



TARTU ÜLIKOOL

ÜLEVAATEUURINGU II ETAPI ARUANNE

PÄIKESEPANEELIDE TÖÖGA SEOTUD VÕIMALIKUD TERVISERISKID

SÜSTEMAATILINE ÜLEVAADE

Uuringu pealkiri:

Metoodika väljatöötamine tuuleparkide ja teiste energiatootmise tehnoloogiate võimalike tervisemõjudega seotud teadusuuringute tulemuste tõlgendamiseks Eesti tingimustes



Rahastanud Euroopa Liit
NextGenerationEU



Eesti
tuleviku heaks

Tartu 2026

Uuringurühma koosseis:

Triin Veber (MSc, MPH), Tartu Ülikool, projektijuht ja ekspert

Ele Kiisk (MA, MSc) Tartu Ülikool, nooremteodik

Hans Orru (PhD, MPH), Tartu Ülikool, teadusjuht

Töö tellija: Kliimaministerium

Sisukord

Sisukord.....	3
Sissejuhatus ja uuringu teaduslik taust.....	4
Uuringu eesmärk	5
Meetodid.....	6
Tulemused ja arutelu	8
Päikesepaneelide tervisemõjud elutsükli jooksul.....	9
Räni-põhised päikesepaneelid	9
CdTe-põhised päikesepaneelid.....	9
Perovskiit-põhised päikesepaneelid	10
Päikesepaneelide jäätmed	11
Päikesepaneelidest tulenevate terviseriskide maandamine	11
Päikesepaneelide elektromagnetväljad	12
Päikesepaneelide visuaalsed aspektid	13
Kokkuvõte ja soovitused	14
Kasutatud kirjandus.....	15
Lisa 1	17
Lisa 2	18

Sissejuhatus ja uuringu teaduslik taust

Päikesepaneel muudab päikesekiirgust fotogalvaanilise tehnoloogia abil elektrienergiaks ja koosneb fotogalvaanilistest elementidest (ingl *photovoltaic cell*, *PV cell*). Tänu keskkonnasäästlike energalahenduste eelistamisele ja kiirele tehnoloogilisele arengule päikesepaneelide tootmisel, on päikesepaneelide tootmise hind ja seega ka sellest toodetud elektri hind viimastel aastakümnetel märkimisväärselt langenud. See on kaasa aidanud päikeseenergia kiirele levikule, kusjuures ülemaailmne tootmisvõimsus kasvab jätkuvalt. Aastatel 2018–2023 kolmekordistus päikeseenergia tootmise maht. Aastatel 2024–2030 eeldatakse, et see tehnoloogia moodustab 80% ülemaailmse taastuvenergia tootmisvõimsuse kasvust. Päikeseenergia moodustas aastal 2023 5,4% kogu maailma elektritootmisest ning on suuruselt kolmas taastuvelektri tehnoloogia hüdroenergia ja tuuleenergia järel. Aastal 2030 võib tootmiskaht ulatuda maailmas kuni 9 200 TWh. Rajatakse nii suuri päikeseparke kui paigaldatakse ka väiksemaid päikesejaamu ettevõtetesse ja kodumajapidamistesse (IEA, 2026).

Päikesepaneelide tehnoloogia saab jagada kolme põlvkonda. Esimesse põlvkonda kuuluvad kristallilised räni-põhised päikesepaneelid (Kwak et al., 2020). Need on siiani kõige levinumad maailmas (ingl *crystalline silicon*), omades üle 98% turuosast. (IEA, 2026). Teise põlvkonna tooted on õhukesed kiled (ingl *thin films*). Peamised tehnoloogiad, mida teises põlvkonnas kasutatakse on amorfne räni, kaadmiumtelluriid (CdTe), vask-indium-gallium-diseleniid (CIGS) ja vask-indium-diseleniid (CIS). Kolmas põlvkond on uued ja arenevad tehnoloogiad, mis on alles teel laiemale turule. Nende hulka kuuluvad: perovskiit-põhised päikesepaneelid, PERC-rakud (ingl *passivated emitter and rear cells*), nanokristallilised kiled (Kwak et al., 2020).

Kuna ka Eestis on päikeseparkide rajamine populaarne, on oluline teada nendega seonduvaid võimalikke terviseriske.

Uuringu eesmärk

Käesoleva töö eesmärk oli anda ülevaade võimalikest terviseriskidest, mis võivad elanikkonnal tekkida elektri tootmiseks kasutatavate päikesepaneelide tõttu.

Uuringu küsimused:

- Kas ja millised terviseriske võib päikesepaneelide kasutamine elektri tootmiseks põhjustada?
- Milliseid tõenduspõhiseid soovitusi saab anda poliitikakujundajatele, tööstuse sidusrühmadele ja mõjutatud kogukondadele inimeste tervise kaitsmiseks?

