjal võib arvata, et katteplokid on puhtad C-137 ja Ra-226 saastest. Katteplokkidest pole mõõdetud C-14 ega Sr-90 väärtuseid.



Joonis 21. Katteplokkide puhastatud pinna võrdlus ruumiproovidega.

Rakendades kogutud proove (etapist II ja III koos ruumiproovidega) summeerimisvalemis, saab tulemuseks 0,15 (tabel 5), mis vastab vabastamise nõuetele. Selle summeerimisvalemi väärtus jääb vabastamiseks ebapiisavaks, sest sinna pole arvestatud C-14 ega Sr-90 aktiivsuskontsentratsioone.

Tabel 5. Katteplokkide summeerimisvalemis kasutatud puhaste pindade ja ruumiproovide keskmised aktiivsuskontsentratsioonid koos vabastamistasemetega.

	Cs-137	K-40	Ra-226	Th-232	Summeerimis- valemi väärtus
Mediaan (Bq/g)	0,015	0,234	0,0105	0,011	0,15
Aritm. Keskmine (Bq/g)	0,015	0,234	0,0105	0,011	0,15
Vabastamistase (Bq/g)	1	10	0,1	1	

Kokkuvõte

RADON-tüüpi Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla on sulgemisjärgselt dekomissioneerimisel ning dekomissioneerimistööd kestavad siiani. Aastal 2005 tuvastati jäätmetes esinevad radionukliidid. Pärast jäätmete eemaldamiset aastal 2011 liiguti edasi ehitusmaterjali saastetaseme mõõtmisega ning dekomissioneerimise I etapiga. Saastunud ehitusmaterjalist proovide võtmisega alustati aastal 2013. II etapil puhastati saastunud materjali pindu ning võeti lisaproove. II etapi mõõtmistulemused kinnitasid, et saaste on osaliselt levinud ka sügavamatesse kihtidesse. Aastal 2019 algas dekomissioneerimise III etapp, kus alustati hoidla lammutamise ja betoonplokkide eemaldamisega Paldiski radioaktiivsete jäätmete vaheladustuspaika.

Tammiku hoidla betoonmaterjalis on probleemseimateks radionukliidideks C-14, Cs-137, Ra-226 ja Sr-90. Betoonist on tuvastatud kõrged Pb-210 aktiivsuskontsentratsioonid, kuid see radionukliid on hoidlasse akumulunud jäätmetes paiknenud Ra-226 ja looduslikult esineva Rn-222 lagunemise tõttu.

Saaste on pinnasaaste iseloomuga, kuid ulatub kohati sügavamasse kihti. Kõrgeimad aktiivsuskontsentratsioonid mõõdeti betoonmaterjali pinnalt. Sügavamast kihist mõõdetud aktiivsuskontsentratsioonid ületavad kohati vabastamistasemeid, kuid aktiivsuskontsentratsioonide mediaan väheneb sügavuses märgatavalt.

Enim on saastunud põrandaplokid, kus ka puhastamise järgselt ületavad radionukliidide (eriti Ra-226 ja C-14) aktiivsuskontsentratsiooni vabastamistasemeid. Ka sügavast kihist võetud ruumiproovid ületavad kohati vabastamistasemeid kõikide uuritavate probleemsete radionukliidide puhul välja arvatud C-14, mida mõõdeti vaid ühes proovis.

Seinad on põrandaplokkidest paremas seisus ja puhastamise järgselt ning ruumiproovidest on tuvastatud vabastamistaseme ületamist ainult Ra-226 puhul. Pärast puhastamist on C-14 ja Sr-90 kohta võetud vähe proove (C-14 kohta 1 ning Sr-90 kohta 2 proovi), mis andsid vabastamistasemest madalamad tulemused, kuid ei anna usaldusväärset ülevaadet kogu materjali puhtuse kohta. Edasiste C-14 ja Sr-90 mõõtmiste puhul saab püstitada hüpoteesi, et seinte puhastamine on olnud efektiivne ja saaste ei ulatu sügavale, tuginedes praegustele tulemustele. Näiteks koht, kust enne puhastamist tuvastati hoidla kõrgeim Sr-90 aktiivsuskontsentratsioon 650

Bq/g oli pärast puhastamist aktiivsuskontsentratsiooniga 0,02 Bq/g. Seintest pole seni võetud ruumiproove C-14 ega Sr-90 kohta, mis ei võimalda anda hinnangut sügavamate kihtide saaste kohta. Summeerimisvalemi tulemus seintel on 3,74, mis ületab vabastamiseks sätestatud maksimumpiiri ja praeguses seisus ei saa seinaplokke vabastada.

