



TARTU ÜLIKOOL

ÜLEVAATEUURINGU II ETAPI ARUANNE

TUUMAJAAMADE TERVISEMÕJUD:

SÜSTEMAATILINE ÜLEVAADE VIIMASEL VIHETEISTKÜMNEL AASTAL
EELRETSENSEERITAVATES TEADUSAJAKIRJADES AVALDATUD
UURINGUTEST

Uuringu pealkiri:

**Metoodika väljatöötamine tuuleparkide ja teiste energiatootmise
tehnoloogiate võimalike tervise mõjudega seotud teadusuuringute
tulemuste tõlgendamiseks Eesti tingimustes**



Rahastanud Euroopa Liit
NextGenerationEU



Eesti
tuleviku heaks

Tartu 2026

Uuringurühma koosseis:

Ene Indermitte (MPH, PhD), Tartu Ülikool, ekspert

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

Sissejuhatus ja uuringu teaduslik taust.....	4
Uuringu eesmärk	7
Metoodika.....	8
Tulemused ja arutelu	11
Tuumajaamade tavapärase tööga seotud mõju inimeste tervisele	12
Tuumajaamad ja rahvastiku haigestumus- ja suremusnäitajad.....	12
Tuumajaamad ja soliidtuumorite risk	16
Tuumajaamad ja laste leukeemiarisk.....	18
Tuumajaamad ja kilpnäärmevähi risk.....	21
Tuumajaamad ja ebasoodsad sünnitulemid	24
Tuumajaamadega seotud psühholoogilised ja psühhosotsiaalsed mõjud elanikele.....	26
Metoodika valiku põhjendus, uuringu tugevused ja nõrkused	28
Kokkuvõte ja järeldused.....	30
Soovitused tuumajaama planeerimisel elanike tervisemõjudega arvestamiseks.....	32
Kasutatud kirjandus.....	34
Lisa 1. Kasutatud otsinguterminid ja otsingustrateegia	39
Lisa 2. Tulemuste tabelid	40
Tabel 1. Süsteemaatilised ülevaated tuumajaamade tervisemõjudest (2015–2025).....	40
Tabel 2. Muud analüüsi kaasatud uuringud tuumajaamade tervisemõjudest (2010–2025) .	41
Lisa 3. Analüüsi kaasatud süstemaatiliste ülevaadete (6) andmetabelid.....	42
Tabel 3. Lee et al. (2025) süstemaatilisse ülevaatesse kaasatud uuringud. Soliidtuumorid.	42
Tabel 4. Lin et al. (2024) süstemaatilisse ülevaatesse kaasatud uuringud. Kõik vähid.....	45
Tabel 5. Mueller et al. (2015) süstemaatilisse ülevaatesse kaasatud uuringud. Laste leukeemia.....	46
Tabel 6. Kim et al. (2021) süstemaatilisse ülevaatesse kaasatud uuringud. Kilpnäärmevähk	48
Tabel 7. Cottagiri et al. (2024) süstemaatilisse ülevaatesse kaasatud uuringud. Kilpnäärmevähk.....	50
Tabel 8. Frangione et al. (2022) süstemaatilisse ülevaatesse kaasatud uuringud. Ebasoodsad sünnitulemid	52
Lisa 4. Tuumajaamadega seotud psühholoogilised ja psühhosotsiaalsed mõjud - lisamaterjal	53
Tabel 9. Edwards et al. (2019) süstemaatilise ülevaate andmetabel	53
Tabel 10. Kokkuvõte Edwards et al. (2019) süstemaatilise ülevaate tulemustest.....	54

Sissejuhatus ja uuringu teaduslik taust

Tuumaelektrijaamad (TEJ) on oluline energiaallikas kogu maailmas, moodustades umbes 10% ülemaailmsest elektrienergiast. Tuumaenergia on üks väikseima süsinikujalajäljega energiatootmisviise, kus elutsükli keskmised emissioonid on umbes 12 g CO₂-ekv/kWh – mis on sarnased tuule- ja hüdroelektriga ning oluliselt madalamad kui fossiilkütustel põhineval tootmisel - ning mitmed riigid plaanivad tuumaenergia kasutuselevõttu, et vastata kasvavale energiavajadusele ja saavutada süsinikuneutraalsuse eesmärged (OECD, 2021). Globaalselt arutatakse tuumaenergia eelseid seoses kliimamuutustega kohanemisega ja sellega seotud ohtude ohjamisel, seega on ka võimalike riskide mõistmine ülioluline. Positiivse poole pealt vähendab tuumaenergia sõltuvust fossiilkütustest ning võrreldes fossiilkütustel põhinevate elektritootmise viisidega väheneb õhusaaste (World Nuclear Association, 2024). Teiselt poolt tekivad tuumaelektrijaamade töötamise käigus kasutatud tuumakütus ja radioaktiivsed jäätmed, ning tagada tuleb nende käitlemise ja pikaajalise ladustamise ohutus (IAEA, 2022). Lisaks tekitab tuumarajatiste lähedal elamine avalikkuses muret nende ohutuse ja võimalike terviseriskide pärast. Sellest lähtuvalt on tuumaenergia kasutamisega seotud tervisemõjude hindamine oluline riskikommunikatsiooni, -regulatsiooni ja energiapoliitika kujundamise seisukohalt.

Tuumaenergia tootmisega võivad kaasned heited (nii radioaktiivsed kui mitteradioaktiivsed saasteained) õhku, vette ja pinnasesse, mis võivad pikaajalisel kokkupuutel mõjutada inimeste tervist. Suurem oht saasteainete levikule on õnnetuste ja/või seadmete rikete korral, samas kaasnevad heited (mh radioaktiivsed gaasid) ka tuumaelektrijaamade tavapärase käitamise korral, kuigi neid jälgitakse ja reguleeritakse hoolikalt. Ehkki kiirgustasemed on üldreeglina madalad ja vastavad kehtestatud rahvusvahelistele ning riiklikele normidele, ei ole välistatud, et krooniline kokkupuude väikestes doosides võib teatud tingimustel tekitada pikaajalisi tervisemõjusid. Dooside piirmäärad nii kiirgustöötajatele kui elanikele on kehtestatud Euroopa Liidu Nõukogu direktiiviga 2013/59/Euratom (EU directive, 2013) ja Eesti õigusesse üle võetud kiirgusseadusega (Kiirgusseadus, 2016). Juhendeid ja soovitusi piirmäärade kehtestamiseks ja järgimiseks on välja töötanud ka Rahvusvaheline Kiirguskaitse Komisjon (ICRP) ja Rahvusvaheline Aatomienergiaagentuur (IAEA). Need piirmäärad on loodud rahvatervise kaitsmiseks ja jälgimaks ümbritsevates kogukondades ohutut kiirgusega kokkupuute taset. Riiklikud regulatsioonid ja ametkonnad (nt Kiirgus- ja tuumaohutusamet Soomes) tagavad, et TEJ tavapärase töö jooksul jõuab elanikkonnani vaid murdosa piirnormidest (<0,1 mSv/a) (Virtanen, 2024). Eestis väljastab kiirgustegevuslube, korraldab

kiirgustegevuse tegijate üle järelevalvet, peab riiklikku kiirgustöötajate doosiregistrit ning teostab ioniseeriva kiirguse ööpäevaringset seiret Keskkonnaamet. Kiirgusohu varajase hoiatamise seirevõrk koosneb 15 automaatselt kiirgusseirejaamast, mis mõõdavad reaalajas õhu gammakiirguse taset üle Eesti. Automaatjaamad on olulised ka võimaliku piiriülese kiirgussündmuste avastamise korral lähiriikides.

Madaladoosilise ioniseeriva kiirguse allikad ja doosid. Looduslik kiirgusfoon moodustab elanikkonna kiirguskoormusest valdava osa. Euroopa riikides jääb keskmine aastane looduslik kiirgusdoos vahemikku 2–3 mSv, millest suurima osa moodustab radoon. Eestis on keskmine kiirgusfoon sarnane Põhja-Euroopa teiste riikidega, kuid piirkonniti esineb märkimisväärsed erinevusi, eriti radoonitasemetes (Eesti Geoloogiakeskus, 2017). Seetõttu on oluline käsitleda tuumajaamadest pärinevat potentsiaalset lisadoosi kontekstis, kus looduslik foon on mitmekordselt kõrgem. Tuumajaamade tavapärase töö käigus eralduvad keskkonda väga väikesed kogused radioaktiivseid aineid, peamiselt gaasiliste ja vedelate heitmete kaudu. Võimalikud ekspositsiooniteed elanikkonnale on õhu kaudu levivad radionukliidid, joogivee ja pinnavee kaudu saadav kiirgus, toiduahelasse jõudvad radionukliidid ning pinnase saastumine. Tegemist on madaladoosilise ioniseeriva kiirgusega, mille aastased doosid elanikkonnale jäävad üldjuhul mitmeid suurusjärke alla tervisekaitseliste piirnormide. Rahvusvahelise Kiirguskaitse Komisjoni (ICRP) soovitude kohaselt on elanikkonna maksimaalne lubatud täiendav kiirgusdoos 1 mSv aastas, samas kui tuumajaamade tavapärase tööga seotud lisadoos jääb enamasti alla 0,01–0,1 mSv aastas (Cao et al., 2022; Ren et al., 2023; UNSCEAR, 2024). Näiteks Soome Olkiluoto tuumajaama ümbruses ei ületa elanikkonna tegelik kiirgus kokkupuutepunktis 0,001 mSv/a, mis moodustab vaid 0,1 % riiklikust piirnormist (Virtanen et al., 2024). Mõned uuringud on siiski näidanud, et radionukliidide migratsioon vette või pinnasesse võib põhjustada kroonilist elanike kiirgusdoosi suurenemist piirkonnas (Degteva et al., 1998).

Tänapäeval on maailmas ligikaudu 440 töötavat elektrit tootvat tuumareaktorit enam kui 30-nes riigis (World Nuclear Association, 2025). Valdav osa neist kuulub kergevee reaktorite (ingl *Light Water Reactors*, LWR) hulka, mis moodustavad umbes 85–90% kõigist töötavatest jaamadest. Neis kasutatakse nii jahutina kui ka neutronite aeglustina tavalist vett (H₂O). Normaalsrežiimis töötavad tuumajaamad tekitavad väga väikeseid radioaktiivsete ainete heiteid nii õhku kui ka vette. Peamised emissioonid, millel on potentsiaalne tähtsus elanikkonna kokkupuute seisukohalt, on vääriskaasid (nt krüpton, ksenoon), tritium, radioaktiivne jood ja süsinik (¹³¹I, ¹⁴C) ning väikestes kogustes aerosoolsed osakesed. Ioniseeriv kiirgus — eriti

radioaktiivsete ionide sissehingamine või toidu või joogiga organismi jõudmine — on klassifitseeritud inimeste kantseroogeniks (IARC grupp 1) (IARC, 2000). Rahvusvaheliste hinnangute kohaselt jääb elanikkonna keskmine efektiivne doos, mis on tingitud tuumajaamade tavapäraest emissioonidest, siiski mitu suurusjärku alla loodusliku taustkiirguse taseme. Seetõttu loetakse tavapärase käitamisega seotud kiirguskoormus elanikkonnale väga väikeseks.

Tuumajaamade rajamine ja käitamine on rahvusvaheliselt olnud seotud ulatusliku teadusliku ja ühiskondliku aruteluga võimalike tervise mõjude üle (IARC, 2000; ICRP, 2007; Tang and Loganovsky, 2018). Kuigi tuumaenergia kasutamine võimaldab toota suures mahus süsinikdioksiidivaba elektrienergiat, tekitab see elanikkonnas sageli muret võimalike kiirgusega seotud terviseriskide pärast. Eriti tundlikuks peetakse küsimust, kas ja mil määral võib tuumajaama läheduses elamine mõjutada kohalike elanike haigestumust, sealhulgas vähiriski ja ebasoodsaid sünnitulemusi. Lähtuvalt eeltoodust on Eestisse rajatava tuumajaama kontekstis oluline anda süstemaatiline ja kriitiline ülevaade kaasaegsest tõendusest eelretsenseeritud teadusajakirjades avaldatud epidemioloogilistest uuringutest. Kuigi tervishoiuliselt on tähtis ka kutsealane ja võimalikest õnnetustest ja kontrollimata leketest tulenev terviserisk, on käesoleva analüüsi fookus tuumajaama lähipiirkonna elanike terviseriskide hindamine tuumajaama tavapärase töö käigus.

Uuringu eesmärk

Uuringu eesmärk oli süstemaatiliselt analüüsida viimase viieteistkümne aasta (2010–2025) jooksul avaldatud teaduskirjandusest tulenevat tõendust tuumajaamade tervise mõjude kohta.

Uurimisküsimused:

1. Millised on tuumaelektrijaamade läheduses elava elanikkonna tervise mõjud võrreldes elanikkonnaga, kes elab neist kaugemal?
2. Kuidas mõjutab tuumaelektrijaamade töö (tavapärase töö, hooldusperioodid) üldrahvastiku kiirgusdoose ja sellest tulenevaid tervise mõjusid?
3. Kas tuumaelektrijaamade lähedus on seotud suurema vähki haigestumise riskiga üldrahvastikus?
4. Millised muud tervise probleemid (nt sünnidefektid, geneetilised muutused, reproduktiivhäired) on seostatavad tuumaelektrijaamade läheduses elamisega?
5. Millised rahvastikurühmad on kõige haavatavamad tuumaelektrijaamadega seotud võimalike terviseriskide suhtes

Metoodika

Uuring viidi läbi süstemaatilise kirjanduse ülevaatenä. Süstemaatilise kirjanduse ülevaate koostamisel kasutasime (kiir)ülevaate (ingl *rapid review*) metoodika põhimõtteid (Garrity et al., 2024; King et al., 2022). Süstemaatiline ülevaade on teaduslik uurimismeetod, mille eesmärk on koguda, hinnata ja sünteesida kõik asjakohased teaduslikud uuringud kindla uurimisküsimuse või teema kohta, kasutades süstemaatilist, läbipaistvat ja korratavat protsessi, et viia tehtud järelduste kallutatuse risk miinimumini. Selle eesmärgi saavutamiseks lepatakse kokku kindlad kriteeriumid mille alusel uuringud kaasatakse ja analüüsitakse. Uuringu igas etapis osaleb mitu uurimisrühma liiget, kes üksteise tööd kontrollivad. Kaasatud uuringuid võrreldakse omavahel uuringukvaliteedi alusel ning järelduste tegemisel arvestatakse rohkem kõrgema kvaliteediga uuringute tulemustega. Teaduslikud uuringud on kõige usaldusväärsem viis tõese info hankimiseks, kuid siiski ei ole võimalik teha ühtegi teaduslikku uuringut, ilma et sellega kaasneksid piirangud või risk ebatäpse tulemuse saamiseks. Tuumajaamade tervisemõjude uurimisel on kõige olulisemaks “Mõõtmisnihe”, mis tekib, kui kokkupuudet ohuteguriga ei mõõdeta täpselt, näiteks kasutatakse täpse kiirgusdoosi mõõtmise või modelleerimise asemel nn ekspositsiooni surrogaatnäitajat nagu „kaugus tuumajaamast“. Vaatlusuuringute puhul on oluline arvesse võtta ka “Segavaid tegureid (ingl *confoundres*)”. Segavad tegurid esinevad siis, kui mõni muu tegur on seotud nii uuritava kokkupuutega kui ka tulemiga. Näiteks võib naistel olla suurem geneetiline eelsoodumus mõne vähivormi tekkeks, või on mingi vanusrühm vastuvõtlikum ohuteguri mõjule (väikelapsed ioniseerivale kiirgusele) või mõjutab haiguse tekkimist inimese tervisekäitumine nagu suitsetamine. Seda saab vältida kohandamisega segavatele teguritele (nt vanus, sugu, tervisekäitumine jm). Kohandamine tagab, et võrreldakse omavahel vaid kohandatud näitajate poolest sarnaseid uuritavaid. Teaduslikes ajakirjades kipub esinema „Avaldamisnihe”. Uuringud, mis leiavad seose, avaldatakse suurema tõenäosusega kui uuringud, mis seost ei leia. Kõiki neid võimalikke vea riske arvestasime oma uuringus järelduste tegemisel.