Meetodid

Uuring viidi läbi süstemaatilise kirjanduse ülevaatenä. Süstemaatilise kirjanduse ülevaate koostamisel kasutasime (kiir)ülevaate (ingl *rapid review*) metoodika põhimõtteid. Kasutades PECO (*population, exposure, comparison, outcome*) raamistikku süstemaatilise ülevaate küsimuste määratlemiseks, kaasasime uuringusse artiklid, mis käsitlesid:

- Rahvastik (ingl *population*): üldpopulatsioon, kõik elanikud kogu maailmas
- Kokkupuude (ingl *exposure*): töötav päikeseelektriijaam
- Võrdlusrühm (ingl *comparison*): isikud, kes ei puutu kokku päikeseelektriijaamaga
- Tervisetulem (ingl *outcome*): kõik võimalikud tervisega seotud tulemid, sealhulgas häiritus, unehäired, tervisesümptomid (subjektiivselt või objektiivselt mõõdetud, mõõdetud füsioloogilised parameetrid), tervisega seotud elukvaliteet, psühholoogilised näitajad.

Välistasime teabeallikad mis:

- Ei käsitle inimeste tervisemõjusid. Artiklid, mis käsitlevad ainult tehnilisi aspekte või on tehtud loomade, eluslooduse või katseloomade kohta
- Ei käsitle elektri tootmist
- Käsitlevad päikesepaneelidega kokkupuudet töökeskkonnas, mitte elukeskkonnas
- On avaldatud enne 2015. aastat
- On kirjad, kommentaarid, juhtkirjad, konverentsi kokkuvõtted
- Teabeallikad, mis ei ole eelretsenseeritud teaduskirjandus
- Mitte-ingliskeelsed uuringud

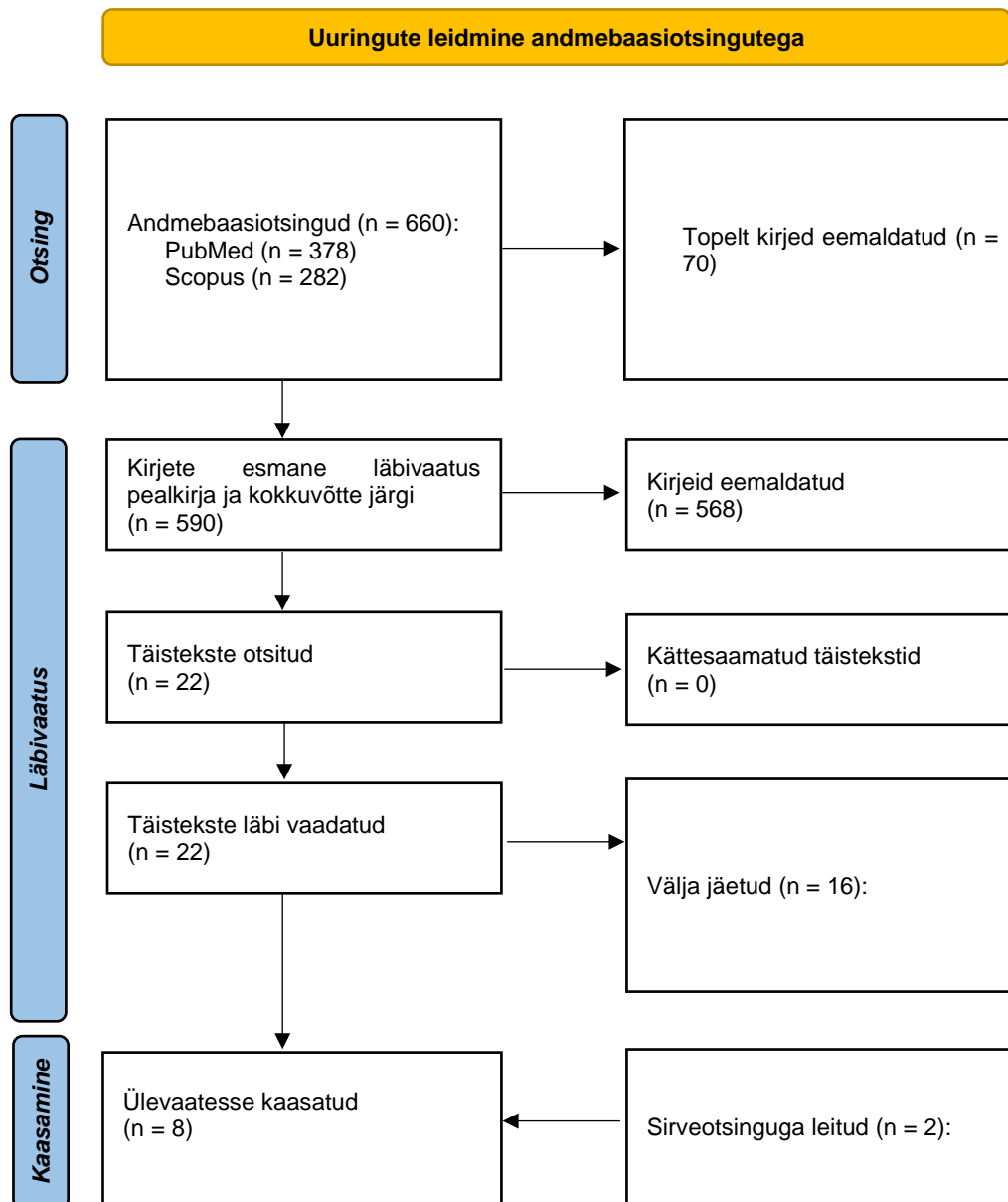
Otsing viidi läbi kõigepealt *PubMed* andmebaasis ja seejärel *Scopus* andmebaasis otsides ajavahemikus 01.01.2015-18.11.2025 olevaid kirjeid. Kasutasime järgmisi otsingutermineid: *solar power plants, solar power technologies, solar cell devices, photovoltaic (PV) technology, photovoltaics, solar energy, PV-panels*. Täpsem otsinguskeem *PubMed* andmebaasis on esitatud Lisas 1.