Katteplokke kohta pärineb kõige vähem mõõtmistulemusi. Katteplokkidelt on saadud mõõtmistulemused radionukliide Cs-137 ja Ra-226 kohta. Ükski pärast puhastamist võetud pinnaproov ega sügavama kihi proov vabastamistaset ei ületanud. Katteplokkidest pole võetud proove radionukliidide C-14 ja Sr-90 uurimiseks.

Betoonplokke vabastamise eesmärgil kasutati summeerimisvalemit, et näha, kas materjal vastab praeguses seisus vabastamise nõuetele (summeerimisvalemi indeks <1). Seinte ja põrandade summeerimisvalemi tulemused olid kõrgemad lubatud piirist ja neid ei saa vabastada. Katteplokkide summeerimisvalem annab vabastamiseks sobiva väärtuse 0,15. Praeguste mõõtmistulemuste põhjal sobivad katteplokid kiirgusseaduse nõuetest vabastamiseks, kuid vajaksid enne edasise tegevuse lisamõõtmiseid just C-14 ja Sr-90 aktiivsuskontsentratsioonide kohta. Katteplokkide puhul peab arvestama, et neist on seni võetud väga vähe proove, mis ei anna usaldusväärset üldpilti.

Seni on Tammiku hoidla ehitusmaterjalist võetud palju proove, et uurida probleemseid radionukliide Cs-137 ja Ra-226. Käesolev töö toob välja vajaduse edasisteks mõõtmisteks C-14 ja Sr-90 kohta, millele on seni vähe tähelepanu pööratud. Samuti tuleb tähelepanu pöörata hoidla katteplokkidele, mille praegune proovide arv pole järeltöö tegemiseks piisav.

Clearance of Tammiku radioactive waste repository construction materials from radiation safety requirements

Liis Lumisalu

Summary

This study analyses the radionuclides found in the concrete material of Tammiku RADON-type radioactive waste facility. The goal is to determine whether the material could be eligible for clearance from regulatory control. Tammiku's radioactive waste facility consists of 9 sections. Sections 7-9 have never been in use and have stayed empty. The facility's concrete is analysed separately by wall, floor, and cover blocks. The purpose of this study is to find if the contamination is just on the surface of the material or if it reaches further into the material.

Previous studies have found that the most prominent radionuclides in the repository's building material to be C-14, Cs-137, Ra-226 and Sr-90. Another common radionuclide in the material is Pb-210. Pb-210 high activity concentrations can be explained by the natural decay of radon. Another source of Pb-210 is found to be Ra-226 in the repository.

This study uses statistical analysis by comparing three types of samples: surface samples (<0.2 cm) that were in direct contact with radioactive waste, surface samples that were taken after cleaning the topmost layers with sandpaper/hammers, and subsurface samples from 2 to 4 cm inside the material. The measured activity concentrations were compared to clearance levels for each radionuclide. Finally, the summation rule was used for the wall, floor and cover blocks to take into consideration all the radionuclides in the concrete.

Most contamination was found to be in the floor blocks, where activity concentrations, that exceeded the clearance level were substantial in surface and subsurface samples for radionuclides Cs-137, Ra-226 and Sr-90. Walls were found to be less contaminated, values exceeding the clearance level were found for only Ra-226. Here, a need further studies was found, since there are no subsurface samples taken from wall or cover blocks to analyse C-14 and Sr-90 activity concentrations. For cover blocks there are also no surface samples taken to analyse C-14 and Sr-90. Surface samples analysing C-14 and Sr-90 in wall and floor blocks are insufficient to give a conclusion for all of the material.

Summation rule values exceeded the given limit (<1) for floor (result of 22.17) and wall blocks (3.74). Cover blocks were eligible for clearance with a result of 0.15, but it needs to be considered that they do not include possible C-14 and Sr-90 values and number of samples used in summation was very limited.