Uurimisküsimuste määratlemiseks kasutasime rahvusvaheliselt tunnustatud PECO (ingl *population, exposure, comparison, outcome*) raamistikku. Süstemaatilisse kirjanduse ülevaatesse kaasasime eelretsenseeritud teadusartiklid mis käsitlesid järgmisi tunnuseid:

- **Rahvastik** (ingl *population*): üldrahvastik (kõik inimesed)
- **Kokkupuude** (ingl *exposure*): tuumaelektrijaama tavapärase tööga seotud tegurid: elamine tuumajaama läheduses; ioniseeriv kiirgus, mis tuleneb tuumaenergia tootmise

tavapärasest toimimisest (ei kaasata õnnetusi); muud tuumajaama läheduses esinevad võimalikud tegurid (nt müra, õhusaastus, psühholoogilised tegurid)

- **Võrdlusrühm** (ingl *comparison*): üldrahvastik või rahvastik, kes elab piirkonnades, kus kokkupuude on minimaalne või puudub
- **Tervisetulem** (ingl *outcome*): haigestumus ja suremus (sh spetsiifiline vähisuremuse määr); vähkkasvajad (sh leukeemia ja kilpnäärmevähk), geneetilised muutused, sünnidefektid ja reproduktiivtervise häired; muud kroonilised tervisehäired (kardiovaskulaarhaigused, vaimse tervise probleemid, sh ärevus, depressioon ja häiritus)

Kaasati vaid sellise uuringukavandiga uuringud, mis võimaldavad välja selgitada põhjuslikke seoseid. Kaasati järgmise uuringukavandiga uuringud:

- Süsteemaatilised ülevaated ja meta-analüüsid (sõltumata originaaluuringute uuringukavanditest)
- Originaaluuringud: kohortuuringud, juht-kontrolluuringud, sünniregistri, vähiregistri, ning surmapõhjuste registrite andmetel põhinevad uuringud.
 - Prospektiivsed, retrospektiivsed ja mitte-samaaegsed kohortuuringud,
 - Retrospektiivsed ja prospektiivsed juht-kontrolluuringud.

Me ei võtnud käesolevasse süstemaatilisse uuringusse järgmiseid uuringuid:

- Ei käsitle mõju inimeste tervisele
- Töötajapõhised uuringud (occupational exposure)
- Kiirgusõnnetused (nt Tšernobõl, Fukushima)
- Loom- või laboriuuringud
- Narratiivsed ülevaated, juhtumiuuringud, kirjad, kommentaarid, juhtkirjad, konverentside kokkuvõtted
- Teabeallikad, mis ei olnud avaldatud eelretsenseeritud teaduskirjanduses
- Enne 2010. aastat avaldatud originaaluuringud
- Enne 2015. aastat avaldatud süstemaatilised ülevaated
- Artiklid, mis käsitlevad ainult tuumarajatiste tehnilisi aspekte
- Artiklid, mis käsitlevad kiirguse mõju tervisele, kuid ei ole seotud tuumajaamadega

- Uuringud, mis puudutavad sõjalisi tuumarajatisi
- Mitte-inglisekeelsed uuringud

Kui uurimisküsimuse kohta oli avaldatud põhjalik süstemaatiline ülevaade 2015. aastal või hiljem, kaasati uuringusse ainult pärast ülevaate kaasamisperioodi avaldatud üksikuuringud. Muudel juhtudel vastati uurimisküsimusele kaasates kõik sissearvamiskriteeriumitele vastavad üksikuuringud (Garritty et al., 2024; King et al., 2022).

Tuumaenergiajaamade tervisemõjude kohta tehti süstemaatiline kirjanduse otsing. Otsing viidi läbi andmebaasis PubMed ja andmebaasis Scopus perioodi 1. jaanuar 2010 kuni 7. september 2025 kohta. PubMed andmebaasi otsingustrateegia on esitatud Lisas 1.

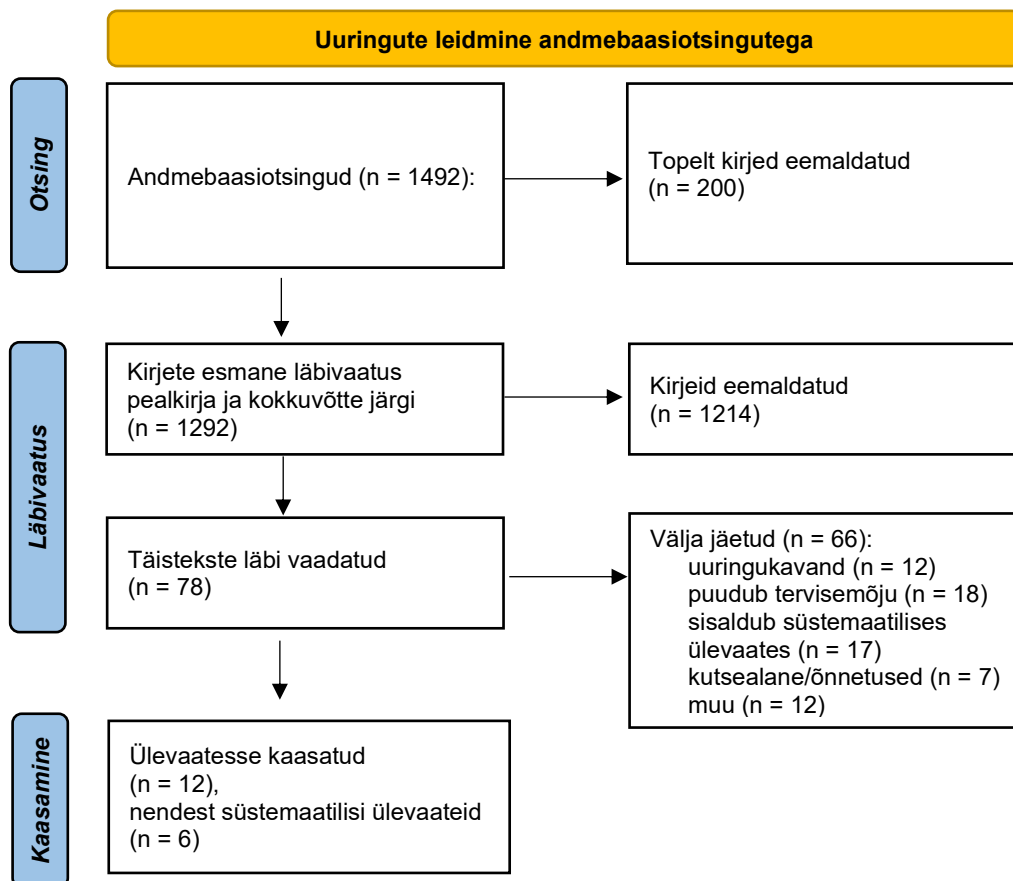
Duplikaatide eemaldamiseks kasutati „Endnote“ viitehaldustarkvara ja viidete haldamiseks kasutati „Mendeley Reference Manager“ tarkvara. Esmane uuringute valik (sõelumine) toimus uuringu pealkirja ja kokkuvõtte (ingl *titel/abstract*) põhjal. Alustuseks sõelusid kaks uurimisrühma liiget iseseisvalt 20 publikatsiooni ja arutasid seejärel tulemusi, et jõuda ühisele arusaamale uuringute kaasamise osas. Ülevaate kvaliteedi tagamiseks sõelusid kaks uurimisrühma liiget 20% kirjetest, ülejäänud sõelus vaid üks uurimisrühma liige.

Esmasel valikul potentsiaalselt sobivaks hinnatud uuringute täistekstid otsiti ja nende põhjal tehti teine sõelumine. Üks uurimisrühma liige luges läbi potentsiaalselt sobivate uuringute täistekstid ja kui ta otsustas seejärel mõne uuringu välja jätta, luges teine uurimisrühma liige täisteksti läbi ja kinnitas või lükkas ümber välja jätmise otsuse. Teise uurimisrühma liikme poolt siiski sobivaks tunnistatud uuring arutati läbi ja kaasamise või välja jätmise otsus tehti konsensuse alusel. Artiklite andmed sisestati MS Excel tabelisse.

Tulemused ja arutelu

Andmebaasiotsinguga leiti 1492 kirjet (teadusartiklit), millest 1292 puhul otsustati kas uuring vastab seatud kaasamiskriteeriumitele ainult pealkirja ja lühikokkuvõtte järgi. Täistekste vaadati läbi 78. Kaasamiskriteeriumitele vastas ja käesoleva uuringu analüüsis kasutati 12 uuringut, millest 6 olid süstemaatilised ülevaated ja 6 kohort- või registripõhised uuringud (Joonis 1).

Kõikide kaasatud artiklite olulisemad tulemused on kokkuvõtvalt kirjeldatud tabelites (Lisa 2, Tabelid 1–2).



Joonis 1. PRISMA voodiagramm teaduskirjanduse otsingute kirjeldamiseks.

Tuumajaamade tavapärase tööga seotud mõju inimeste tervisele

Käesoleva ülevaateuuringu eesmärk oli hinnata olemasolevat teaduslikku tõendusmaterjali selle kohta, milline on tuumaenergia tootmisega seotud võimalik haiguskoormus rahvastikule, tuginedes uuematele andmetele ja kasutades kaasaegseid uurimismeetodeid. Ülevaade keskendub sellele, millised tervisekahjud võivad elanikkonnal tekkida tuumaelektrijaama tavapärase töö käigus. Analüüsis ei käsitletud TEJ õnnetuste (sõjalise vm tegevuse läbi tekkinud) mõju tervisele, mõju keskkonnale ja ökosüsteemidele ja TEJ töökeskkonna mõjusid töötajate tervisele, kuigi suur osa tõendusest tuumajaamade negatiivsetest tervisemõjudest pärinevad just nendest olukordadest ja suurematest doosidest.

Tuumajaamad ja rahvastiku haigestumus- ja suremusnäitajad

Üks uuemaid meta-analüüse (Lin et al., 2024) uuris madaladoosilise ioniseeriva kiirguse tervisemõjusid inimestele, kes töötavad tuumajaamades või elavad nende läheduses. Metaanalüüsi kaasati 47 uuringut, hõlmates 175 tuumaelektrijaama 17 riigist (Belgia, Kanada, Soome, Prantsusmaa, Saksamaa, Ungari, Jaapan, Korea, Leedu, Slovakkia, Sloveenia, Hispaania, Šveits, Taiwan, Ukraina, UK ja USA) ning hõlmates 480 623 töötaja ja 7 530 886 elanikuga valimit. Tulemused näitasid, et tuumajaamade töötajatel oli vähi esinemissagedus veidi madalam kui üldrahvastikus, kuid esines märgatavalt suurem risk (RR 5,53 (CI 4,05–7,54)) mesotelioomi tekkeks. Tuumajaamade läheduses elavate elanike uuringuid oli kokku 34. Ekspositsioon defineeriti kui elamine 30 km raadiuses tuumajaamast. Tervisetulemina hinnati vähi haigestumust ja -suremust ning võrreldi kogurahvastiku samade näitajatega. Elanikel, kes elasid kuni 30 km kaugusel tuumajaamadest, oli kõigi vähivormide suhteline risk 5% võrra kõrgem (RR 1,05; CI: 1,00–1,09) võrreldes nendega, kes elasid enam kui 30 km kaugusel. Kui vähihaigestumuse ja -suremuse näitajad eraldi analüüsiti, olid kõigi vähivormide koondatud suhtelised riskid vastavalt 1,05 (CI: 1,00–1,09) esinemissageduse ning 1,02 (CI: 0,91–1,14) suremuse puhul. Erinevate vähitüüpide lõikes leiti statistiliselt oluline riski suurenemine kilpnäärmevähi puhul 17% võrra (RR 1,17; CI: 1,04–1,32) ning leukeemia puhul 9% võrra (RR 1,09; CI: 1,03–1,16). Kõigi vähivormide suhteliste riskide heterogeensus oli väga suur, I^2 väärtusega 97,2% (CI: 75,6–99,0%), mis viitab märkimisväärsele erinevusele uuringute vahel. Kõigi vähivormide analüüsid elanike seas näitasid statistiliselt oluliselt kõrgemat riski USAs (RR 1,07; CI: 1,00–1,13), Aasias (RR 1,13; CI: 1,05–1,22), alla 5-aastaste laste seas (RR 1,09; CI: 1,00–1,17), juht-kontrolluuringutes (RR 1,20; CI: 1,01–1,41), uuringutes, kus ekspositsiooni näitajana kasutati kaugust (RR 1,05; CI: 1,00–1,09), ning elanikel, kes elasid

20–30 km kaugusel tuumajaamadest (RR 1,08; CI: 1,02–1,13). Meta-regressioonanalüüs ei näidanud statistiliselt olulist doos-vastus seost tuumajaamast kauguse ja vähiriski vahel elanike seas. Uuringul olid mitmed piirangud: suur heterogeensus uuringute vahel; võimalikud mõõtmis- ja avaldamisnihe ning segavate teguritega (nt suitsetamine) mitte arvestamine. Autorid järeldavad, et kehtiv regulatiivne piirnorm 1 mSv aastas ei pruugi olla piisav elanike tervise kaitseks piirkondades, mis asuvad kuni 30 km kaugusel tuumajaamadest. Alamanalüüsides ilmnes, et võrreldes elanikega, kes elasid enam kui 30 km kaugusel tuumajaamadest, oli kõigi vähivormide risk statistiliselt oluliselt kõrgem elanikel, kes elasid 20–30 km kaugusel, samas kui sellist riski suurenemist ei täheldatud 0–10 km ega 10–20 km kaugusel elavate isikute seas. Tuumajaamadest pärinevad õhus levivate radionukliidide levikut ümbritsevasse keskkonda mõjutavad mitmed tegurid, sealhulgas jaama korstna kõrgus, osakeste suurus ja mass, atmosfääri kihistus ning tuuleolud. Eriti oluline on asjaolu, et õhusaasteained tõusevad esmalt teatud kõrguseni ning hakkavad seejärel järk-järgult sadenema, mistõttu ei pruugi nende kontsentratsioon olla suurim vahetult tuumajaama lähikonnas. Lisaks näitasid analüüsid kõigi vähivormide osas, et lastel on sama kiirgusekspositsiooni taseme juures kõrgem vähirisk võrreldes täiskasvanutega. Meta-regressioonanalüüsides ei leitud elanike seas statistiliselt olulist **doos–vastus seost** tuumajaamast kauguse ja vähiriski vahel. See tähendab, et kuigi teatud kaugusvahemikus (näiteks 20–30 km) täheldati kõrgemat vähiriski, ei moodustanud need leiud ühtlast ja järk-järgult muutuvat mustrit, mida võiks tõlgendada klassikalise doos–vastus seosena. Sellise seose puudumine vähendab tõendusmaterjali tugevust põhjusliku seose kasuks ning viitab võimalusele, et täheldatud riskierinevusi võivad osaliselt selgitada juhuslik varieeruvus, mõõtmisvead ekspositsiooni hindamisel või muud segavad tegurid, mitte otsene kiirgusdoosi mõju. Uuringute kvaliteeti hinnati madalaks või keskmiseks.