Viidete haldamiseks kasutasime *Endnote* ja *Mendeley* tarkvara. Pealkirjade ja kokkuvõtete läbi vaatamisel rakendasime *rapid review* ülevaadete metoodikat. Üks tööühma liige vaatas läbi otsingustrateegiaga tuvastatud artiklite pealkirjad ja kokkuvõtted, kasutades eelpool mainitud kriteeriumeid potentsiaalse sobivuse hindamiseks. Sobivateks hinnatud artiklitele leiti teaduslikest andmebaasidest täistekstid. Kõik uuringud, mis valiti pealkirjade ja kokkuvõtete

järgi potentsiaalselt sobivaks säilitati täistekstidena. Artiklite andmed sisestati MS Excelisse. Täistekstide läbivaatamisel tehti lõplik otsus artiklite kaasamiseks kahe uurimisrühma liikme osalusel.

Tulemused ja arutelu

Andmebaasiotsinguga leiti 660 kirjet (teadusartiklit), millest 590 puhul otsustati, kas uuring vastab meie seatud kaasamiskriteeriumitele ainult pealkirja ja kokkuvõtte järgi. Täistekste vaadati läbi 22 juhul. Kaasamiskriteeriumitele vastas 6 uuringut, sirveotsinguga lisati veel 2 uuringut (Joonis 1). Kokku kasutati analüüsis 8 uuringu tulemusi. Kõikide kaasatud artiklite olulisemad tulemused on kokkuvõtvalt kirjeldatud Lisas 2 Tabelis 1.



Joonis 1. PRISMA voodiagramm teaduskirjanduse otsingute kirjeldamiseks.

Päikesepaneelide tervisemõjud elutsükli jooksul

Alam ja Xu (2023) viisid läbi ühe Kanadas asuva päikeseenergia tootmisüksuse (paneelid, inverter, paigaldus-tegevused) tervise ja keskkonnamõjude hindamise tootmisüksuse elutsükli jooksul. Selle tulemusena leiti, et päikesepaneelide tervisemõjud avalduvad peamiselt nende elutsükli alguses (tootmine) ja lõpus (jäätmete käitlemine), mitte aga paneelide tavapärase töö ajal, mil need on heitmevabad. Elutsükli jooksul võivad kemikaalid sattuda keskkonda just paneelide valmistamisel ja hilisemal utiliseerimisel, kui komponente ei käidelda õigesti. Päikesepaneelide tootmise käigus tekib terase tootmise jäägina kantserogeenne kroom, mis võib leostuda pinna- ja põhjavette. Paneelide tootmiseks vajaliku elektri genereerimisel, eriti kui kasutatakse kivisütt või pruunsütt tekib õhusaastet (PM_{2,5}). Vale tootmise ja käitlemise tõttu võib toimuda tsingiioonide ning vähemal määral ka arseeni eraldumine põhjavette (Alam & Xu, 2023).