Previous samples have been used to analyse mostly Cs-137 and Ra-226 activity concentrations in the facility's concrete. This study highlights the need for further work to measure the activity concentrations of C-14 and Sr-90. The current number of samples from the cover blocks is insufficient for drawing conclusions and additional samples need to be gathered for analysis.

Kasutatud allikad

ALARA kodulehekülj. (i.a). Kasutatud 11.05.2026, <https://alara.ee/>.

AS Alara. (2025a). Tammiku Radionukliidide tulemuste andmebaas. Exceli tabel. Kasutatud 19.05.2026.

AS Alara. (2025b). Dekomissioneerimise ajatelg. Exceli tabel. Kasutatud 20.04.2026.

Britannica Editors. (2026). *Encyclopedia Britannica*. Kasutatud 19.05.2026, <https://www.britannica.com/science/>

Horak, W. C., Reisman, A. ja Purvis III, E. E. (1997). „RADON“—The System of Soviet Designed Regional Waste Management Facilities. *IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 3, 2100–2106. <https://doi.org/10.1109/IECEC.1997.656751>

Ideon, T., Kupits, K., Tamm, I. ja Realo, E. (2007). *Keskkonnamõju hindamise aruanne. Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla ohutustamine*. Tallinn: AS Maves.

International Atomic Energy Agency. (1998). *The radiological accident in Tammiku*. Viin: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2022). *IAEA Nuclear Safety and Security Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety, Nuclear Security, Radiation Protection and Emergency Preparedness and Response*. Viin: IAEA. <https://doi.org/10.61092/iaea.rxi-t56z>

International Atomic Energy Agency. (2023). Application of the Concept of Clearance. General Safety Guide. *IAEA Safety Standards Series*, ISSN 1020–525X, GSG-18. Viin: IAEA.

International Atomic Energy Agency. (2025). Environmental remediation and management of trenches containing historic radioactive wastes : Legacy trench sites. *IAEA nuclear energy series*, ISSN 1995-7807, NW-G-3.3. Viin: IAEA. <https://doi.org/10.61092/iaea.rgwy-0qia>

Iskar, K. ja Suursoo, S. (2013). *Sissejuhatus gammaspektromeetriasse*. Loengukonspekt. Kasutatud 11.04.2026.

Kiirgusseadus. (08.07.2025). Riigi Teataja I. Kasutatud 19.05.2026, <https://www.riigiteataja.ee/akt/108072025022>.

Kiirgustegevuses kasutatavate või tekkivate radioaktiivsete ainete väljaarvamise ja vabastamise tingimused ning väljaarvamise ja vabastamise taotlusele esitatavad nõuded. (30.08.2021). Riigi Teataja I. Kasutatud 19.05.2026, <https://www.riigiteataja.ee/akt/127082021006>.

Kiisk, M. (2023). *Kiirgusohutushinnang Tammiku hoidla vabastustingimuste vastavuse kohta*. Tartu: Kiirgusekspert OÜ.

Knoll, G. F., (2010). *Radiation Detection and Measurement*, 4, 223-275. Michigan: John Wiley & Sons, Inc.

Maišiagala radioactive waste storage facility. (2026). State Nuclear Power Safety Inspectorate (VATESI). Kasutatud 24.05.2026, <https://vatesi.lrv.lt/en/nuclear-facilities/maisiagala-radioactive-waste-storage-facility/>

SKB International Consultants AB. (2005). *Tammiku, Retrieval and Conditioning of RMI waste*. Solna: SKB International Consultants AB.

SSI. (1994). *Project Saku: Saku Disposal Site for Radioactive Waste, Estonia, Final Report*. Stockholm: Rootsi Kiirguskaitse instituut.

VacaP, F., Manjón, G. ja Garcia-León, M. (1998). Efficiency calibration of a liquid scintillation counter for 90Y cherenkov counting. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 406(2), 267-275. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)91986-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)91986-6)

Xu, S., Kłos, R. (2021). *Updated radiological risk assessment for the “Radon” type surface disposal facility in Chisinau, Moldova*. Stockholm: Rootsi Kiirguskaitse instituut.