Cao jt (2022) viisid läbi ühe esimestest pikaajalistest uurimustest, et hinnata süsteemselt radioaktiivsuse tasemeid keskkonnas ja elanike tervisenäitajaid tuumajaama ümbruses Hiinas, rakendades pidevat andmekogumist aastatel 2012–2020 Qinshani tuumajaama läheduses. Uuringu eesmärk oli selgitada, kas tuumajaama tavapärase töö on mõjutanud keskkonna radioaktiivsust ning kas sellel võib olla seos elanike vähihaigestumuse ja –trendidega, kasutades keskkonna monitooringut, efektiivdoosi hinnanguid ja terviseandmete analüüsi. Koguti ja analüüsiti joogivee proove, kus mõõdeti bruto alfa- ja beetaradioaktiivsuse kontsentratsioone. Lisaks monitooriti dosimeetritega (TLD) väliskeskkonda kolmes ringkonnas tuumajaamast (0–10 km, 10–20 km ja 20–30 km), et hinnata keskkonna kiirgust. Tulemusi võrreldi WHO radioloogilise kaitse soovituslike normidega ning hinnati aastast efektiivdoosi

(AED) ja liigriski (ER). Samuti analüüsiti elanike vähihaigestumust ja selle trende võrrelduna üldrahvastikuga. Uuringu tulemused näitasid, et joogivee bruto alfa- ja beetaradioaktiivsuse kontsentratsioonid jäävad kogu 2012–2020 perioodil oluliselt alla WHO soovitatud piirväärtuste (0,5 Bq/L alfa ja 1,0 Bq/L beeta) ning olid vastavalt keskmiselt väga madalad nii toorvees kui töödeldud kraanivees. Välisõhu mõõtmised näitasid, et kogutud kiirgusdoosid (ambient environmental accumulated dose) varieerusid 0,244 kuni 0,603 mSv aastas, keskmise väärtusega $0,332 \pm 0,111$ mSv, mis on kooskõlas loodusliku taustkiirgusega ja ei näidanud olulist tõusu seoses tuumajaama tööga ega kasvavat trendi 2012–2020 perioodil. Elanike aastased efektiivdoosid, mis tulenesid nii kraanivee tarbimisest kui väliskeskkonna ekspositsioonist, olid kõik alla WHO soovitatud viitetaseme 0,1 mSv aastas ning vastav liigrisk oli samuti väga madal (vahemikus $\sim 3,9 \times 10^{-4}$ kuni $9,3 \times 10^{-3}$ mSv/a). See viitab sellele, et joogivee tarbimine ja õues viibimine ei põhjusta arvestatavat radioloogilist ohtu elanike tervisele Qinshani tuumajaama ümbruses. Elanike vähihaigestumuse analüüs näitas, et kõigi pahaloomuliste kasvaja vanusele standarditud haigestumuskordaja SIR Qinshani ümbruses oli 221/100 000, mis on sarnane Zhejiang'i provintsi üldisele tasemele. Ka leukeemia esinemissagedus oli sarnane Zhejiang'i provintsigaga ning ei näidanud olulist suurenemist. Kuigi kilpnäärmevähi esinemissagedus oli tõusutrendis, oli see kooskõlas nii Zhejiang'i regioonis kui ka kogu Hiinas täheldatud tõusuga, mis viitab pigem üldiste diagnostika- ja riskitegurite muutustele kui radioloogilisele mõju analüüsile. Autorid järeldasid, et radioaktiivsuse tasemed ning vastavad efektiivdoosid ja riskid olid madalad ning kooskõlas loodusliku taustkiirgusega, seega ei toeta olemasolevad andmed väidet, et Qinshani tuumajaama normaalne tegevus on tekitanud mõõdetavat kahju elanike tervisele kas radioaktiivsuse taseme tõusu või vähi haigestumuse tõusu kaudu. Sarnaseid tulemusi on kinnitanud ka teine Hiinas läbiviidud uuring (Ren et al., 2023).

Lapsed kui riskirühm. Lapsed on ioniseeriva kiirguse suhtes vastuvõtlikumad kui täiskasvanud, kuna nende koed ja elundid on intensiivses kasvu- ja arengufaasis, mis tähendab suuremat rakkude jagunemissagedust ning seeläbi suuremat tõenäosust, et kiirgusest põhjustatud DNA kahjustused fikseeruvad ja kanduvad edasi. Lisaks on lastel pikem eeldatav eluiga, mistõttu on rohkem aega kiirguse stohhastiliste hilismõjude, sealhulgas vähi, avaldumiseks (UNSCEAR, 2024). Tuumajaamade kontekstis on see oluline isegi väga madalate ja pikaajaliste kiirgusdooside hindamisel. Mitmed varasemad epidemioloogilised uuringud on leidnud seoseid laste vähkide, kaasasündinud arenguhäirete ning elukoha läheduse vahel tuumajaamadele. Tuntumad ülevaateuuringud on läbi viidud Saksamaal (KiKK-uuring)

(Kaatsch et al., 2008), GEOCAP uuring Prantsusmaal (Sermage-Faure et al., 2012) ja COMARE-11 Suurbritannias (Kendall et al., 2018), mis on leidnud statistiliselt olulisi seoseid suurenenud leukeemiariskiga alla 5-aastastel lastel, kes elavad kuni 5 km kaugusel tuumajaamadest. Samal ajal ei ole kõik uuringud leidnud sarnast seost – näiteks Ühendkuningriigi ja Šveitsi uuringud on andnud vastuolulisi või ebaselgeid tulemusi (Bollaerts et al., 2018; Demoury et al., 2021). Need erinevused võivad olla tingitud meetodikast, väiksematest valimitest või erinevatest ekspositsioonitingimustest (Janiak, 2014).

Käesolevasse analüüsi kaasati (Davies et al., 2025) Davies jt (2025) teadusartikkel, mis on üks kõige värskemaid ja laialt viidatud epidemioloogilisi uurimusi ning annab ajakohastatud ülevaate Suurbritannia vähiregistri statistika põhjal, kasutades suurt andmehulka (ligi 50 000 juhtu), pikka ajaperioodi (22 aastat) ja erinevaid vähi tüüpe (leukeemia, mitte-Hodgkini lümfoom, kesknärvisüsteemi kasvaja ja teised soliidtuumorid). Artikkel käsitles laste vähi esinemissagedust kogukondades, mis paiknesid kuni 25 km raadiuses tuumajaamadest ja muudest tuumarajatistest Suurbritannias ajavahemikus 1995–2016. Kaugus tuumarajatistest määratleti kogukonna rahvastikuga kaalutud tsentroidi ja lähima tuumainstallatsiooni geomeetrilise tsentroidi vahelise vahemaana nende kogukondade puhul, mis paiknesid kuni 25 km raadiuses tuumainstallatsioonist, arvestades seejuures asulate tüüpi (maa, linn) ning rahvastikutihedust. Uurimaks, kas laste erinevate vähitüüpide risk väheneb tuumainstallatsioonist kauguse suurenedes, kasutati hierarhilisi Poissoni regressioonimudeleid, et hinnata kauguse alusel kohandatud haigestumusmäära suhteid (aIRR). Analüüsi tulemused ei tuvastatud statistiliselt olulist riski suurenemist laste vähkihaigestumuses kogukondades, mis elavad tuumarajatiste läheduses, võrreldes üldrahvastikuga või kaugemal (>25 km) elavate kogukondadega. Kokkuvõtte rõhutas, et ajaloolised vähiklastrid Sellafildi ja Dounreay piirkondades uues analüüsis enam ei ilmnud ja nende piirkondade laste vähirisk ei olnud perioodil 1995–2016 enam statistiliselt kõrgem kui ülejäänud riigis. COMARE (UK Committee on the Medical Aspects of Radiation in the Environment) soovib siiski jätkata laste vähi esinemissageduse seiret ning perioodilist hindamist Sellafildi ja Dounreay tuumarajatiste lähiümbruses .

Tuumajaamad ja soliidtuumorite risk

Soliidtuumor on mõnest organist lähtuv koemassi sisaldav kasvaja (nt rinnavähk, kopsuvähk, põievähk jm). Ioniseeriv kiirgus on klassifitseeritud inimese kantserogeeniks, kusjuures nii kõrged kui ka madalad kiirgusdoosid võivad teoreetiliselt mõjutada soliidtuumorite esinemissagedust (IARC, 2000). Kuigi töötavate tuumajaamade tavapärase emissioon jääb oluliselt alla rahvusvaheliselt seatud ohutusstandardite tasemele, mõjutab elanike muret võimaliku pikaajalise madala taseme kiirguse roll vähiriski seisukohalt asjaolu, et mõned epidemioloogilised uuringud on näidanud soliidtuumorite esinemise variatsiooni tuumajaamade vahetus läheduses (Bazyka et al., 2012; Desbiolles et al., 2018; Levin et al., 2013). Sellest lähtudes hindasime selles vallas kogutud teaduslikke tõendeid, eriti kuna soliidtuumorite tekkeks võib vajalik olla pikk latentsusperiood ning paljud varasemad uuringud on olnud heterogeensed nii disaini, ekspositsiooni mõõtmise kui ka kvaliteedi osas (UNSCEAR, 2024, 2017).

Lee jt (2025) viisid läbi seni ühe kõige ulatuslikuma süstemaatilise ülevaate ja meta-analüüsi, mille eesmärk oli hinnata soliidtuumorite haigestumuse sõltuvust elamise kaugusest tuumajaamadest või muudest tuumarajatistest (nt radioaktiivse jäätmeohtlaid, tuumamaterjalide töötlemise tehased). Analüüsi kaasati 13 uuringut, mis andsid piisavalt kvantitatiivseid andmeid meta-analüüsiks. Analüüsi kaasatud soliidtuumoriteks olid rinnavähk, põievähk, kilpnäärmevähk, kesknärvisüsteemi (KNS) kasvajakasvaja ja hingamissüsteemi vähid. Analüüsides olid kaasatud uuringud 11 riigist ning kokku olid meta-analüüsi aluseks rohkem kui 55 000 juhtumit erinevate vähitüüpide lõikes. Meta-analüüsi kaasatud uuringute andmed on esitatud Lisa 3 Tabel 3. Uuringukavanditest vaid kaks olid retrospektiivsed kohortuuringud ja ülejäänud ökoloogilise disainiga. Suur osa kaasatud uuringutest kasutas elukoha kaugust tuumajaamast ekspositsiooni surrogaatmarkerina ning meta-analüüs keskendus nende uuringute standarditud haigestumusmäär (SIR), mis võrdlevad vähijuhtude esinemissagedust tuumaelektrijaamade lähedal elavate elanike ja üldrahvastiku vahel. Kuigi paljud uuringud käsitlesid elukoha kaugusi 25 km raadiuses või määratlesid laiemad ümbruspiirkonnad, ei võimaldanud olemasolevad andmed meta-analüüsis hinnata vähiriski muutumist konkreetsete kaugusvahemike lõikes. Eelkõige ei olnud piisavalt võrreldavat kvantitatiivset infot, et usaldusväärselt analüüsida, kas ja kuidas risk erineb väiksemate ja suuremate distantside vahel, sealhulgas kilpnäärmevähi puhul. Meta-analüüsi põhitulemuseks olid standarditud haigestumuskordajad (SIR), mis võimaldavad võrrelda konkreetsete soliidtuumorite

haigestumuse taset tuumajaamade lähedal elavate elanike ja võrreldava üldpopulatsiooniga. Koondatud riskihinnang kõigi analüüsitud tuumorite puhul olid statistiliselt mitteolulised: rinnavähk: SIR 1.01 (CI 0.96–1.06); põievähk: SIR 1.03 (CI 0.93–1.14); kilpnäärmevähk: SIR 0.99 (CI 0.86–1.14); KNS kasvajakas: SIR 1.00 (CI 0.92–1.10); hingamissüsteemi vähid (nt kopsuvähk): SIR 1.04 (0.89–1.23). Kõik riskihinnangud sisaldasid ühte (1), mis tähendab, et üldine soliidtuumorite esinemissagedus elanikel, kes elasid tuumajaamade või muude tuumatehaste läheduses, ei erinenud statistiliselt oluliselt võrreldes üldrahvastikuga. Uuringute heterogeensus oli kõrge (I^2 vahemikus 64 % kuni 96 %), mis näitab, et uuringute tulemused olid erineva tugevuse ja suunaga. Uuringute kvaliteeti hinnati OHAT (Office of Health Assessment and Translation) tööriistaga, millest 5 uuringut liigitati mõõduka riskiga ja ülejäänud 8 uuringut kõrge riskiga, eeskätt ekspositsiooni ja segavate tegurite puuduliku käsitlemise tõttu. Lee jt juhtisid tähelepanu ka sellele, et avaldatud uuringud olid märkimisväärselt heterogeensed: uuringute disainid varieeruvad, definitsioonid elamise kauguse kohta tuumajaamadest või muust rajatisest on erinevad ning enamik uuringuid on ökoloogilised, kus ei ole kontrollitud individuaalseid riskifaktoreid nagu suitsetamine, sotsiaalmajanduslik staatus või muud vähiriski mõjutavad tegurid. Lisaks kasutas enamik uuringuid kaugust tuumajaamast kui ekspositsiooni surrogaatnäitajat, jättes välja täpse individuaalse kiirgusdoosi hindamise. Sellised piirangud suurendavad uuringute riskitaset ja vähendavad usaldusväärsust, eriti seoses võimalike segajatega. Kuigi meta-analüüsi koondhinnangud ei olnud statistiliselt olulised, näitasid tundlikkusanalüüsid, et kilpnäärmevähi korral suurenes „trim-and-fill“ meetodi rakendamisel SIR 1,21-ni (CI 1,05–1,40). See viitab võimalusele, et osa uuringute tulemusi võib mõjutada avaldamis- või valikukalle, mille tõttu on tegelik efekt alganalüüsis alahinnatud. Selline tulemus osutab, et meetodiliselt tugevates ja vähem kallutatud uuringutes võib teatud soliidtuumorite risk olla mõõdukalt suurenenud. Lisaks meta-analüüsile käsitles Lee jt ka narratiivseid uuringuid, mis ei mahtunud kvantitatiivse analüüsi alla. Näiteks mõnes uuringus leiti märkimisväärselt kõrgem SIR mõne vähi alaliigi puhul (nt SIR vahemikus 1.8–14) piirkondades, kus vastavate tuumajaamade läheduses on ka raua- või muu metallitööstus ning potentsiaalsed kemikaaliemissioonid, mis võivad mõjutada kasvajakasvade esinemist ning ei ole seotud ainult kiirguse mõjuga. Kokkuvõttes ei leidnud Lee jt (2025) meta-analüüs statistiliselt olulist seost soliidtuumorite üldise haigestumuse ja tuumajaamade läheduse vahel, kui vaadelda kõiki uuringuid kokku ja kasutada standarditud haigestumusmäära (SIR \approx 1.00–1.04). Samas viitab heterogeensus ja piiratud oluliste uuringute kvaliteet sellele, et juhtudel, kus uuringud on vähem kallutatud ja paremini kohandatud segavatele teguritele, võivad mõned soliidtuumorite riskihinnangud olla mõõdukalt kõrgemad,

kuid neid tulemusi tuleb tõlgendada ettevaatlikult ning mitte pidada otseseks põhjuslikkuse tõendiks.

Tuumajaamad ja laste leukeemiarisk

Laste leukeemia on kõige sagedasem pahaloomuline kasvaja lapseas, moodustades üle ühe kolmandiku kõigist vähidiagnoosidest alla 15-aastastel lastel. Seda haigust iseloomustab suhteliselt lühike latentsusperiood ning esinemissageduse tipp varases lapseas, tavaliselt vanuses kaks kuni neli aastat (Mueller and Gilham, 2015). Selle etioloogia on valdavalt teadmata. Ioniseeriv kiirgus on üks väheseid hästi tõendatud leukeemia riskitegureid, mistõttu on juba aastakümneid pööratud tähelepanu võimalikule seosele laste elukoha ja tuumajaamade läheduse vahel. Kuigi töötavate tuumajaamade tavapärase kiirgusheide jääb üldjuhul märkimisväärselt alla rahvusvaheliselt kehtestatud piirnormide, on mitmes riigis kirjeldatud lokaalseid laste leukeemia klastreid, mis on tekitanud vajaduse süstemaatiliselt hinnata võimalikke seoseid ning nende epidemioloogilist usaldusväärsust. Tuntumad uuringud on läbi viidud Saksamaal (KiKK-uuring) (Kaatsch et al., 2008), GEOCAP uuring Prantsusmaal (Sermage-Faure et al., 2012) ja COMARE-11 Suurbritannias (Bridges, 2006), mis on leidnud statistiliselt olulisi seoseid suurenenud leukeemiariskiga alla 5-aastastel lastel, kes elavad kuni 5 km kaugusel tuumajaamadest. Samal ajal ei ole kõik uuringud leidnud sarnast seost – näiteks Ühendkuningriigi ja Šveitsi uuringud on andnud vastuolulisi või ebaselgeid tulemusi (Bollaerts et al., 2018; Kendall et al., 2018). Need erinevused võivad olla tingitud meetodikast, väiksematest valimitest või erinevatest ekspositsioonitingimustest (Janiak, 2014). Samas ei ole hilisemad uuringud suutnud KiKK-uuringu tulemusi üheselt kinnitada. Näiteks Ühendkuningriigis Bithelli ja kolleegide poolt läbi viidud uuring, mis kasutas sarnast meetodikat ning keskendus alla viieaastastele lastele, kes elasid viie kilomeetri raadiuses tuumajaamadest, ei tuvastanud statistiliselt olulist seost elukoha läheduse ja leukeemiariski vahel (Bithell et al., 2013). Vastukäivad tulemused on toonud esile vajaduse suurema statistilise võimsusega analüüside järele. Seetõttu on mitmed teadlased soovitanud rahvusvaheliste andmete koondamist, et hinnata laste leukeemia riski tuumajaamade vahetus läheduses usaldusväärsemalt. Süstemaatilised ülevaated ja meta-analüüsid võimaldavad hinnata üksikute uuringute tugevusi ja piiranguid ning saada terviklikum ülevaade terviseriskidst. Kuigi üks meta-analüüs viidi läbi suhteliselt hiljuti (Baker and Hoel, 2007), põhines see valdavalt enne 2000. aastat avaldatud uuringutel, mistõttu jäid uuemad epidemioloogilised andmed selles käsitluses arvesse võtmata.