Räni-põhised päikesepaneelid

Räni-põhised päikesepaneelid on kõige levinumad ja kõige vanem tehnoloogia, kuid seni on tehtud väga vähe uuringuid nende tervisemõjude kohta. Lisaks ränile sisaldavad need mitmesuguseid muid komponente, sealhulgas klaasi, polümeere, hõbedat, vaske, boori, fosforit, tina, tinaoksiidi ja pliid. Purunenud paneelidest võivad sõltuvalt keskkonna pH-tasemest vabaneda alumiinium (Al), vask (Cu), nikkel (Ni) ja plii (Pb) (Kwak et al., 2020). Plii (Pb) on ränipõhiste paneelide üks kriitilisemaid komponente, mida kasutatakse paneelide jootematerjalides. Plii on mürgine aine, mis võib kahjustada kesknärvisüsteemi ja immuunsüsteemi. Plii tekitab märkimisväärset vähiriski nii saastunud mulla kui ka põhjavee kaudu. Ränipõhistest paneelidest võib leostuda ka kroomi, mis on tuntud kantserogeen ning võib põhjustada hingamisteede tüsistusi (Nain & Kumar, 2020)

CdTe-põhised päikesepaneelid

Tegemist on õhukesekihiliste päikesepaneelidega, kus valguse neelamiseks kasutatakse kaadmiumtelluriidi pooljuhtkihti. See on ränipõhiste paneelide järel teine kõige levinum tehnoloogia maailmas, omades 2014. aasta andmetel umbes 5% suurust turuosa. Uuringud on näidanud, et purunenud CdTe-paneelidest võivad keskkonda leostuda ohtlikud metallid: peamiselt kaadmium (Cd) ja telluur (Te), kuid ka teised metallid nagu nikkel (Ni), vask (Cu), alumiinium (Al) ja kroom (Cr). Kokkuvõtteks on CdTe-tehnoloogia küll tõhus ja soodne, kuid

selle peamiseks väljakutseks on kaadmiumi mürgisus, mis nõuab paneelide purunemise vältimist ja ranget jäätmekäitlust nende eluea lõpus (Kwak et al., 2020)

Paneelide kulumine või kahjustused (nt rahe või vale paigaldus) võivad põhjustada ka galliumi (Ga), germaaniumi (Ge) ja telluuri (Te) leostumist sademeveega õhukese kilega päikesepaneelidest. Need elemendid jõuavad tolmu, vee ja mulla kaudu inimorganismi (nt linnaaianduse kaudu). Nende ainete tervise mõju on veel vähe uuritud ja kontsentratsioonid on väikesed. Siiski on leostumise protsess pöördumatu ning elemendid kogunevad keskkonda. Erilist tähelepanu vajavad purunenud paneelid jäätmejaamades, kus neid hoitakse sageli välitingimustes (Baumgart et al., 2024).

Perovskiit-põhised päikesepaneelid

Perovskiit-põhised päikesepaneelid kuuluvad kolmanda põlvkonna päikesetehnoloogiate hulka, mida peetakse tänu madalale hinnale ja lihtsale tootmisprotsessile üheks perspektiivsemaks uueks suunaks päikeseenergeetikas, kuid see on veel katsetuste faasis. Perovskiit-tehnoloogia pakub oluliselt suuremat energiatõhusust (üle 29%) võrreldes traditsiooniliste ränipaneelidega (alla 23%), kuid perovskiitides kasutatakse pliid, mis on tuntud oma mürgisuse poolest. Plii põhjustab maailmas aastas üle miljoni surma ning tekitab pöördumatuid kahjustusi ajule ja neerudele, olles eriti ohtlik laste neuroloogilisele arengule. Lisaks plii sisaldus neis tina (Sn), jood (I) ja broom (Br). Terved paneelid on ohutud kuid ohtu kujutavad purunenud paneelid. Hinnanguliselt 1 paneel 100-st puruneb 25-aastase eluea jooksul ning plii võib jõuda vette ja mulda. Erilist muret tekitavad teatud plii keemilised vormid, mis on väga lahustuvad ja looduses kergesti organismide poolt omastatavad. On leitud, et taimed võivad perovskiit-pliid omastada kümme korda kiiremini kui teisi keskkonnas leiduvaid pliiühendeid, mis tekitab toiduohutuse probleemi, kui paneelid asuvad põllumaade läheduses (Khalifa et al., 2023; Kwak et al., 2020).

Khalifa et al (2023) uuringu eesmärk oli modelleerida teoreetilist olukorda, mis juhtub pliiiga siis, kui päikesepaneelid peaksid kahes suurtööstuslikus pargis (100 MW ja 500 MW) katastroofiliselt purunema (nt orkaani või tornaado tõttu) ja vihmavesi plii sealt välja uhub. Uuringu tulemuste kohaselt jäävad plii kontsentratsioonid isegi kõige halvema stsenaariumi korral alla ametlike piirnormide. Suurem osa lekkivast pliiist (u 99%) seotakse pinnase poolt ja see ei liigu sealt kergesti edasi. Plii kontsentratsiooni tõus mullas jäi prognoosi järgi alla Ameerika Ühendriikide piirnormide (milleks on 400 mg/kg laste mängualadel ja 1200 mg/kg mujal). Plii sisaldus joogiveeallikates jäi kõigis stsenaariumides alla piirmäära (0,015 mg/L).