Lisad

Lisa 1. Tabelid mõõtmistulemuste kokkuvõtetest. Vabastamistaseme väärtused on võetud keskkonnaministri määruse nr 40, 2021 lisa 4-st. Vabastamistaseme lahter on märgitud rohelisega kui saadud tulemused ei ületa kordagi vabastamistaset. Alates II etapi tulemustes on lisatud ka summeerimisvalemi tulemus (summeerimisvalemi väärtuse arvutusest on välja jäetud Pb-210 tulemused).

<i>Tabel L1. Sein, I etapil vabastamistaset ületanud radionukliidid</i>								
	Am-243	C-14	Cs-137	Eu-152	Eu-154	Pb-210	Ra-226	Sr-90
Proovide arv	1	3	55	19	19	45	55	3
Vabastustaset ületanud proovide arv	1	1	21	1	1	45	30	3
Aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g)								
Mediaan	0,550	6,100	0,106	0,004	0,003	36,03	0,290	8,400
Artim. keskmine	0,550	7,033	60,84	0,031	0,021	57,61	18,02	220,1
Standardhälve		3,592	299,5	0,083	0,054	59,16	76,09	372,3
Miinumum	0,550	4,000	0,001	0,003	0,002	4,233	0,000	1,800
Maksimum	0,550	11,00	2082	0,360	0,230	257,3	510,0	650,0
Vabastamistase	0,1	10,00	1,00	0,1	0,1	0,10	0,10	1,00

<i>Tabel L2. Põrand, I etapil vabastamistaset ületanud radionukliidid</i>							
	C-14	Cs-137	Eu-152	Eu-154	Pb-210	Ra-226	Sr-90
Proovide arv	4	10	4	4	10	10	4
Vabastustaset ületanud proovide arv	3	5	2	1	9	9	4
Aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g)							
Mediaan	13,30	1,996	0,072	0,052	4,298	3,855	15,45
Artim. keskmine	75,93	676,4	0,516	0,329	21,69	8,456	29,15
Standardhälve	132,8	2129	0,924	0,581	52,41	14,17	35,60
Miinumum	2,100	0,022	0,019	0,013	0,000	0,010	4,700
Maksimum	275	6737	1,900	1,200	170,3	45,37	81,0
Vabastamistase	10	1	0,1	0,1	0,1	0,1	1

Tabel L3. Katteplokid, I etapil vabastamistaset ületanud radionukliidid								
			Aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g)					
	Proovide arv	Vabastamistaset ületanud proovide arv	Mediaan	Artim. keskmine	Standardhälve	Miinum	Maksimum	Vabastamistase
Cs-137	6	5	16,84	56,93	101,2	0,123	260	1
Pb-210	6	6	62,58	101,2	92,08	24,83	247,3	0,1
Ra-226	5	3	0,186	0,406	0,599	0,058	1,47	0,1

Tabel L4. Sein, II ja III etapil mõõdetud radionukliidid					
	C-14	Cs-137	Pb-210	Ra-226	Sr-90
Proovide arv	1	10	6	10	2
Vabastustaset ületanud proovide arv	0	0	1	4	0
Aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g)					
Mediaan	1,360	0,009	0,000	0,042	0,016
Artim, keskmine	1,360	0,040	0,037	0,431	0,016
Standardhälve		0,053	0,091	0,829	0,006
Miinum	1,360	0,001	0,000	0,000	0,012
Maksimum	1,360	0,149	0,224	2,658	0,020
Vabastamistase	10	1	0,1	0,1	1
Summeerimisvalem: 0,445 mediaani ja 4,502 aritmeetilise keskmise põhjal					

Tabel L5. Põrand, II ja III etapil mõõdetud radionukliidid					
	C-14	Cs-137	Pb-210	Ra-226	Sr-90
Proovide arv	9	9	9	9	4
Vabastustaset ületanud proovide arv	7	1	0	8	0
Aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g)					
Mediaan	17,30	0,488	0,000	1,630	0,014
Artim. keskmine	41,09	0,482	0,000	2,384	0,015
Standardhälve	45,60	0,286	0,000	2,780	0,010
Miinum	5,430	0,165	0,000	0,069	0,005
Maksimum	137,0	1,115	0,000	8,750	0,027
Vabastamistase	10	1	0,1	0,1	1
Summeerimisvalem: 18,532 mediaani ja 28,446 aritmeetilise keskmise põhjal					