Käesolevasse analüüsi kaasati neli publikatsiooni, millest keskse koha hõivab Mueller jt (2015) süstemaatiline ülevaade ja meta-analüüs ning seda täiendavad kaks Krümmeli tuumajaama piirkonda käsitlevat uuringut (Gianicolo jt, 2024; Grosche jt, 2017) ning Kheifets jt (2017) metodoloogiline ülevaade laste leukeemia ja keskkonna-ekspositsioonide uurimisest.

Mueller ja kolleegid viisid läbi süstemaatilise kirjanduse ülevaate ja meta-analüüsi, mille eesmärk oli hinnata laste leukeemia riski seoses elukohaga tuumajaamade läheduses. Analüüsi kaasati ökoloogilised uuringud (10), juht-kontroll uuringud (2) ja kohortuuringud (2), ja, milles ekspositsiooni hinnati elukoha kauguse alusel lähimast tuumajaamast. Uuringus oli 9 riiki (peamiselt Euroopa + Kanada ja USA) ja 63 TEJ. Metaanalüüsi kaasatud uuringute andmetabel on esitatud Lisas 3, Tabel 5.

Metaanalüüsis vaadeldi laste (<15-aastased) elamist kuni 25 km raadiuses tuumajaamast. Selles analüüsis ei leitud laste leukeemia riski suurenemist: kombineeritud riskihinnang (RR/OR) oli 1,00 (CI 0,95–1,05), mis ei viita statistiliselt olulisele seosele. Samas näitasid alamanalüüsid, et alla 5-aastaste laste puhul, kes elasid tuumajaamadele väga lähedal (kuni 5 km), esines mõnedes uuringukavandites riskitõusu signaal. Nelja kohortuuringu andmetel põhinevas alam-analüüsis leiti mõõdukalt suurenenud leukeemiarisk (SIR 1.33 (CI 1.05–1.68)), samas kui juht-kontroll uuringutes olid tulemused ebajärjekindlad ja statistiliselt mitteolulised (OR 1.45 (CI 0.74–2.86)). Autorid rõhutasid, et väikese juhtumite arvu, heterogeensete uuringukavandite ning ekspositsiooni kaudse hindamise tõttu ei saa neid tulemusi tõlgendada põhjusliku seosena. Uuringu üheks olulisemaks piiranguks oli individuaalse kiirgusdoosi puudumine ning kauguse kasutamine ekspositsiooni markerina (Mueller and Gilham, 2015).

Krümmeli tuumajaama piirkond Saksamaal on üks enim uuritud laste leukeemia klastrite piirkondi Euroopas. Grosche jt (2017) tegid põhjaliku ülevaate Krümmeli laste leukeemia klatri kujunemisest ja selle uurimisest alates 1990. aastatest. Ülevaates kirjeldatakse, et teatud ajaperioodidel oli alla 5-aastaste laste leukeemia esinemissagedus piirkonnas mitmekordselt kõrgem võrreldes riikliku keskmisega. Samas ei ole senised uuringud suutnud tuvastada usaldusväärset keskkonnaekspositsiooni ega bioloogilist mehhanismi, mis seletaks täheldatud klastrit. Ülevaates käsitletakse mitmeid hüpoteese, sealhulgas ioniseerivat kiirgust, radooni, elektromagnetvälju ja teisi võimalikke riskitegureid, kuid ükski neist ei ole leidnud veenvat kinnitust. Autorid järeldavad, et kuigi klaster on epidemioloogiliselt hästi dokumenteeritud, jääb selle põhjus ebaselgeks. Uuemad andmed Krümmeli ümbruse leukeemia esinemissageduse

kohta näitavad, et esinemissagedus on nüüd võrreldav Saksamaa keskmise määraga (Grosche et al., 2017). Uuringu peamised tulemused on esitatud Lisas 2, Tabel 2.

Gianicolo jt (2024) analüüsisid laste (<15 a) leukeemia esinemist ajavahemikus 2004–2019, kasutades registripõhiseid andmeid ja ökoloogilist uuringukavandit. Analüüs hõlmas 321 omavalitsust ning 356 haigusjuhtu. Riskihinnangud esitati standarditud haigustumuskordajana (SIR) ja riskisuhted (IRR) esitati piirkonniti. Krümmeli tuumajaama vahetus läheduses paiknevas Geesthachti piirkonnas leiti võrreldes ülejäänud uuritava alaga kõrgem laste leukeemia esinemissagedus (SIR 2.29, CI 0.99–4.51 ja IRR 1.80, CI 0.88–2.79). Kuigi riskihinnangud viitasid võimalikule suuremale riskile, olid tulemused statistiliselt mitteolulised. Autorid ei tuvastanud selget ruumilist mustrit, mis oleks kooskõlas tuule suuna või muude keskkonnateguritega, ning rõhutasid, et tulemusi piirab ökoloogiline disain ja väga väike juhtumite arv. Autorid järeldavad, et täheldatud risk ei ole seletatav tuumajaama tavapärase kiirgusheitega (Gianicolo et al., 2024). Uuringu peamised tulemused on esitatud Lisas 2, Tabel 2.

Kheifets jt (2017) uuring käsitles laste leukeemia uuringute metodoloogilisi aspekte, võrreldes erinevaid keskkonnaekspositsioone, sealhulgas ioniseerivat kiirgust, magnetvälju ja radooni. Autorid rõhutasid, et paljud tuumajaamade lähedust käsitlevad uuringud kannatavad sarnaste probleemide all: ekspositsiooni ebatäpne hindamine, elukoha muutuste arvestamata jätmine ning piiratud võime kontrollida olulisi segavaid tegureid. Ülevaate põhjal ei ole olemas veenvat epidemioloogilist tõendit, et töötavate tuumajaamade tavapärane kiirgusheide suurendaks laste leukeemiariski, kuid samas ei saa väikeseid riske täielikult välistada olemasolevate meetodite piirangute tõttu.

Kokkuvõttes näitavad käsitletud uuringud, et laste leukeemia ja tuumajaamade läheduse vahel ei ole leitud ühtset ja tugevat epidemioloogilist seost. Suuremahulised meta-analüüsid ei kinnita riski suurenemist tuumajaamast suurematel kaugustel (kuni 25 km), samas kui väga lähedaste elukohtade puhul on mõnes uuringus täheldatud riskitõusu signaale, mis põhinevad peamiselt ökoloogilistel andmetel ja väikestel juhtumite arvudel. Epidemioloogilise tõendusmaterjali kvaliteeti piiravad eeskätt individuaalse ekspositsiooni puudumine ja metodoloogilised kitsaskohad, mistõttu on edasised uuringud, mis kasutavad täpsemaid dooshinnanguid ja tugevamaid uuringukavasid, jätkuvalt vajalikud.

Haigusklasterite tekke üheks hüpoteesiks on nn *population mixing* ehk rahvastiku segunemine, mis on üks tuntumaid mittekeskkondlikke seletusi ka laste leukeemiaklasterite tekkele (Kinlen,

2011) . See tugineb tähelepanekule, et haiguste esinemissagedus võib ajutiselt suurenda piirkondades, kus toimub kiire ja ulatuslik rahvastiku sissevool varem suhteliselt isoleeritud kogukondadesse. Leukeemia, eriti ägeda lümfoblastse leukeemia, tekkes võib rolli mängida ebatavaline immuunvastus laialt levinud asümptomaatiliste infektsioonide suhtes. Grosche jt (2017) käsitlevad population mixing’u hüpoteesi Krümmeli laste leukeemia klastri kontekstis kui üht võimalikku alternatiivset seletust, mis ei eelda ioniseeriva kiirguse rolli. Autorid märgivad, et selles piirkonnas toimusid mitmel ajaperioodil olulised demograafilised muutused, sealhulgas tööstus- ja teadusasutustega seotud tööjõu sissevool, mis ajaliselt kattus laste leukeemia suurenenud esinemissageduse perioodidega (Grosche et al., 2017). Rahvusvahelised epidemioloogilised uuringud on kirjeldanud population mixing’ut uute tööstuspiirkondade rajamisel, suurte infrastruktuuriprojektide elluviimisel, sõjaväebaaside ümbruses ning muudes olukordades, kus toimub ajutine või püsiv rahvastiku kiire juurdekasv (Kinlen, 2011). Mitte kõik sarnased demograafilised muutused ei too kaasa leukeemia esinemissageduse suurenemist, mis viitab population mixing’u rolli kontekstipõhisusele ja multifaktoriaalsele iseloomule (Grosche et al., 2017; Kheifets et al., 2017).

Tuumajaamad ja kilpnäärmevähi risk

Kilpnäärmevähk on üks sagedasemaid endokriinsüsteemi kasvajakasvaja ning selle esinemissagedus on viimastel aastakümnetel maailmas tõusnud, osaliselt tänu paremale diagnostikale ja osaliselt võimalikule keskkonnaekspositsiooni mõjule. Eriti tundlik on kilpnääre radioaktiivse joodi suhtes, mis akumuleerub kilpnäärmekudedesse ja võib kahjustada DNA-d (UNSCEAR, 2024).

Kilpnäärmevähi riski hindamiseks kaasati käesolevasse analüüsi 2 süstemaatilist ülevaadet.

Kim jt (2016) süstemaatilises ülevaates analüüsiti teaduskirjandust, mis oli ilmunud kuni aastani 2015 (märts) ja mis käsitlesid elamist tuumajaamade läheduses ning kilpnäärmevähi haigestumust ja suremust (Kim et al., 2016). Meta-analüüsis võeti kokku 13 epidemioloogilist uuringut 36 tuumajaama kohta 10 riigist ning need hõlmasid kohortuuringuid, ristlääbilõikelisi ja ökoloogilisi uuringuid. Ekspositsioon hinnati elamisena kindlas kaugusvahemikus tuumajaamast (nt <5 km, <10 km, <20 km või administratiivsete piirkondade põhjal), ilma individuaalseid ioniseeriva kiirguse doose otseselt mõõtmata. Meta-analüüsi koondhinnang ei näidanud statistiliselt olulist kilpnäärmevähi riski suurenemist elanikel, kes elasid tuumajaamade läheduses, kui vaadelda kõiki uuringuid kokku. Standarditud haigestumusmäär

(SIR) oli 0,98 (CI 0,87–1,11) ning standarditud suremusmäär (SMR) oli 0,80 (CI 0,62–1,04), mis ei viita üldisele riski suurenemisele võrreldes üldrahvastikuga. Samas näitasid tundlikkusanalüüsid, et uuringutes, kus klassifitseeriti kokkupuute aluseks kaugus tuumajaamast (<20 km), näitas statistiliselt olulist seost kõrgema kilpnäärmevähi riskiga hästi disainitud uuringutes, kus riskisuhtarv ehk šansisuhe (OR) oli 1,75 (CI 1,17–2,64). Selline tulemus viitab, et lähemal (<20 km) elamine võib mõnes kontekstis olla seotud kõrgema kilpnäärmevähi riskiga, kuigi kogu andmestiku põhjal ei olnud üldist riski suurenemist. Kim jt meta-analüüsi üks oluline piirang on suur ökoloogiliste uuringute osakaal; uuringud, kus ekspositsiooni hinnatakse elukoha kauguse järgi ilma individuaalsete kiirgusdooside täpse hindamiseta, ning heterogeensus uuringute disainides ja rahvastikus. Olemasoleva tõendusmaterjali põhjal ei saa teha kindlaid põhjuslikke järeldusi (Kim et al., 2016).

Cottagiri jt viimane süstemaatiline ülevaade ja meta-analüüs (2024) keskendus konkreetselt kilpnäärmevähi haigestumusele ja osutas, et varasemad ülevaated olid piiratud ning epidemioloogilised tõendid on jätkuvalt ebajärjekindlad. Teaduskirjandusest leiti 2006 publikatsiooni aastatel 1983-2023 ja pärast kriteeriumide rakendamist kaasati analüüsi 11 uuringut 11 riigist, mis käsitlesid kilpnäärmevähi esinemist elanikel, kes elasid tuumajaamade läheduses. Enamus uuringuid olid ökoloogilised, lisaks üks kohortuuring ja üks sünnikohort. Ekspositsiooni markeriks kasutati elukoha kaugust tuumajaamast ($nt \leq 5$ km, ≤ 25 km või administratiivsed piirkonnad). Koondanalüüs näitas, et elamine tuumajaamade läheduses oli seotud väikese, kuid statistiliselt mitteolulise kilpnäärmevähi riski suurenemisega (RR 1,09 (CI 0,93–1,29), võrreldes nendega, kes elasid kaugemal. Heterogeensusanalüüs näitas, et riskihinnangud olid suuremad uuringutes, kus kasutati väiksemaid kaugusi tuumajaamast (näiteks ≤ 5 km), mis on kooskõlas sellega, et ioniseeriva kiirguse tasemed võivad kiiremini väheneda eemaldudes tuumajaamast. Lisaks oli riskihinnang RR tugevam uuringutes, mida hinnati vähem kallutatuks (RR 1,29 CI 0,77–2,16), kuigi see ei olnud statistiliselt oluline. Soospetsiifilisi erinevusi ei leitud, mõlema sugupoole alarühmas olid riskid sarnased, kuigi mitte statistiliselt olulised. Autorid rõhutasid, et kuigi mõnes alarühmas esines mõõdukas riskitõus, ei saa neid tulemusi pidada otseseks tõendiks põhjuslikust seosest, kuna uuringute kvaliteet oli üldiselt madal kuni mõõdukas, enamasti olid kasutatud ökoloogilised uuringukavandid ja individuaalsest kiirguse doosi ei hinnatud (Cottagiri et al., 2024).

Kokkuvõtvad tulemused mõlema teadusartikli kohta on esitatud Lisas 2, Tabel 1 ja analüüsidesse kaasatud uuringute üldandmed Lisas 3, Tabelid 6 ja 7.

Nendest kahest metaanalüüsist võib järeldada, et praegu puuduvad üheselt mõistatavad tõendid kilpnäärmevähiriski ja tuumaelektrijaamade läheduses elamise vahel. Siiski näitavad rangemad uuringukavandid ja geograafiliselt detailsemad uuringud ($\leq 5\text{--}20$ km) potentsiaalset riski tõusu väga lähedal elavatel inimestel, mida tuleb tõenäoliselt edasi uurida. Mõlema meta-analüüsi piirangud — peamiselt ökoloogilised uuringukavandid, puudulik individuaalne ekspositsiooni hindamine ja erinev metodoloogia — vähendavad võimet teha otseseid põhjus-tagajärg seoseid. Siiski viitavad nii Kim jt kui ka Cottagiri jt andmed sellele, et kui risk on olemas, on see väga väike, potentsiaalselt seotud lähema elukohaga tuumajaamadele ja võib sõltuda uuringute kvaliteedist ning ekspositsiooni määratlemise täpsusest.

Tuumajaamad ja ebasoodsad sünnitulemid

Madaladoosilise ioniseeriva kiirgusega (LDIR) kokkupuude vanematel (isal-emaal) ja raseduse ajal võib pärineda mitmest allikast, sealhulgas meditsiinilistest diagnostilistest protseduuridest (nt röntgen- või kompuutertomograafia uuringud), kutsetööl saadud ioniseerivast kiirgusest, aga ka elukohast tuumajaamade või muude tuumarajatiste läheduses (NRC, 2006). Need allikad võivad mõjutada eostuseelset perioodi, samuti in-utero kokkupuudet raseduse ajal, mille tulemuseks on rakkude DNA kahjustused ja mittekorrektne parandamine. Rasedusperiood on lapse tervise ja ellujäämise aspektist kriitilise tähtsusega ning selle perioodiga on seotud mitu tervisenäitajat, sealhulgas raseduse pikkus ja sünnikaal. Madala sünnikaalu (LBW) ja enneaegse sünni esinemine on olulised riskitegurid nii lühi- kui ka pikaajaliste terviseprobleemide tekkeks (USEPA, 2019). Nende tüsistuste hulka kuuluvad imikute suremus ja haigestumus, samuti muud tervisemõjud, mis võivad avalduda hilisemas elus, nagu hüpertensioon, diabeet ja südame-veresoonkonna haigused (NRC, 2006).