Plii eraldumine õhku tolmu kaudu oli minimaalne ja kaugelt alla lubatud piinormide. Khalifa et al. (2023) autorid järeldasid, et perovskiit-paneelide elutsükli käigus eralduv plii kogus jääb alla piinormide ka õnnetuste korral, kuid see ei pruugi tähendada veel selle ohutust (Khalifa et al., 2023).

Päiksepaneelide jäätmed

Uuring Nain ja Kumar (2020) analüüsib kasutuselt kõrvaldatud päiksepaneelide (kõik tüübid) jäätmetest tekkivat võimalikku ohtu keskkonnale ja inimeste tervisele, keskendudes eelkõige raskmetallide leostumisele. Uuriti 14 erineva metalli (sh plii, kaadmium, hõbe, arseen, vask) leostumist purunenud päiksepaneelidest pinnasesse ja põhjavette. Kõige rohkem leostus paneelidest vaske, molübdeeni, rauda ja kaadmiumi.

Leiti, et kõige kriitilisemad saasteained on kaadmium ja plii, mis kujutavad endast märkimisväärset vähiriski ja toksilist ohtu. Plii kujutab endast olulist vähiriski kõigis stsenaariumides, eriti mulla kaudu kokkupuutel. Samuti leiti tõsine tervisemure seoses plii vähiriskiga põhjavee kaudu toimival nahakontaktil. Tulemused näitavad, et suurimas ohus on lapsed, kes puutuvad saastunud pinnasega kokku naha kaudu või juhusliku neelamise teel. Kõrge pliirisk on seotud peamiselt vanema põlvkonna ränipaneelides kasutatud joodistega. Uuemate pliivabade tehnoloogiate kasutuselevõtt peaks seda riski oluliselt vähendama. Suurim oht tervisele tuleneb just saastunud mullaga kokkupuutest, näiteks mänguväljakutel, mis asuvad prügilate läheduses. Anud riskianalüüs näitab vajadust päiksepaneelide hoolika käitlemise järele pärast nende eluea lõppu, et vältida ohtlike metallide sattumist keskkonda ja inimorganismi (Nain & Kumar, 2020)

Päiksepaneelidest tulenevate terviseriskide maandamine

Kuigi päiksepaneelid on kasutuse ajal keskkonnasõbralikud, on nende mõju tootmis- ja jäätmekäitlusfaasides märkimisväärne ning seda ei tohi ignoreerida. Seni on teadus keskendunud peamiselt paneelide efektiivsuse tõstmisele, kuid riskide ja heitmete süstemaatiline vähendamine on jäänud tagaplaanile. Uuring (Nain et al., 2025) pakub välja võimalusi ohtude minimeerimiseks. Üks võimalus on kõrge riskiga metallide (nt plii) asendamine vähem ohtlike alternatiividega (nt tina). Plii asendamine tinaga vähendaks oluliselt vähiriski.

Teiseks võimaluseks on kasutada tugevamat paneelide kaitsekihti, näiteks epoksüvaiku, mis on laborikatsetes märkimisväärselt vähendanud plii leostumist võrreldes tavalise klaasiga. Epoksüvaigu kasutamine võib purunenud paneelide puhul vähendada plii leket (Nain et al.,

2025). Samas sisaldab epoksüvaik bisfenool A-d (BPA). BPA on levinud keskkonna saasteaine, mida kasutatakse laialdaselt toidupakendites (konservipurkide sisemine kate, plastikpakendid), veepudelites, termopaberites (nt kassatšekkides, parkimispiletites), mänguasjades, joogiveetorudes ja meditsiiniseadmetes. BPA häirib hormonaalset tasakaalu, põhjustades viljatust, munasarjade talitlushäireid, raseduse katkemist ja meeste sperma kvaliteedi langust. Uuringud seostavad BPA-d samuti suurenenud vähiriskiga, sealhulgas rinna-, munasarja- ja eesnäärmevähiga. Lisaks mõjutab BPA negatiivselt immuunsüsteemi. Euroopa Liidus on BPA-le toodetes kehtestatud piirnõrmiid ja keelatud kasutamine imikute toidutarvetes. Siiski pole võimalik elanikkonnal BPA-ga kokkupuudet vältida, kuna see on keskkonnas kõikjal (toidus, tolmus, joogivees). On võimalik kasutada BPA-vabasid alternatiivtooteid (Manzoor et al., 2022). Seetõttu tuleks enne päikesepaneelides kasutatava klaasi asendamist epoksüvaiguga kaaluda mõlema variandi terviseriske. Regulaarne paneelide puhastamine hoiab ära tolmu ja orgaanilise aine (lindude väljaheited, vetikad, hallitus) kogunemise, mis võib kahjustada paneeli pinda. Samuti tuleb vältida vigu tootmisprotsessis, mis võivad viia päikesepaneeli purunemiseni kasutamise ajal (Nain et al., 2025).