Tabel L6. Katteplakid, II ja III etapp								
	Proovide arv	Vabastamistaset ületanud proovide arv	Aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g)					
			Mediaan	Artim. keskmine	Standardhälve	Miimum	Maksimum	Vabastamistase
Cs-137	2	0	0,024	0,024	0,031	0,002	0,046	1
Pb-210	1	0	0	0	0	0	0	0,1
Ra-226	2	0	0,018	0,018	0,025	0	0,036	0,1
Summeerimisvalem: 0,204								

Tabel L7. Seinä ruumiproovid (2-4 cm sügavuselt)									
	Am-241	Co-60	Cs-137	Eu-152	Eu-154	K-40	Pb-210	Ra-226	Th-232
Proovide arv	9	9	21	9	9	11	17	21	10
Vabastamistaset ületanud proovide arv	0	0	0	0	0	0	8	2	0
Aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g)									
Mediaan	0,005	0,003	0,004	0,004	0,003	0,224	0	0,004	0,014
Artim. keskmine	0,006	0,003	0,026	0,004	0,003	0,234	0,75	0,241	0,015
Standardhälve	0,002	0,001	0,057	0,001	0,001	0,03	1,131	1,018	0,005
Miimum	0,004	0,002	0,002	0,003	0,002	0,209	0	0	0,01
Maksimum	0,01	0,004	0,227	0,007	0,005	0,315	3,193	4,68	0,028
Vabastamistase	0,1	0,1	1	0,1	0,1	10	0,1	0,1	1
Summeerimisvalem: 0,2304 mediaani ja 2,6344 aritmeetilise keskmise põhjal									

Tabel L8. Põrand ruumiproovid (2-4 cm sügavuselt)

	C-14	Cs-137	Eu-152	Eu-154	H-3	K-40	Ni-63	Pb-210	Ra-226	Sr-90	Th-232
Proovide arv	1	7	1	1	1	4	1	6	7	1	4
Vabastamistaset ületanud proovide arv	0	2	0	0	0	0	0	1	3	1	0
Aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g)											
Mediaan	1,200	0,127	0,020	0,014	0,190	0,218	0,050	0,000	0,08	4,500	0,014
Keskvärtus	1,200	1,226	0,020	0,014	0,190	0,211	0,050	0,974	0,927	4,500	0,025
Standardhälve		2,029				0,023		2,385	2,097		0,025
Miinumum	1,200	0,004	0,020	0,014	0,190	0,177	0,050	0,000	0,002	4,500	0,011
Maksimum	1,200	5,260	0,020	0,014	0,190	0,229	0,050	5,843	5,67	4,500	0,062
Vabastamistase	10	1	0,1	0,1	100	10	1000	0,1	0,1	1	1
Summeerimisvalem: 5,925 mediaani ja 15,504 aritmeetilise keskmise põhjal											

Tabel L9. Katteplakid ruumiproovid (2-4 cm sügavuselt)

	Cs-137	K-40	Pb-210	Ra-226	Th-232
Proovide arv	1	1	1	1	1
Vabastamistaset ületanud proovide arv	0	0	0	0	0
Aktiivsuskontsentratsioon (Bq/g)					
Mediaan	0,006	0,234	0,000	0,003	0,011
Artim. keskmine	0,006	0,234	0,000	0,003	0,011
Standardhälve					
Miinumum	0,006	0,234	0,000	0,003	0,011
Maksimum	0,006	0,234	0,000	0,003	0,011
Vabastamistase	1	10	0,1	0,1	1
Summeerimisvalem: 0,0704					

Lisa 3. Foto Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla dekomissioneerimisel seinaproovide võtmisest. (ALARA, i.a)



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Liis Lumisalu,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose Tammiku radioaktiivsete jäätmete hoidla ehitusmaterjali vabastamine kiirgusohutuse nõuetest, mille juhendaja on Siiri Salupere, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Liis Lumisalu

25.05.2026