Frangione jt metanalüüs (2023) uuris vanemate (isa-ema) kokkupuudet madaladoosilise kiirgusega ja selle seoseid erinevate sünnitulemitega (väike sünnikaal, raseduse katkemine, enneaegse sünnitus ja surnultsünd). Uuringusse kaasati isikud, kes olid kokku puutunud tööalaste ja meditsiiniliste kiirgusallikatega, tuumakatastroofidega või kelle elukoht oli tuumaelektrijaamade lähedal. Analüüsi aastatel 1990–2021 aastal ilmunud teadusartiklid. Kokku tuvastati 26 uuringut, milles esitati seosemõõtjaid väikese sünnikaalu (vastavalt 10 uuringut), raseduse katkemise (11) ja surnultsünni (8) kohta. Enneaegse sünnituse metaanalüüsi ei olnud võimalik läbi viia uuringute väikese arvu tõttu. Vaid kaks uuringut käsitlesid ekspositsioonina (tuumaelektrijaama lähedal elamist (Gong et al., 2017; Ha et al., 2015). Metaanalüüsi kokkuvõttes oli väikese sünnikaaluga lapse sünni suhteline risk (RR) kiirgusega kokku puutunud ja kiirgusega kokku puutumata laste seas 1,29 (CI 0,97–1,73). Vastavad raseduse katkemise ja surnult sündimise riskihinnangud olid vastavalt 1,15 (CI 1,02–1,30) ja 1,19 (CI 0,98–1,45). Tulemused näitavad, et ioniseeriv kiirgus ei suurenda ebasoodsate sünnitustulemuste riski. Uuritud sünnitulemitest suurenes statistiliselt oluliselt vaid üks – raseduse katkemise risk, mis oli seotud ligikaudu 2% võrra kõrgema suhtelise riskiga (Frangione et al., 2023). Kokkuvõttes viitavad avaldatud uuringud sellele, et madaladoosilise ioniseeriva kiirguse allikad vanematel ja raseduse ajal võivad soodustada mõningaid negatiivseid sünnitulemusi, kuid seoste tugevus on keskmiselt nõrk ja heterogeenne.

Teaduslikult on ebaselge, kas emakasisese kokkupuude väikese doosiga ioniseeriva kiirguse korral suurendab elu jooksul hematoloogiliste pahaloomuliste kasvajate riski või mitte.

Tuumajaamadega seotud psühholoogilised ja psühhosotsiaalsed mõjud elanikele

Käesolevasse analüüsi ei kvalifitseerunud ükski tuumajaamade läheduses elamisega seotud ärevuse, häirituse, mure vm psühholoogilisi või psühhosotsiaalseid (PS) tegureid käsitlev uuring. Selle üheks põhjuseks on uuringutes kasutatud kavandite mittevastavus käesolevas analüüsis seatud kriteeriumitega, kuna enamasti on kasutatud kvalitatiivseid uuriguid ja segameetodeid. Siinkohal esitame siiski peamised tulemused ühe süstemaatilise ülevaate kohta. Edwards ja kaasautorite süstemaatiline ülevaade (2019) on seni ainus avaldatud süstemaatiline ülevaade, mille fookus on psühholoogilistel ja subjektiivsetel kogemustel seoses tuumaenergia arenguga (Edwards et al., 2019). Ajalooline ülevaade demonstreerib, kuidas varased selleteemalised uuringud keskendusid aatomipommide psühholoogilisele mõjule ja tuumasõja üleelamise kogemusele. Hilisemad uuringud käsitlesid rohkem tuumaenergia ja -tehnoloogiaga kooselamise psühholoogilisi aspekte. Analüüsi kaasati 26 kvalitatiivsete ja segameetoditega (intervjuud, fookusgrupid jm) uuringut, mis kirjeldavad inimeste subjektiivseid kogemusi seoses tuumaenergia. Peamised esilekerkinud teemavaldkonnad olid: 1) ärevus ja mure tervise pärast (kuigi tegelikud radioloogilised riskid elupiirkonnas on sageli väga väikesed); 2) usalduse puudumine ametivõimude vastu halva kommunikatsiooni ja info vähesuse tõttu; 3) „sense of place“ – seotus kodukoha ja identiteediga. Kokkuvõtte uuringu metoodikast ja tulemuste teemagruppidest on esitatud Lisas 4, Tabel 9 ja 10. Uuringutest selgus, et inimestel, kes elavad tuumajaamade lähedal või mõtlevad neile, on sageli madal usaldus võimuorganite ja riskikommunikatsiooni suhtes. See võib suurendada ärevust ja muret. Hirm kiirguse kahjulikkuse, võimalike tervisemõjude ja radiatsiooniohuga kokkupuute ees oli korduvalt esile toodud kogemus. See hirm ei põhine alati teaduslikel faktidel, vaid tugevalt subjektiivsetel riskitaju reaktsioonidel. Tuumajaamadega seotud kogemused ei ole mitte ainult negatiivsed. Mõned kogukonnaliikmed kirjeldasid tuumajaama kohalolekut kui osa oma identiteedist või kohatunnetusest, mis võib kas leevendada või suurendada muret (nt kui see on seotud sotsiaalse või majandusliku väärtusega). Uuringutes leiti, et inimeste varasemad elukogemused ja uskumused kujundavad tugevalt nende psühholoogilist vastust tuumatehnoloogiatele. Kuigi Edwards jt keskendusid peamiselt kvalitatiivsele kirjandusele, on ka kvantitatiivsed epidemioloogilised uuringud näidanud, et tuumaavariiga kokkupuude või tuumakatastroofi kogemus põhjustab suuremat ärevust ja stressi. On mitmeid narratiivseid või süstemaatilisi ülevaateid, mis käsitlevad tuumakatastroofide vaimse tervise tagajärgi (nt Fukushima, Chernobyl, Three Mile Island) – kuid need ei keskendu elamisele tuumajaamade

lähedal tavatingimustes, vaid pigem katastroofi järelmõjudele ja traumast tulenevatele psühholoogilistele tagajärgedele. Fukushima katastroofiga seotud uuringutes on leitud, et elanikud kogesid suuremat psühholoogilist stressi, ärevust, depressiooni ja PTSD-sümptomeid. Samas on psühholoogiline stress sageli suurem ja püsivam kui otsesed füüsilised tervisemõjud. See oli seotud peamiselt riskitaju, evakueerimise ja elu ebakindlusega, mitte ainult tegeliku kiiritusega (Shigemura et al., 2021; Tanisho et al., 2016). Pikemaajalised uuringud näitavad, et suurem kiirguse riskitaju kohe pärast avariid võib ennustada hilisemaid psühho-traumaatilisi stressisümptomeid (Fukasawa et al., 2020). Isegi kui tegelik kiirgustase on madal, võib hirm selle ees põhjustada elanikele märkimisväärset ärevust ja vaimset stressi (Venables et al., 2012).

Riskitaju ei ole ainult negatiivne, kuid on mitmetahuline. Mõned uuringud on näidanud, et elanikud võivad tegelikult kogeda turvatunnet ja sotsiaalset identiteeti seoses tuumajaamade kohalolekuga, nt kui see loob uusi töökohti või kogukonnaga tugevaid suhteid (Venables et al., 2012).

Üks uuring tuumajaamade visuaalse häiringu kohta tuli välja aga tuulikute aruande otsinguga (Murcia et al., 2017), 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 (keskmise vanus 24 aastat), kellele näidati 60 erinevat värvilist pilti, mis jagunesid kolme rühma: maastikud koos tuulikutega ja ilma, maastikud koos päikesepaneelidega 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 päikesepaneelid 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 tuumajaamad tekitavad inimestes negatiivseid emotsioone. Uuringu tulemust võis mõjutada asjaolu, et uuringus osales vaid 14 uuritavat ning enamik neist suhtus taastuvenergeetikasse positiivselt (Murcia et al., 2017).

Metoodika valiku põhjendus, uuringu tugevused ja nõrkused

Kaasasime uuringusse ainult eelretsenseeritud ajakirjades avaldatud teadusartiklid, mille disain võimaldas selgitada välja põhjuslikke seoseid. Kõige usaldusväärsemad on juhuslikustatud kontrolluuringud (nt eksperimente), kuid neid ei ole võimalik töötavate tuumajaamade puhul teha, ning inimesi ei ole eetiline eksponeerida ohtlikule ioniseerivale kiirgusele. Seetõttu tuleb ioniseeriva kiirguse pikaajalise mõju uurimiseks teha pikaajalisi jälgimisuuringuid. Sellised uuringud on retrospektiivsed või prospektiivsed kohortuuringud, mis kaasati käesolevasse ülevaatesse. Samuti kaasati süstemaatilised ülevaated ja meta-analüüsid, mis on kõige kõrgema kvaliteediga uuringute tüüp. Süstemaatiline ülevaade on olemasoleva tõenduse süntees, mis kasutab selget, läbipaistvat ja süstemaatilist metoodikat teemakohase tõenduse leidmiseks, hindamiseks ja esitamiseks. Me kaasasime sünniregistri, vähiregistri, ning surmapõhjuste registrite andmetel põhinevad uuringud ning juht-kontrolluuringud.

Analüüsi tugevuseks on uuemate (alates 2010) uuringute kaasamine. Varasemad uuringud, eriti 1980.–1990. aastatel, viitasid mitmetele tervisemõjudele, kuid nende metoodika oli sageli piiratud. Uuemad uuringud kasutavad täpsemaid ekspositsioonihinnanguid, suuremaid andmestikke ja paremat segajate kontrolli. Samuti on tänapäevased tuumajaamad tehnoloogiliselt oluliselt arenenumad, emissioonid madalamad ja seire tõhusam, mis võib seletada erinevusi varasemate ja uuemate tulemuste vahel.

Reaktoritüüp kui epidemioloogiline riskitegur. Epidemioloogilistes uuringutes ei käsitleta reaktoritüüpi (nt PWR, BWR, CANDU) tavaliselt iseseisva riskitegurina. Tervisemõjude uurimisel on keskne küsimus *elanikkonna tegelik kokkupuude ioniseeriva kiirgusega*, mitte rajatise tehniline disain iseenesest. Reaktoritüüp muutuks epidemioloogiliselt oluliseks vaid juhul, kui see tooks kaasa süstemaatiliselt erineva ja mõõdetava kiirgusdoosi elanikkonnale. Empiirilisel on sellist erinevust keeruline tuvastada, kuna regulatiivsed heitenormid ühtlustavad eri reaktoritüüpide keskkonnamõju; tegelikud emissioonid sõltuvad lisaks reaktoritüübile ka jaama vanusest, käituspraktikatest, meteoroloogilistest tingimustest ja kohalikust geograafiast (ICRP, 2007; NRC, 2012; UNSCEAR, 2024). Uuringute heterogeensust suurendab ka asjaolu, et mitmetes uuringutes käsitletakse koos erinevaid tuumarajatisi (nt uurimisreaktorid, kütuse ümbertöötlemistehased, jäätmeoidlad jm). Samas on ka uuringuid, mis piirduvad üksnes elektrit tootvate tuumajaamadega.

Kaugus tuumajaamast ekspositsiooni markerina. Kuna individuaalseid doosiandmeid on harva võimalik saada, kasutatakse epidemioloogias peamiselt kaugust tuumajaamast kui

ekspositsiooni surrogaat-tunnust. Selline lähenemine on praktiline ja võimaldab suuri rahvastikupõhiseid analüüse, kuid sellel on olulised piirangud, nt võib individuaalne kokkupuude erineda märkimisväärselt kauguse alusel hinnatust ning suure ja ebaühtlaselt asustatud piirkonna puhul võib tekkida ekspositsiooni väärklassifikatsioon. Doosipõhine lähenemine terviseriskide hindamisel on täpsem. Kaasaegsemates uuringutes püütakse tuumajaamast elamise kauguse asemel kasutada modelleeritud või hinnangulisi kiirgusdoose, mis põhinevad dokumenteeritud heitmetel, levikumudelitel ja standardsetel doosikordajatel (Cao et al., 2022; Tang and Loganovsky, 2018; Wu et al., 2023). See lähenemine on metodoloogiliselt tugevam, kuid piiratud andmete kättesaadavuse tõttu on see harva rakendatav suurtes mitmeriigilistes uuringutes. Meie analüüsi kaasatud uuringutes kasutatud elamiskaugused varieerusid märkimisväärselt, ulatudes 1–50 km-ni. Võimalikud tervisemõju signaalid ilmselst kõige lühematel vahemaadel (alla 5 km), samas kui kaugematel distantidel riskide suurenemist ei täheldatud. Epidemioloogilise tõenduse põhjal peetakse elamupiirkondade rajamist vähemalt 5–10 km kaugusele tuumajaamast elanikkonna tervise seisukohalt ohutuks (Kim et al., 2016; Spix et al., 2008). Puhvertsoon (nt 30 km) on oluline mitte ainult võimalike füüsiliste riskide vähendamiseks, vaid ka elanike tajutud ohutunde ja sotsiaalse vastuvõetavuse seisukohalt. Eesti kontekstis tuleb tuumajaama rajamisel arvesse võtta piirkonna asustustihedust, puhvertsooni suurust ning läbipaistvat riskikommunikatsiooni. Uuringusse kaasati ainult inglise keeles avaldatud teaduslik kirjandus. See ei põhjusta meie hinnangul suurt kallutatust meie saadud tulemustes, sest inglise keel on tänapäeval põhiline teaduskeel, milles avaldatakse kõik olulisemad teadustulemused. On vähe tõenäoline, et mõni väga oluline tulemus on avaldatud vaid mõnes muus keeles.

Kokkuvõte ja järeldused

Lähtudes käesolevas süstemaatilises kirjanduse ülevaates analüüsitud teadusuuringutest saame teha järgnevad järeldused:

- Süstemaatilised ülevaated viitavad väikesele riskitõusule teatud vähivormide, näiteks kilpnäärme- ja leukeemia esinemisele elanike hulgas, kes elavad tuumaelektrijaamade lähikonnas (≤ 30 km), kuid tulemused on sageli väikese efekti suuruse ja suure heterogeensusega ning võivad olla mõjutatud segavatest teguritest. Suuremates tuumajaamade originaaluuringutes olid soliidtuumorite riskihinnangud valdavalt nullilähedased (SIR 0,99–1,04) ega erinenud statistiliselt oluliselt kaugemal elava elanikkonna näitajatest.
- Epidemioloogilised uuringud kinnitavad, et väikelapsed, eriti alla 5-aastased, on potentsiaalselt haavatavamad kiirgusega seotud vähiriski suhtes kui täiskasvanud. Kõige uuem (Mueller et al., 2015) süstemaatiline ülevaade, mis hõlmas mitut uuringut lastest, kes elasid kuni 25 km kaugusel tuumaelektrijaamadest, ei hinnanud laste leukeemia üldist riski oluliselt kõrgemaks (meta-hinnang 1,00, CI 0,95–1,05). Kuid alamanalüüs väikelastest (< 5 a) kuni 5 km kaugusel näitas olulist riskikasvu (RR $\sim 1,33$; CI 1,05–1,68). Teised haavatavad rühmad hõlmavad rasedaid naisi ja krooniliste haigustega vanemaealisi, kuid konkreetsete madalate kiirgustasemetega mõju nende rühmadele vajab täiendavat, metoodiliselt rangemat uurimist.
- Praegune süstemaatiline tõendusmaterjal ei kinnita seost tuumaelektrijaamade tavapärasest tööst tulenevate madalate kiirgusdooside ning sünnidefektide, geneetiliste muutuste või reproduktiivhäirete vahel. Enamik piirkondlikke uuringuid ei ole tuvastanud sünnidefektide esinemissageduse statistiliselt olulist suurenemist tuumaelektrijaamade läheduses elavate perede seas. Olemasoleva tõendusbaasi täiendamiseks on jätkuvalt vaja metoodiliselt rangemaid ja suurema statistilise võimsusega uuringuid.
- Teaduskirjanduse ja süstemaatiliste ülevaadete põhjal ei ole tuumaelektrijaamade tavapärase töö korral võimalik määratleda üht kindlat „ohutut kaugust“, millest alates terviseriske ei ole, kuna elanikkonna kiirgusdoosid jäävad üldjuhul ka jaama vahetus läheduses alla loodusliku taustkiirguse taseme. Tüüpiliselt ja ettevaatuspõhimõttest lähtudes käsitletakse 5–10 km raadiust kui vahetut lähipiirkonda, kus soovitatakse

rakendada regulaarset keskkonna- ja tervise-seiret. Epidemioloogilistes uuringutes on võimalikke (kuigi vastuolulisi) riskisignaale täheldatud kuni ligikaudu 20–30 km kaugusel, mistõttu võib seda vahemikku käsitleda laiendatud puhvertsoonina rahvatervise seire ja riskikommunikatsiooni seisukohalt. Üle 30 km kaugusel elavate elanike terviseriskid ei eristu süstemaatiliste ülevaadete põhjal üldrahvastiku tausttasemest.