Päikeseparkide elektromagnetväljad

Uuring Tell et al. 2015 analüüsis elektromagnetvälju kahes kommertskasutuses olevas päikesepargis sagedusalas 0 Hz kuni 3 GHz. Uuringu eesmärgiks oli kaardistada elektromagnetiline keskkond päikeseparkides ja võrrelda mõõdetud väärtusi rahvusvaheliste ohutusstandarditega: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) standardeid C95.6 ja C95.1 ja International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) suuniseid. Mõõtmisi teostati erinevate seadmete juures: päikesepaneelid (muundavad valguse alalisvooluks); inverterid (muundavad alalisvoolu vahelduvvooluks), trafod (tõstavad pinget võrku saatmiseks sobivale tasemele) ja jaotusseadmed (juhivad energiat elektrivõrku).

Mõõtmistulemused näitasid, et staatilised magnetväljad olid väga nõrgad. Suurimad väärtused (kuni 0,277 mT) mõõdeti inverterite ümber, kuid need jäid 1200 korda alla IEEE ja 7000 korda alla ICNIRP töötajate kokkupuute piirnõrmiide. Juba 2–3 meetri kaugusel langesid need väljad taustatasemeni. Vahelduvmagnetväljade spektrivõimsus koondus sagedusele 60 Hz. 60 Hz magnetväljad olid kõige tugevamad trafode ja inverterite vahetus läheduses (kuni 177 μ T), kuid need langesid märgatavalt (alla 10 μ T) juba 1 meetri kaugusel. ICNIRP piirnõrmi üldrahvastikule on 200 μ T. Võrgusageduslikud (50/60 Hz) elektriväljad olid praktiliselt olematud, ulatudes vahetult trafo ja inverteri kõrval vastavalt 16 V/m ja 10 V/m-ni. Lairibalisi (5–100 kHz) magnet- ja elektrivälju mõõdeti maksimaalselt 40 μ T inverteri pinnal kui see töötas

nominaalvõimsusel 400–490 kW selge ilmaga, kuid see langes alla 0,1 μT juba 1,5 m kaugusel. ICNIRP piinormiks üldrahvastikule on 26,8 μT , töötajatele on see kõrgem.

Kokkuvõtvalt täheldati, et kuigi trafode ja inverterite pinnal lähenesid magnetvälja tasemed ICNIRP üldrahvastikule seatud piinormidele, langesid need alla normi enamasti juba vähem kui 30 cm kaugusel. Kuna juurdepääs seadmetele on piiratud ja väljad vähenevad kiiresti distantsiga, ei peeta elanikkonna liiga kõrgete elektromagnetväljadega kokkupuudet usutavaks. Uurijad ei leidnud spetsiifilist asukohta päikesepargis, mis nõuaks edasist sekkumist või töötajate teavitamist erelistest ohtudest elektromagnetväljade tõttu. Uuring kinnitab, et päikesepargid on elektromagnetilise kiirguse seisukohalt ohutud nii töötajatele kui ka ümbritsevale keskkonnale (Tell et al., 2015).

Päiksepaneelide visuaalsed aspektid

Suured päikesepargid muudavad paratamatult maastikku ning seetõttu on võimalik, et nad on esteetiliselt ebameeldivad. Käesoleva päiksepaneelide aruande otsinguga ei tulnud välja ühtegi päikeseparkide visuaalseid aspekte käsitlevat uuringut. Üks selline uuring (Murcia et al., 2017) tuli välja aga tuulikute aruande otsinguga, mis käsitles võrdlevat tuulikute, päikeseparkide ja tuumajaamade visuaalselt häirivust.

Kuna inimeste esmamulje ja otsused visuaalse mõju kohta on sageli alateadlikud, mõõtsid uurijad ajuaktiivsust elektroentsefalograafiliselt (EEG). Lisaks kasutati visuaalide hindamist tavalise küsitlusega. Uuringus osales 14 vabatahtlikku (keskmine vanus 24 aastat), kellele näidati 60 erinevat värvilist pilti, mis jagunesid kolme rühma: maastikud koos tuulikutega ja ilma, maastikud koos päiksepaneelidega ja ilma ning maastikud koos tuumaelektrijaamadega ja ilma. Osalejad andsid piltidele hinnanguid skaalal 1 (väga ebameeldiv) kuni 9 (väga meeldiv).