- Vaja on rohkem pikaajalisi jälgimisuuringuid (prospektiivsed kohortuuringud), et tuvastada täpsemalt ekspositsiooni suurus (doos), ajaline kestus ja tervisemõjud.

Soovitused tuumajaama planeerimisel elanike tervisemõjudega arvestamiseks

Ioniseeriva kiirguse piirnormid elanikkonnale on rahvusvaheliselt kehtestatud väga konservatiivsetena. Rahvusvahelise Kiirguskaitse Komisjoni (ICRP) soovitude kohaselt ei tohiks elanikkonna aastane täiendav efektiivne kiirgusdoos ületada 1 mSv aastas, välja arvatud looduslik taustkiirgus ja meditsiiniline kiirgus (ICRP, 2007). Praktikas jäävad tuumajaamade tavapärased emissioonid üldjuhul oluliselt alla nimetatud piirnormi. Samas ei põhine elanikkonna tervisekaitse üksnes piirnormide järgimisel, vaid ka epidemioloogilisel teadmusel võimalike tervisemõjude kohta madalate kiirgusdooside juures.

Käesolevas analüüsis kasutatud süstemaatilised ülevaated rõhutavad samuti, et tõendusmaterjal on ebaühtlane ning madalate dooside mõjude hindamine elanikkonna tasandil on meetodiliselt keerukas, mistõttu ettevaatuspõhimõtte on põhjendatud (Lee et al., 2025; Mueller and Gilham, 2015).

Sellest tulenevalt soovitame tuumajaama asukoha valikul arvestada lisaks tehnilistele ja majanduslikele kriteeriumidele ka:

1. Elanikkonna ruumilise jaotusega ning haavatavate rühmade paiknemisega. Kuigi kehtivad kiirgusnormid võimaldavad elanike elamist suhteliselt väikesel raadiusel tuumajaamadest, viitavad epidemioloogilised andmed vajadusele ruumilises planeerimises vältida tuumajaamade ehitamist tihedalt asustatud alade, lasteasutuste ja koolide vahetusse lähedusse.

Erinevalt rangetest minimaalsetest kaugusnõuetest, mida ei saa teaduskirjanduse põhjal üheselt määratleda, toetab olemasolev teadus pigem paindlikku planeerimist, mis vähendab elanikkonna regulaarset madalatasemelist kiirgusekspositsiooni nii palju kui mõistlikult võimalik.

2. Rakendada pidevat kiirgusmonitooringut tuumajaama ümbruses, mis hõlmab õhu, vee ja mulla radioaktiivsuse regulaarset mõõtmist ning tulemuste avalikustamist. Paljud varasemad uuringud on kasutanud kaudset ekspositsioonihinnangut, mistõttu on reaalsel mõõtmispõhisel monitooringul keskne roll nii elanike usalduse kujundamisel kui ka terviseriskide hindamisel. Andmete avalikustamine aitab samuti vähendada põhjendamatu ärevust ja toetab teaduspõhist riskikommunikatsiooni.

3. Erilist tähelepanu tuleb pöörata lastele ja rasedatele, kuna mitmes uuringus on just laste puhul täheldatud suuremat tundlikkust ioniseeriva kiirguse võimalike bioloogiliste mõjude suhtes. Tuleks arvestada haavatavate rühmade täiendavat kaitset planeeringutes, näiteks elamualade ja haridusasutuste puhul vältida nende paiknemist aladel, mis jäävad tuumajaama tavapärase keskkonnamõju hindamise lähitsooni.

4. Avalik kommunikatsioon ja kogukondade kaasamine. Sarnaselt teiste keskkonnamõjudega näitavad uuringud, et elanike tajutud risk ja häiritus ei sõltu ainult objektiivsetest mõõtetulemustest, vaid ka informeeritusest, usaldusest institutsioonide vastu ning planeerimisprotsesside läbipaistvusest. Seetõttu on soovitatav kaasata kohalikke kogukondi varakult, selgitada regulaarsete emissioonide tegelikku ulatust ning eristada teaduspõhiseid hinnanguid väärinformatsioonist, mis võib mõjutada elanike heaolu ka siis, kui kõik normid on täidetud.

5. Soovitame rajada registripõhised uuringud ja tervisemonitooringu süsteemid tuumajaama mõjupiirkonnas, mis võimaldaksid jälgida elanikkonna tervisenäitajaid enne ja pärast jaama rajamist. Arvestades, et võimalikud mõjud on väikesed ja võivad avalduda alles aastate või aastakümnete jooksul, on selline lähenemine koosõlas rahvusvaheliste soovitustega ning võimaldab tulevikus paremini hinnata madalate kiirgusdooside tervisemõjusid Eesti kontekstis.

Kokkuvõttes näitavad olemasolevad teaduslikud ülevaated, et tuumajaamu on võimalik planeerida elanikkonna tervist kaitstes, kui lähtuda ettevaatuspõhimõttest, vähendada elanike regulaarset ekspositsiooni nii palju kui võimalik, rakendada põhjalikku monitooringut ja tagada läbipaistev ning kaasav planeerimisprotsess.

Samal ajal tuleb arvestada, et tuumaenergia kasutamine aitab vähendada fossiilkütustest tulenevat õhusaastet ja sellega seotud tervisekahjusid, mistõttu tuleb tervisemõjusid hinnata laiemas rahvatervise ja energiapoliitika kontekstis.

Kasutatud kirjandus

- Baker, P.J., Hoel, D.G., 2007. Meta-analysis of standardized incidence and mortality rates of childhood leukaemia in proximity to nuclear facilities: Original article. *Eur. J. Cancer Care (Engl)*. 16, 355–363. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2354.2007.00679.x>
- Bazyka, D.A., Prysazhnyuk, A.Y., Romanenko, A.Y., Fedorenko, Z.P., Gudzenko, N.A., Fuzik, M.M., Khukhrianska, O.M., Trotsyuk, N.K., Gulak, L.O., Goroch, Y.L., Sumkina, Y. V, 2012. CANCER INCIDENCE AND NUCLEAR FACILITIES IN UKRAINE: A COMMUNITY-BASED STUDY, *Experimental Oncology*.
- Bithell, J.F., Murphy, M.F.G., Stiller, C.A., Toumpakari, E., Vincent, T., Wakeford, R., 2013. Leukaemia in young children in the vicinity of British nuclear power plants: A case-control study. *Br. J. Cancer* 109, 2880–2885. <https://doi.org/10.1038/bjc.2013.560>
- Bollaerts, K., Simons, K., Van Bladel, L., De Smedt, T., Sonck, M., Fierens, S., Poffijn, A., Geraets, D., Gosselin, P., Van Oyen, H., Francart, J., Van Nieuwenhuysse, A., 2018. Childhood leukaemia near nuclear sites in Belgium, 2002-2008. *European Journal of Cancer Prevention* 27, 184–191. <https://doi.org/10.1097/CEJ.0000000000000272>
- Bridges, B.A., 2006. Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment (COMARE). Eleventh report, Distribution of childhood leukaemia and other childhood cancers in Great Britain 1969-1993. Produced by the Health Protection Agency for the Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment.
- Cao, Y., Lin, J., Zhai, K., Jiang, W., Zou, H., Ren, H., Wang, P., Gao, X., Zhang, M., Yu, S., Zhao, Y., Xuan, Z., Zhang, D., Liu, Y., Lou, X., 2022. Long-term investigation of environmental radioactivity levels and public health around the Qinshan Nuclear Power Plant, China. *Sci. Rep.* 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09091-2>
- Cottagiri, S.A., King, W., Rodriguez-Villamizar, L., Villeneuve, P.J., 2024. The risk of thyroid cancer in relation to residential proximity to nuclear power plants: a systematic review and meta-analysis. *Environ. Health*. <https://doi.org/10.1186/s12940-024-01143-6>
- Davies, B., Piel, F.B., Roca-Barceló, A., Freni Sterrantino, A., Daby, H.I., Blangiardo, M., Fecht, D., De Vocht, F., Elliott, P., Toledano, M.B., 2025. Childhood cancer incidence around nuclear installations in Great Britain, 1995-2016. *Int. J. Epidemiol.* 54. <https://doi.org/10.1093/ije/dyaf107>
- Degteva, M.O., Kozheurov, V.P., Tolstykh, E.I., 1998. RETROSPECTIVE DOSIMETRY RELATED TO CHRONIC ENVIRONMENTAL EXPOSURE, Radiation Protection Dosimetry. Nuclear Technology Publishing.
- Demoury, C., Faes, C., De Schutter, H., Carbonnelle, S., Roskamp, M., Francart, J., Van Damme, N., Van Bladel, L., Van Nieuwenhuysse, A., De Clercq, E.M., 2021. Childhood leukemia near nuclear sites in Belgium: An ecological study at small geographical level. *Cancer Epidemiol.* 72. <https://doi.org/10.1016/j.canep.2021.101910>
- Desbiolles, A., Roudier, C., Gorla, S., Stempfelet, M., Kairo, C., Quintin, C., Bidondo, M.L., Monnereau, A., Vacquier, B., 2018. Cancer incidence in adults living in the vicinity of

- nuclear power plants in France, based on data from the French Network of Cancer Registries. *Int. J. Cancer* 142, 899–909. <https://doi.org/10.1002/ijc.31116>
- Edwards, M.W., Schweitzer, R.D., Shakespeare-Finch, J., Byrne, A., Gordon-King, K., 2019. Living with nuclear energy: A systematic review of the psychological consequences of nuclear power. *Energy Res. Soc. Sci.* 47, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.08.016>
- Eesti Geoloogiakeskus, 2017. Eesti pinnase radooniriski ja looduskiirguse atlas The Atlas of Radon Risk and Natural Radiation in Estonian Soil.
- EU directive, 2013. Nõukogu direktiiv 2013/59/Euratom, 5. detsember 2013, millega kehtestatakse põhilised ohutusnormid kaitseks ioniseeriva kiirgusega kiiritamisest tulenevate ohtude eest.
- Frangione, B., Hinton, P., Villeneuve, P.J., 2023. Low-dose ionizing radiation and adverse birth outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Int. Arch. Occup. Environ. Health.* <https://doi.org/10.1007/s00420-022-01911-2>
- Fukasawa, M., Kawakami, N., Umeda, M., Akiyama, T., Horikoshi, N., Yasumura, S., Yabe, H., Suzuki, Y., Bromet, E.J., 2020. Longitudinal associations of radiation risk perceptions and mental health among non-evacuee residents of Fukushima prefecture seven years after the nuclear power plant disaster. *SSM Popul. Health* 10. <https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2019.100523>
- Garrity, C., Hamel, C., Trivella, M., Gartlehner, G., Nussbaumer-Streit, B., Devane, D., Kamel, C., Griebler, U., King, V.J., 2024. Updated recommendations for the Cochrane rapid review methods guidance for rapid reviews of effectiveness. *BMJ* 384. <https://doi.org/10.1136/BMJ-2023-076335>
- Gianicolo, E., Russo, A., Di Staso, R., Ronckers, C.M., Schmidtman, I., Wollschläger, D., Blettner, M., 2024. A municipality-specific analysis to investigate persistent increased incidence rates of childhood leukaemia near the nuclear power plant of Krümmel in Germany. *Eur. J. Epidemiol.* 39, 1373–1378. <https://doi.org/10.1007/s10654-024-01182-w>
- Gong, X., Benjamin Zhan, F., Lin, Y., 2017. Maternal residential proximity to nuclear facilities and low birth weight in offspring in Texas. *Radiat. Environ. Biophys.* 56, 111–120. <https://doi.org/10.1007/s00411-016-0673-2>
- Grosche, B., Kaatsch, P., Heinzow, B., Wichmann, H.E., 2017. The Krümmel (Germany) Childhood Leukaemia Cluster: A review and update. *Journal of Radiological Protection.* <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa8ce9>
- Ha, S., Hu, H., Roth, J., Kan, H., Xu, X., 2015. Associations between residential proximity to power plants and adverse birth outcomes. *Am. J. Epidemiol.* 182, 215–224. <https://doi.org/10.1093/aje/kwv042>
- IAEA, 2022. Nuclear Energy Series @ Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management.

- IARC, 2000. Ionizing radiation. Part 1, X- and gamma ([gamma])-radiation, and neutrons. IARC ; Distributed by IARC Press and the World Health Organization Distribution and Sales.
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
- Janiak, M.K., 2014. Epidemiological evidence of childhood leukaemia around nuclear power plants. Dose-Response. <https://doi.org/10.2203/dose-response.14-005>.Janiak
- Kaatsch, P., Spix, C., Schulze-Rath, R., Schmiedel, S., Blettner, M., 2008. Leukaemia in young children living in the vicinity of German nuclear power plants. *Int. J. Cancer* 122, 721–726. <https://doi.org/10.1002/ijc.23330>
- Kendall, G.M., Bithell, J.F., Bunch, K.J., Draper, G.J., Kroll, M.E., Murphy, M.F.G., Stiller, C.A., Vincent, T.J., 2018. Childhood cancer research in oxford III: The work of CCRG on ionising radiation. *Br. J. Cancer* 119, 771–778. <https://doi.org/10.1038/s41416-018-0182-y>
- Kiirgusseadus, 2016. <https://www.riigiteataja.ee/akt/110072020052?leiaKehtiv>
- Kim, J., Bang, Y., Lee, W.J., 2016. Living near nuclear power plants and thyroid cancer risk: A systematic review and meta-analysis. *Environ. Int.* 87, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.11.006>
- King, V.J., Stevens, A., Nussbaumer-Streit, B., Kamel, C., Garritty, C., 2022. Paper 2: Performing rapid reviews. *Syst. Rev.* 11. <https://doi.org/10.1186/S13643-022-02011-5>
- Kinlen, L., 2011. Childhood leukaemia, nuclear sites, and population mixing. *Br. J. Cancer.* <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6605982>
- Lee, G. Bin, Hwang, Y., Park, S., Cha, E.S., Lee, D., Kim, K., Park, S.K., Cho, M., Seo, S., 2025. Incidence of solid cancers among residents near nuclear facilities: a systematic review and meta-analysis. *BMC Public Health* 25. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22961-4>
- Levin, R.J., De Simone, N.F., Slotkin, J.F., Henson, B.L., 2013. Incidence of thyroid cancer surrounding three mile island nuclear facility: The 30-year follow-up. *Laryngoscope* 123, 2064–2071. <https://doi.org/10.1002/lary.23953>
- Lin, R.T., Boonhat, H., Lin, Y.Y., Klebe, S., Takahashi, K., 2024. Health Effects of Occupational and Environmental Exposures to Nuclear Power Plants: A Meta-Analysis and Meta-Regression. *Curr. Environ. Health Rep.* <https://doi.org/10.1007/s40572-024-00453-8>
- Mueller, W., Gilham, C., 2015. Childhood leukemia and proximity to nuclear power plants: A systematic review and meta-analysis. *J. Cancer Policy.* <https://doi.org/10.1016/j.jcpo.2015.10.003>
- Murcia, G.M.D., Ferrer, S.F., Sorinas, J., Ferrandez, J.M., Fernandez, E., 2017. Application of electroencephalographic techniques to the study of visual impact of renewable energies. *J. Environ. Manage.* 200, 484–489. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.05.096>