EEG salvestised ja uuritavate subjektiivsed hinnangud ei näidanud olulisi erinevusi maastike vahel, kus olid päiksepaneelid või tuulikud ja maastike vahel, kus neid polnud. Seevastu tuumaelektrijaamadega pildid tekitasid inimestes negatiivseid emotsioone nii ajuaktiivsuse mõõtmiste kui ka subjektiivsete hinnangute põhjal. Uuringust saab järeldada, et päikesepargid ei tekita inimestes negatiivseid emotsioone. Uuringu tulemust võis mõjutada asjaolu, et uuringus osales vaid 14 uuritavat ning enamik neist suhtus taastuvenergeetikasse positiivselt.

Kokkuvõte ja soovitused

Kaasatud uuringute tulemused kinnitasid, et tavapärase töötamise ajal on päikesepaneelid heitmevabad ja tervisele ohutud. Päikeseparkides mõõdetud elektromagneetväljade tasemed on madalad ja ohutud. Suurimad väärtused mõõdeti inverterite ja trafode vahetus läheduses, kuid need langesid taustatasemeni juba 2–3 meetri kaugusel, jäädes kaugemale alla rahvusvaheliste piirnormide. Ühe uuringu põhjal ei tekitanud päikesepaneelide nägemine maastikul inimestes ka negatiivseid emotsioone. Päikesepaneelid sisaldavad mitmeid kemikaale, mis on nii tervisele kui ka ökosüsteemidele kahjulikud, kui need keskkonda satuvad. Suurim oht tervisele on paneelide purunemine (nt tugeva rahe, tulekahju või vale käitlemise tõttu), mille tagajärjel võivad keskkonda leostuda ohtlikud kemikaalid. Kõige olulisemad saasteained on plii ja kaadmium, mis kujutavad endast märkimisväärset vähiriski ja toksilist ohtu. Erilist tähelepanu on vaja pöörata päikesepaneelide jäätmete ohutule käitlemisele. Päikesepaneelide jäätmekäitlust reguleerib Euroopa Liidus direktiiv (2012/19/EU). Direktiivi kohaselt peavad tootjad tagama paneelide tagasivõtu ja ringlussevõtu, sealhulgas sellega seotud halduse, aruandluse ja rahastamise. Soovitame Eestis tegelda eraisikute teavitamisega päikesepaneelidega seotud ohtudest purunemise või põlengu korral ning anda juhiseid õigeaegselt tegutsemiseks selliste juhtumite korral. Päikesepaneelidega seotud terviseriske on vähe uuritud ning seetõttu ei ole välistatud, et suurema kasutuse korral selguvad terviseriskid, mida praegu ei teata.

Kasutatud kirjandus

- Alam, E., & Xu, X. (2023). Life cycle assessment of photovoltaic electricity production by mono-crystalline solar systems: a case study in Canada. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 27422–27440. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-24077-3/TABLES/5>
- Baumgart, A., Haluza, D., Prohaska, T., Trimmel, S., Pitha, U., Irrgeher, J., & Wiedenhofer, D. (2024). In-use dissipation of technology-critical elements from vehicles and renewable energy technologies in Vienna, Austria: A public health matter? *Journal of Industrial Ecology*, 28(6), 1857–1870. <https://doi.org/10.1111/JIEC.13571>
- IEA (2026). *Solar PV*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>
- Khalifa, S. A., Spatari, S., Fafarman, A. T., Fthenakis, V. M., Gurian, P. L., Olson, M. S., & Baxter, J. B. (2023). Fate and exposure assessment of pb leachate from hypothetical breakage events of perovskite photovoltaic modules. *Environmental Science and Technology*, 57(13), 5190–5202. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.2C05815/ASSET/IMAGES/LARGE/ES2C05815_0006.JPG
- Kwak, J. Il, Nam, S. H., Kim, L., & An, Y. J. (2020). Potential environmental risk of solar cells: Current knowledge and future challenges. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122297. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.122297>
- Manzoor, M. F., Tariq, T., Fatima, B., Sahar, A., Tariq, F., Munir, S., Khan, S., Nawaz Ranjha, M. M. A., Sameen, A., Zeng, X. A., & Ibrahim, S. A. (2022). An insight into bisphenol A, food exposure and its adverse effects on health: A review. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2022.1047827>
- Murcia, G. M. D., Sánchez Ferrer, F., Sorinas, J., Ferrandez, J. M., & Fernandez, E. (2017). Application of electroencephalographic techniques to the study of visual impact of renewable energies. *Journal of Environmental Management*, 200, 484–489. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.05.096>
- Nain, P., Bhattacharya, M., & Kumar, A. (2025). Risk minimizing framework for solar photovoltaics. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid*

Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 43(7), 1112–1122.
<https://doi.org/10.1177/0734242X241291938>

Nain, P., & Kumar, A. (2020). Ecological and human health risk assessment of metals leached from end-of-life solar photovoltaics. *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 267. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.115393>

O'Connor, D., & Hou, D. (2021). Manage the environmental risks of perovskites. *One Earth*, 4(11), 1534–1537. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2021.11.002>

Tell, R. A., Hooper, H. C., Sias, G. G., Mezei, G., Hung, P., & Kavet, R. (2015). Electromagnetic Fields Associated with Commercial Solar Photovoltaic Electric Power Generating Facilities. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(11), 795–803. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1047021>

Lisa 1

Otsinguskeem *PubMed* andmebaasis oli järgmine:

```
((("Solar Energy"[Mesh] OR solar power[Title/Abstract] OR solar energy[Title/Abstract] OR solar panels[Title/Abstract] OR solar panel[Title/Abstract] OR solar farms[Title/Abstract] OR solar parks[Title/Abstract] OR solar farm[Title/Abstract] OR solar park[Title/Abstract] OR photovoltaic[Title/Abstract] OR photovoltaics[Title/Abstract] OR solar photovoltaic[Title/Abstract] OR solar photovoltaics[Title/Abstract] OR solar PV[Title/Abstract] OR photovoltaic systems[Title/Abstract] OR photovoltaic plants[Title/Abstract]) AND (((("Risk Factors"[Mesh:NoExp] OR "Risk Assessment"[Mesh:NoExp]) OR (health risk[Title/Abstract] OR health impact[Title/Abstract] OR safety[Title/Abstract])) OR (environmental exposure[Title/Abstract] OR "Environmental Exposure"[Mesh]))) AND (("2015/01/01"[Date - Publication] : "2025/11/18"[Date - Publication]))
```

Lisa 2

Tabel 1. Kaasatud uuringud

Allika viide	Riik	Uuringu kavand	Eesmärk	Peamine tulemus meie uuringu kontekstis
Alam & Xu 2023	Kanada	Elutsükli hindamine	Ränipõhise päikesesüsteemi (3 kW võimsusega paneelid, inverter, paigaldus) keskkonna- ja tervise mõjude analüüs elutsükli jooksul	Päikesepaneelide tervise mõjud avalduvad peamiselt nende elutsükli alguses (tootmine) ja lõpus (jäätmete käitlemine), mitte aga paneelide tavapärase töö ajal, mil need on heitmevabad.
Baumgart et al 2024	Austria	Keskkonnamõjude analüüs	Tehnoloogiakriitiliste elementide akumulatsiooni ja hajumise uurimine Viini linnas	Paneelide kulumine või kahjustused (nt rahe või vale paigaldus) võivad põhjustada galliumi (Ga), germaaniumi (Ge) ja telluuri (Te) leostumist sademeveega. Kuigi kontsentratsioonid on väikesed võivad ained kuhjuda linnakeskkonnas.
Khalifa et al 2023	USA	Keskkonnamõjude analüüs	Perovskiit-paneelide purunemisel tekkiva plii (Pb) kontsentratsioonide ja terviseriskide hindamine	Modelleeritud teoreetilised plii kontsentratsioonid paneelide purunemise korral jäid allapoole lubatud piirnorme, kuid perovskiit-plii suur biosaadavus nõuab täiendavaid uuringuid.
Kwak et al 2020	Lõuna-Korea	Narratiivne ülevaade	Päikesepatareidest leostuvate ainete potentsiaalsete keskkonna- ja terviseriskide analüüs	Päikesepaneelides sisalduvad komponendid on kahjulikud ökosüsteemile ja inimtervisele, kui need paneelide purunemisel keskkonda satuvad.
Murcia et al 2017	Hispaania	Katse	Rajatiste visuaalse mõju uurimine inimese ajuaktiivsusele ja emotsioonidele.	Päikesepaneelide ja tuulikute nägemine maastikupildidel ei tekitanud negatiivset alateadlikku reaktsiooni ega negatiivseid raporteeritud tundeid
Nain & Kumar 2020	India	Riski-hindamine	Kasutusest kõrvaldatud paneelidest leostuvate metallide terviseriskide hindamine	Kõige kriitilisemad päikesepaneelides sisalduvad ained on kaadmium ja plii, mis kujutavad endast märkimisväärset vähiriski ja toksilist ohtu kui leostuvad välja päikesepaneelide jäätmetest.

Nain et al 2025	USA / India	Riskijuhtimise raamistiku arendamine	Päikeseenergia tehnoloogiate riskide vähendamine disaini ja materjalivaliku kaudu	Plii asendamine tinaga vähendab vähi riski. Epoksüvaigu kasutamine klaasi asemel vähendab toksiliste ainete leostumist.
Tell et al 2015	USA	Vaatlusuuring	Elektromagnetväljade mõõtmine päikesepargis	Kõik mõõdetud välja tugevused vastasid rahvusvahelistele ohutusstandarditele ning olid nii elanikele kui ka töötajatele ohutud.