- NRC, 2012. Analysis of cancer risks in populations near nuclear facilities : phase 1. National Academies Press.
- NRC, 2006. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation : BEIR VII, Phase 2. National Academies Press.
- OECD, 2021. Nuclear Energy in the Circular Carbon Economy (CCE). A Report to the G20.
- Ren, H., Yu, S., Wang, Z., Zheng, T., Zou, H., Lou, X., Wang, P., Zhou, L., Zhang, D., Zhang, M., Guo, J., Lai, Z., Zhao, Y., Xuan, Z., Cao, Y., 2023. Assessment of radiation exposure and public health before and after the operation of Sanmen nuclear power plant. *Front. Public Health*.
- Sermage-Faure, C., Laurier, D., Goujon-Bellec, S., Chartier, M., Guyot-Goubin, A., Rudant, J., Hémon, D., Clavel, J., 2012. Childhood leukemia around French nuclear power plants - The Geocap study, 2002-2007. *Int. J. Cancer* 131. <https://doi.org/10.1002/ijc.27425>
- Shigemura, J., Terayama, T., Kurosawa, M., Kobayashi, Y., Toda, H., Nagamine, M., Yoshino, A., 2021. Mental health consequences for survivors of the 2011 Fukushima nuclear disaster: A systematic review. Part 1: Psychological consequences. *CNS Spectr.* 26, 14–29. <https://doi.org/10.1017/S1092852920000164>
- Spix, C., Schmiedel, S., Kaatsch, P., Schulze-Rath, R., Blettner, M., 2008. Case-control study on childhood cancer in the vicinity of nuclear power plants in Germany 1980-2003. *Eur. J. Cancer* 44, 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2007.10.024>
- Tang, F.R., Loganovsky, K., 2018. Low dose or low dose rate ionizing radiation-induced health effect in the human. *J. Environ. Radioact.* <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.05.018>
- Tanisho, Y., Shigemura, J., Kubota, K., Tanigawa, T., Bromet, E.J., Takahashi, S., Matsuoka, Y., Nishi, D., Nagamine, M., Harada, N., Tanichi, M., Takahashi, Y., Shimizu, K., Nomura, S., Yoshino, A., 2016. The longitudinal mental health impact of Fukushima nuclear disaster exposures and public criticism among power plant workers: The Fukushima NEWS Project study. *Psychol. Med.* 46, 3117–3125. <https://doi.org/10.1017/S003329171600194X>
- UNSCEAR, 2024. Volume I Report to the General Assembly. Scientific Annex A: Second primary cancer after radiotherapy.
- UNSCEAR, 2017. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Annex A. Principles and criteria for ensuring the quality of the committee’s reviews of epidemiological studies of radiation exposure.
- Venables, D., Pidgeon, N.F., Parkhill, K.A., Henwood, K.L., Simmons, P., 2012. Living with nuclear power: Sense of place, proximity, and risk perceptions in local host communities. *J. Environ. Psychol.* 32, 371–383. <https://doi.org/10.1016/J.JENVP.2012.06.003>
- Virtanen, S., V.V.-P., T.J., T.M., T.T., M.A., 2024. STUK-B 318 / JUNE 2024 Monitoring of radioactivity in the environment of Finnish nuclear power plants.
- World Nuclear Association, 2025. Reactor Database [WWW Document].

Wu, W. Te, Pan, C.Y., Chang, S.L., Chen, Y.H., Tung, C.J., Lin, P., 2023. Study Protocol for Radiation Exposure and Cancer Risk Assessment: The Taiwan Nuclear Power Plants and Epidemiology Cohort Study (TNPECS). *J. Epidemiol.* 33, 52–61.
<https://doi.org/10.2188/jea.JE20210020>

Lisa 1. Kasutatud otsingutermid ja otsingustrateegia

Otsingustrateegia andmebaasis PubMed

((((nuclear power plant[Title/Abstract] OR nuclear power plants[Title/Abstract] OR "Nuclear Power Plants"[Mesh] OR nuclear facilities[Title/Abstract] OR nuclear energy[Title/Abstract] OR nuclear sites[Title/Abstract] OR nuclear power[Title/Abstract] OR atomic energy[Title/Abstract] OR nuclear reactor[Title/Abstract] OR "Nuclear Reactors"[Mesh]) AND (environmental exposure[Title/Abstract] OR "Environmental Exposure"[Mesh] OR vicinity[Title/Abstract] OR "living near"[Title/Abstract] OR neighborhood[Title/Abstract] OR distance[Title/Abstract] OR living[Title/Abstract] OR residing[Title/Abstract] OR residential[Title/Abstract] OR surrounding[Title/Abstract])) NOT (accident[Title/Abstract] OR disaster[Title/Abstract] OR Fukushima[Title/Abstract] OR Chernobyl[Title/Abstract])) AND ("2015/01/01"[Date - Publication] : "2025/09/12"[Date - Publication]))

Lisa 2. Tulemuste tabelid

Tabel 1. Süsteemaatilised ülevaated tuumajaamade tervisemõjudest (2015–2025)

Allikas	Ekspositsioon /kaugus tuumajaamast	Tervisetulem	Uuringu-rahvastik	Uuringukavandid	Uuringute ilmumisaeg	Kaasatud uuringute arv	Uuringute kvaliteedi hindamine	Uuringutulemused
Lee et al. 2025	25 km vs kaugemal (<5 km; 5–10 km; ≥10 km)	Soliidtuumorid (kõik vähid v.a hematoloogilised kasvaja-d kasvajad) Haigestumus	Täiskasvanud	Kohortuuringud; ökoloogilised uuringud	1960–2023	13	Enamik uuringuid hinnati keskmise kvaliteediga ; ekspositsioon määratletud kaudselt (kaugus); heterogeensus kõrge	Täiskasvanute soliidtuumorite esinemissagedus ei olnud statistiliselt oluliselt suurenenud tuumajaamade läheduses elavatel elanikel
Lin et al. 2024	<30 km vs kaugemal (<5 km kuni ≥30 km)	Kõik haigused Haigestumus ja suremus	Kogu rahvastik	Kohortuuringud; juht-kontrolluuringud; ökoloogilised uuringud	Enne 10.08.2023	34	Uuringute kvaliteet madal kuni keskmine ; segavate faktorite kontroll varieeruv, kõrge heterogeensus	Leiti riski suurenemine tuumajaama lähedal elamise (<30 km) ja üldise vähiriski, kilpnäärme ja leukeemia vahel
Mueller et al. 2015	25 km vs kaugemal (<5 km; 5–10 km)	Laste leukeemia Haigestumus	Lapsed 0–15 a	Juht-kontrolluuringud; kohortuuringud; ökoloogilised uuringud	1992–2013	14	Keskmise kvaliteediga uuringud; peamiseks piiranguks väike juhtumite arv ja heterogeensus	Leiti statistiliselt oluline leukeemiariski suurenemine lastel, kes elasid väga lähedal (<5 km) tuumajaamadele
Kim et al. 2016	20 km vs kaugemal (<5 km; 5–10 km)	Kilpnäärmevähk Haigestumus ja suremus	Täiskasvanud	Ökoloogilised; kohortuuringud;	1993–2015	13	Uuringute kvaliteet hea kuni keskmine ; võimalik skriiningu- ja avastamisnihe	Kilpnäärmevähi risk oli statistiliselt oluliselt suurem <20 km tuumajaamade läheduses elavatel inimestel
Cottagiri et al. 2024	≤35; ≤25; ≤5 km vs kaugemal	Kilpnäärmevähk haigestumus	Täiskasvanud	Ökoloogilised, kohortuuringud; sünnikohort	1983–2023	11	Madal kuni keskmine kvaliteet ; selektsiooni- ja detektsioonibias võimalik	Leiti mõõdukas, statistiliselt mitte-oluline seos tuumajaamade läheduses elamise ja kilpnäärmevähi riski vahel
Frangione et al. 2022	0-50 km vs kaugemal	Ebasoodsad sünnitulemid (madal sünnikaal, enneaegne sünd)	Rasedad / vastsündinud	Juht-kontroll; Prospektiivne kohort	1990-1921	17 (2)	Uuringute kvaliteet keskmine ;	Ei leitud statistiliselt olulist seost tuumajaamade läheduses elamise ja sünnitulemuste vahel

Tabel 2. Muud analüüsi kaasatud uuringud tuumajaamade tervisemõjudest (2010–2025)

Allikas	Ekspositsioon (kaugus tuumajaamast)	Tervisetulem	Uuringurahvastik	Uuringukavand	Uuringu kvaliteet	Uuringutulemused
Davies et al., 2025	Elamine tuumajaama lähedal; kauguskategooriad ≤25 km vs kaugemal	Laste vähid (leukeemia, LNHL, soliidtuumorid, KNS kasvajad)	Lapsed <15 a Suurbritannia	Registripõhine	Hea (pikk ajaperiood, suur juhtude arv)	Ei leitud statistilist olulist seost tuumajaama läheduses elamisega
Gianicolo et al., 2024	Elamine tuumajaama lähedal; kauguskategooriad 50 km (<5 km, 5–10 km, >10 km)	Laste leukeemia	Lapsed <15 a Saksamaa, Krümmeli TEJ	Registripõhine	Keskmine (piiratud segajate kontroll, ökoloogiline)	Ei leitud statistilist olulist seost tuumajaama läheduses elamisega
Wu et al., 2023.	Erinevad kaugus-vööndid; keskkonna ja doosi-modelleerimine)	Erinevad vähivormid	Elanikkond, eri vanuse-rühmad, Taiwan	Kohortuuringu TNPECS protokoll (planeeritav pikaajaline kohort)	Protokoll; kvaliteedihinnangut ei esitata (eeldefineeritud meetoodika)	Tulemusi veel ei esitata; eesmärk on pikaajaline vähiriski hindamine
Kheifets et al., 2017.	Keskkonnakiirgus (gamma, radoon); kaudne seos tuumajaamadega	Laste leukeemia	Lapsed Euroopa, Jaapan	Võrdlev ülevaade	Kvaliteet varieeruv; heterogeensus kõrge	Gamma-kiirguse ja laste leukeemia seosed nõrgad ja ebaühtlased
Grosche et al., 2017.	Elamine Krümmeli tuumajaama läheduses	Laste leukeemia	Lapsed Saksamaa	Juhtumite klastrianalüüs	Kvaliteet varieeruv; metodoloogilised piirangud	Klastri olemasolu kinnitatud, kuid kiirgusdoosid liiga madalad põhjusliku seose toetamiseks
Cao et al., 2022.	Elamine tuumajaama lähedal	Üldine rahvatervis, vähk (kaudselt)	Kohalik elanikkond Hiina, Qinshani TEJ	Registripõhine uuring + keskkonnaseire	Piiratud	Kiirgusfoon jäi loodusliku tausta piiresse; tervisemõjusid ei tuvastatud
Ha et al., 2017*	Elamine elektrijaamade (sh tuumajaamad) läheduses; mitmed kaugusvööndid vs 20 km	Ebasoodsad sünditulemused (madal sünnikaal, enneaegsus jm)	Rasedad ja vastsündinud Florida, USA	Rahvastikupõhine kohortuuring	Mõõdukas	Tuumajaamade puhul ei leitud järjepidevat statistiliselt olulist seost ebasoodsate sünditulemitiga
Gong et al., 2017*.	Elamine tuumarajatiste läheduses; kauguskategooriad <5 km, 5–10 km, >10 km vs 50 km	Madal sünnikaal	Rasedad ja vastsündinud Texas, USA	Juht-kontrolluuring	Mõõdukas (administratiivandmed, piiratud segajate kontroll)	Ei leitud seost elukoha läheduse ja madala sünnikaalu vahel; põhjuslikkus ebaselge

*sisalduvad Frangione et al., 2022 süstemaatilises ülevaates

Lisa 3. Analüüsi kaasatud süstemaatiliste ülevaadete (6) andmetabelid

Tabel 3. Lee et al. (2025) süstemaatilisse ülevaatesse kaasatud uuringud. Soliidtuumorid

Author (year)	Country	Study design	Study period	Facility	Regions, distances	Reference	Index	Outcome	Age	Sex	Case	Estimates (95% CI)	Confounding factors
Prindull et al. (1993) [20]	Germany	Ecological	1980–1988	NPP (Wurgassen)	< 25 km	West German pediatric incidence rates	SIR	CNS tumor	0–14	total	14	1.70 (0.90–2.80)	Age
Sharp et al. (1999) [21]	Scotland	Ecological	1975–1994	Seven nuclear facilities	< 25 km	Scottish national incidence rates	SIR	CNS tumor	0–14	total	202	1.06 (0.92–1.21)	Age, sex, deprivation, urban–rural status
Zadnik et al. (2008) [22]	Slovenia	Ecological	1984–2003	NPP and waste repository	Spodnje-posavska, regions hosting facilities	Slovenian national incidence rates	SIR	Breast cancer	all	women	NA	0.98 (0.90–1.07)	Age, sex, region
								Thyroid cancer		women	NA	0.94 (0.67–1.28)	
Boice, Jr. et al. (2009) [23]	US	Ecological	1984–2004	Two former nuclear processor	Apollo and Parks, regions hosting facilities	Pennsylvanian incidence rates	SIR	Breast cancer	all	women	361	0.96 (0.86–1.06)	Age, sex, race
								Brain and nervous system	all	total	21	0.64 (0.40–0.99)	
								Trachea, bronchus, lung, pleura	all	total	382	1.00 (0.90–1.10)	
								Bladder tumor	all	total	155	1.17 (0.99–1.37)	
								Thyroid cancer	all	total	15	0.53 (0.30–0.87)	
F. Ma et al. (2011) [24]	US	Ecological	1986–2005	Seven NPPs	≤ 32 km	Illinois state incidence rates	SIR	CNS and miscellaneous intracranial and intraspinal neoplasm	0–14	total	536	1.12 (0.97–1.29)	Age, sex, race
Bazyka et al. (2012) [25]	Ukraine	Ecological	2003–2008	Nuclear processor, radioactive waste storage	Regions hosting facilities	Ukrainian national incidence rates	SIR	Breast cancer	all	total	1,000	1.14 (1.07–1.21)	Age, sex
								Trachea, bronchus, lung	all	total	1,141	1.23 (1.16–1.30)	
								Thyroid cancer	all	total	156	1.06 (0.90–1.23)	

Author (year)	Country	Study design	Study period	Facility	Regions, distances	Reference	Index	Outcome	Age	Sex	Case	Estimates (95% CI)	Confounding factors
Chen et al. (2013) [26]	Canada	Ecological	1992–2007	Nuclear processing facilities	Port Hope, regions hosting facilities	Ontario incidence rates	SIR	Breast cancer	all	women	165	0.95 (0.81–1.11)	Age, sex, and socio-economic status using various reference populations
								Brain tumor	all	total	18	0.92 (0.55–1.46)	
								Lung, bronchus	all	total	230	1.26 (1.10–1.43)	
								Bladder tumor	all	total	48	1.04 (0.77–1.38)	
								Thyroid cancer	all	women	11	0.55 (0.27–0.98)	
Lane et al. (2013) [27]	Canada	Ecological	1990–2008	Three NPPs (Pickering, Bruce, Darlington)	< 25 km	Ontario incidence rates	SIR	Breast cancer	all	women	16,067	0.98 (0.96–0.99)	Age, sex
								Brain and NS tumor	all	total	2,286	0.94 (0.90–0.98)	
								Lung, bronchus	all	total	16,067	0.89 (0.88–0.91)	
								Bladder tumor	all	total	4,106	0.95 (0.92–0.98)	
								Thyroid cancer	all	total	4,591	1.34 (1.30–1.38)	
Salerno et al. (2016) [28]	Italy	Ecological	2002–2010	Two former nuclear facilities (NPP and radioactive waste disposal)	Regions hosting facilities	Turin city incidence rates	SIR	Breast cancer	all	women	182	1.03 (0.88–1.17)	Age, sex
								Lung	all	total	137	0.90 (0.75–1.06)	
								Bladder tumor	all	total	110	0.91 (0.75–1.10)	
								Thyroid cancer	all	total	20	1.36 (0.83–2.10)	
Desbiolles et al. (2018) [29]	France	Ecological	1995–2011	Seven NPPs and two nuclear facilities (La-Hague)	< 20 km	France metro-politan incidence rates	IRR	Breast cancer	+ 15	women	4,103	0.99 (0.95–1.03)	Regional tobacco and alcohol consumption, deprivation, urbanization, pesticides, and other environmental factors
								Brain and CNS tumor	+ 15	total	435	1.06 (0.96–1.16)	
								Bladder tumor	+ 15	total	979	1.10 (1.03–1.17)	
								Thyroid cancer	+ 15	total	671	0.92 (0.85–0.99)	

Author (year)	Country	Study design	Study period	Facility	Regions, distances	Reference	Index	Outcome	Age	Sex	Case	Estimates (95% CI)	Confounding factors
Bunch et al. (2014) [30]	UK	Retrospective birth cohort	1971–2006	Nuclear fuel reprocessing (Sellafield)	Copeland and Allerdale, regions hosting facilities	England national incidence rates	SIR	Breast cancer	all	total	389	0.93 (0.84–1.03)	Age, sex
								Brain and CNS tumor	all	total	122	0.86 (0.71–1.02)	
								Lung, trachea, and lower respiratory tract tumors	all	total	76	1.02 (0.80–1.28)	
								Thyroid cancer	all	total	30	0.85 (0.58–1.22)	
Levin et al. (2013) [31]	US	Retrospective cohort	1990–2009	NPP (TMI)	Dauphin, York, Lancaster, regions expected to be exposed to iodine	Pennsylvanian incidence rates	SIR	Thyroid cancer	all	total	2,652	1.12 (1.08–1.17)	Age, year of diagnosis, county
Demoury et al. (2017) [32]	Belgium	Ecological	2000–2014	Two NPPs and two nuclear sites	< 20 km	Flemish, Wallon incidence rates	IRR	Thyroid cancer	all	total	1,761	0.91 (0.87–0.95)	Age, sex, year, region

SIR age-standardized incidence ratio, *IRR* incidence rate ratio

Tabel 4. Lin et al. (2024) süstemaatilisse ülevaatesse kaasatud uuringud. Kõik vähid

Table S3. The summary of findings of evidence using GRADE of all-cancer among residents living within 30 km of nuclear power plants.

Number of studies	Study design	Certainty assessment					Other considerations	Number of patients		Effect	Certainty
		Risk of bias	Inconsistency	Indirectness	Imprecision	Residents near nuclear power plants		Reference population	Relative risk (RR) (95% CI)		
14	observational studies	serious	very serious	not serious	not serious	Publication bias: strongly suspected Dose response gradient: no	167,030	208,892	RR: 1.05 (1.00–1.09)	⊕○○○ Very low	

GRADE, Grading of Recommendations Assessment, Development, and Evaluation; CI, confidence interval

Tabel 5. Mueller et al. (2015) süstemaatilise ülevaatesse kaasatud uuringud. Laste leukeemia

A. Mueller et al. analüüsi kaasatud **juht-kontrolluuringute** iseloomustus

Characteristics of the eligible case-control studies.

Author	Setting & # of facilities	Study period	Age group	Exposed group	Reference group	Leukemia type	Total # of cases	OR (95% CI)
Heinävaara, 2010 [30]	Finland—2 NPPs	1977–2004	<15 years	5–10 km	>30 km	All leukemia	1	0.71 (0.05–10.25)
Sermage-Faure, 2012 [20]	France—19 NPPs	2002–2007	<5 years	<5 km	>20 km	Acute Leukemia	6	1.60 (0.66–3.87)
			<15 years	<5 km			14	1.90 (1.05–3.45)
			<15 years	<15 km			58	1.03 (0.79–1.35)
Kaatsch, 2008 [6]	Germany—16 NPPs	1980–2003	<5 years	<5 km	>5 km	All leukemia	37	2.19 (1.51–3.18)
				<10 km	>10 km		95	1.33 (1.06–1.67)
Bithell, 2013 [7]	UK—13 NPPs	1962–2007	<5 years	<5 km	>25 km	All leukemia and NHL	10	0.72 (0.32–1.61)
				<10 km			56	1.02 (0.70–1.48)
				<25 km			445	1.06 (0.92–1.22)

B. Mueller et al. analüüsi kaasatud ökoloogiliste ja kohorturingute iseloomustus

Characteristics of the eligible ecological/cohort studies.

Author	Setting & # of facilities	Study period	Age group	Exposed group	Reference group	Leukemia type	Total # of cases	SIR (95% CI)
Lane, 2013 [37]	Canada—3 NPPs	1990–2008	<5 years	<25 km	Ontario incidence rates	All leukemia and NHL	165	0.88 (0.76–1.03)
Bithell, 1994 [41]	England and Wales—8 NPPs	1966–1987	<15 years <15 years	<25 km	UK National Registry of Childhood Cancers	All leukemia and NHL	393 480	1.01 (0.91–1.12) 0.98 (0.89–1.07)
Heinävaara, 2010 [30]	8 NPPs + 1 reprocessor Finland—3 NPPs	1980–2000	<15 years	5–15 km	Finnish national rates	All leukemia	504 16	0.99 (0.91–1.08) 1.01 (0.60–1.70)
Sermage-Faure, 2012 [19]	France—19 NPPs	1990–2007 for cohort.	<5 years	<5 km	French National Registry of Childhood Hematopoietic Malignancies	Acute Leukemia	14	1.37 (0.81–2.32)
Guizard, 2001 [42]	France—La Hague (nuclear reprocessor)	1978–1998	<15 years	<15 km	French national rates	Acute Leukemia only for <5 years, all leukemia for <15 years.	131	0.98 (0.78–1.23)
				<5 km			24	1.14 (0.73–1.78)
				<15 km			272	1.05 (0.90–1.22)
				<10 km			4	2.07 (0.71–6.04)
Kaatsch, 2008 [5]	Germany—16 NPPs	1980–2003	<5 years	<20 km	German national incidence rates	All leukemia	12	0.85 (0.51–1.41)
				<5 km			34	1.41 (0.99–2.00)
Michaelis, 1992 [45]	Germany—18 NPPs + 2 research reactors	<5 years	<5 years	<10 km	German national incidence rates	Acute leukemia	95	1.09 (0.89–1.33)
				<5 km			19	3.01 (1.25–10.31)
				<15 km			152	1.28(0.99–1.69)
Black, 1994 [31]	Scotland—1 nuclear reprocessor	1968–1991	<15 years	<5 km	Scottish national rates	All leukemia and NHL	30	1.44 (0.81–2.79)
				<15 km			274	1.06 (0.88–1.28)
				<12.5 km			6	3.29 (1.41–7.67)
Sharp, 1996 [43]	Scotland—3 NPPs, 1 nuclear reprocessor	1968–1993	<15 years	Enumeration districts with population centroid	Scottish national rates	All leukemia and NHL	75	0.96 (0.76–1.21)
Spycher, 2011 [20]	Switzerland—4 NPPs	1985–2009	<5 years	<25 km	All cases >15 km	All leukemia	8	1.20 ^a (0.60–2.41)
			<16 years	<5 km			51	0.92 ^a (0.69–1.23)
COMARE, 2011 [18]	UK—13 NPPs	1969–2004	<5 years	<15 km	UK national average	All leukemia and NHL	12	1.05 ^a (0.59–1.86)
				<15 km			84	0.89 ^a (0.71–1.11)
				<5 km			20	1.22 (0.77–1.94)
Ma, 2011 [44]	US (Illinois)—7 NPPs	1986–2005	<15 years	<10 km	Illinois state rates	All leukemia	61	0.86 (0.32–2.34)
				<25 km			430	0.93 (0.84–1.03)
				<10 miles (~16 km)			71	1.08 (0.86–1.36)

Tabel 6. Kim et al. (2021) süstemaatilise ülevaatesse kaasatud uuringud. Kilpnäärmevähk

The main characteristics of 13 studies included in the meta-analysis of thyroid cancer risk and living near nuclear power plants.

Author (year)	Country	Study design	Study year	Reference population	Region	Exposure definition	Number of nuclear sites	Number of cases	Gender	End point	OR (95% CI)
Ahn et al. (2012)	Korea	Cohort (prospective)	1992–2010	5–30 km More than 30 km	Kori Wolsung Youngkwang Uljin	<5 km	4	44	Female	HR	1.90 (1.13–3.21)
Bazyka et al. (2012)	Ukraine	Ecologic	2003–2008	Ukrainian	Pivdennoukrainsk Energodar Netishyn	Living near	3	49	Total	SIR	1.23 (0.89–1.58)
Boice et al. (2006)	USA	Ecologic	1950–2000	Kittitas Chelan Douglas Skagit Whatcom	Benton Adams Franklin Walla Walla	Living near	1	18 15 33	Female Male Total	SMR SMR SMR	0.71 (0.41–1.21) 1.09 (0.58–2.04) 0.84 (0.56–1.26)
Boice et al. (2009)	USA	Ecologic	1990–2004 1996–2004	Clarion Clearfield Somerset Beaver Washington Erie	Armstrong Westmoreland	32 km	2	331 102 433 15 9 24	Female Male Total Female Male Total	SIR SIR SIR SMR SMR SMR	0.88 (0.77–1.01) 0.86 (0.68–1.09) 0.88 (0.78–0.99) 1.23 (0.63–2.40) 0.76 (0.35–1.66) 0.99 (0.60–1.64)
Bollaerts et al. (2014)	Belgium	Ecologic	2000–2008 2004–2008	Flemish Walloon Brussels-Capital	Doel Tihange	20 km	1 1	207 119	Total Total	SIR SIR	0.74 (0.64–0.84) 0.86 (0.70–1.01)
Bunch et al. (2014)	UK	Cohort (retrospective)	1950–2006	England Wales Scotland	Seascale ward Allerdale Copeland Remainder of Cumbria	Living near	2	0 30 59	Total SIR SIR	SIR SIR SIR	0.00 (0.00–6.88) 0.86 (0.58–1.23) 1.04 (0.79–1.34)
Gulis and Fitz (1998)	Slovakia	Ecologic	1986–1995	European Union	Trnava	<5 km 5–10 km 10–15 km 15–20 km	1	1 1 16 4	Female SIR SIR SIR	SIR SIR SIR SIR	1.51 (0.00–3.03) 0.37 (0.00–0.74) 1.01 (0.75–1.28) 1.34 (0.66–2.02)

The main characteristics of 13 studies included in the meta-analysis of thyroid cancer risk and living near nuclear power plants.

Author (year)	Country	Study design	Study year	Reference population	Region	Exposure definition	Number of nuclear sites	Number of cases	Gender	End point	OR (95% CI)
Hattchouel et al. (1996)	France	Cohort (retrospective)	1968–1989	France	France	16 km	13	9	Female	SMR	0.66 (0.30–1.26)
Levin et al. (2013)	USA	Retrospective cross-sectional	1990–2009	Perry Adams Cumberland Lebanon Schuykill Berks Chester	Dauphin	Living near	1	8	Female	SMR	0.68 (0.29–1.34)
					York			264	Total	SIR	0.90 (0.78–1.04)
					Lancaster			237		SIR	1.23 (1.09–1.39)
Lopez-Abente et al. (2001)	Spain	Cohort (retrospective)	1975–1993	50–100 km	Zorita	30 km	4	2	Total	SMR	0.46 (0.09–2.51)
					Garona			2		SMR	0.29 (0.06–1.50)
					Vandellos			4		SMR	1.25 (0.23–6.84)
Rekacewicz et al. (1993)	France	Ecologic	1979–1991	>40 km	Chooz	0–9 km 10–19 km	1	9	Total	SIR	1.12 (0.58–1.96) ^a
								8			SIR
Wanigaratne et al. (2013)	Canada	Cohort (retrospective)	1986–2005	North Oshawa	Pickering	Living near	1	37	Female	SIR	0.69 (0.50–0.95)
Zadnik et al. (2008)	Slovenia	Ecologic	1984–2003	Slovenia Eastern-Slovenian	Spodnje-posavska	Living near	1	14	Male	SIR	0.92 (0.52–1.50)
					Brezice			NA	Female	SIR	0.94 (0.67–1.28)
										SIR	0.85 (0.46–1.43)

^a 90% confidence interval.

Tabel 7. Cottagiri et al. (2024) süstemaatiliselt ülevaatesse kaasatud uuringud. Kilpnäärmevähk

Table 1 Characteristics of included studies in the meta-analysis for thyroid cancer incidence risk among populations residing in proximity to nuclear power plants

Lead author (year)	Study design	Country/region	Number of facilities	Study period	Exposed population	Unexposed (reference) population	Age group	Sample size (cases)	Effect measure	Exposure measurement	Male/Female	Relative Risk and 95% CI	
Bazyka (2012) [26]	Ecological	Ukraine	3 NPPs	2003—2008	Observed Communities near NPPs Piv-dennoukrainsk, Energodar, Netishyn	Ukraine	n.s	129,845 (49)	SIR	Area (community) comparison	Total	1.23 (0.89—1.58)	
Boice (2009) [44]	Ecological	USA	1 NPP	1990—2004	Two counties Armstrong and Westmoreland in Western Pennsylvania	Six comparison counties (Clarion, Clearfield, Somerset, Beaver, Washington, Erie)	n.s	(433)	RR	Area (county) comparison	Total	0.88 (0.78—0.99)	
								(102)			Male	0.86 (0.68—1.09)	
								(331)			Female	0.88 (0.77—1.01)	
Bunch (2014) [65]	Birth cohort	United Kingdom	1 NPPs	1950 and 2006; 1963—2006	Cumbrian births between 1950 and 2006	National incidence for 1971—2006 using person-years analysis	0—57	338,119 (89)	SIR	Seascale ward as at 1981 + Allerdale and Copeland county districts excluding Seascale + Remainder of Cumbria	Total*	0.82 (0.45—1.50)	
Demoury (2020) [54]	Ecological	Belgium	2 NPPs (Doel and Tihage)	2000—2014	Observed around buffer	Walloon Region for Tihage and Flemish population for Doel	All ages	n.s (33)	RR	0—5 km*	Total	0.81 (0.69—0.95)	
								n.s (68)			0—20 km*	0.82 (0.78—0.86)	
Desbiolles (2017) [33]	Ecological	France	7 NPPs	1995—2011	Exposed to 1 NPP site	Municipalities with no NPP or other nuclear installations within 20 km of their town hall	> 15	445,935 (671)	RR	0—20 km	Total*	0.97 (0.75—1.26)	
								(186)			Male	1.12 (0.95—1.32)	
								(485)			Female	0.86 (0.77—0.96)	
Gulis (1998) [64]	Ecological	Slovakia (Trnava)	1 NPP	1986—1995	District of Trnava	European population	n.s	3456 (1)	SIR	≤ 5 km	Female	1.51 (0.00—3.03)	
								112,092 (22)				0—20 km*	1.05 (0.83—1.34)
								75,618 (5)				10—15 km	1.64 (0.89—2.39)

Table 1 (continued)

Lead author (year)	Study design	Country/region	Number of facilities	Study period	Exposed population	Unexposed (reference) population	Age group	Sample size (cases)	Effect measure	Exposure measurement	Male/Female	Relative Risk and 95% CI
Kim (2018) [47]	Cohort	South Korea	4 NPPs	1992—2006	Residing within 5 km and 0–30 km of an NPPs	Residing > 30 km of an NPP	> 20	36,176 (54)	HR	≤ 5 km	Total	3.20 (1.73—5.93)
								n.s (166)		0—30 km ^a		2.91 (1.86–4.53)
								(10)		≤ 5 km	Male	3.38 (0.92—12.39)
								(35)		0—30 km ^a		3.73 (1.49 – 9.28)
								(44)		≤ 5 km	Female	3.15 (1.56—6.34)
(131)	0—30 km ^a		2.69 (1.62 – 4.47)									
Lane (2013) [39]	Ecological	Canada	3 NPPs	1990—2008	Those who lived within 25 km of 3 NPPs in Ontario	Ontario general population	All ages	1,984,500 (4591)	SIR	0–25 km	Total ^a	1.11 (0.87 – 1.43)
											Male ^a	1.41 (1.32—1.51)
											Female ^a	1.06 (0.79—1.42)
Salerno (2016) [63]	Ecological	Italy	1 NPP	2002—2010	Observed in Trino municipality where former NPP was located	Turin City	All ages	ns	SIR	Area (community) comparison	Female	1.86 (1.06—2.66)
Wang (2016) [66]	Ecological	Taiwan	3 NPPs	1979—2003	Plant-vicinity (<=14.2)	Non-plant-vicinity (> 22.8)	n.s	ns	RR	≤ 14.2 km	Total	0.79 (0.12–5.28)
Zadnik (2008) [46]	Ecological	Slovenia	1 NPP and 1 nuclear waste repository site	1984—2003 (Krško NPP started operations in 1984)	Spodnje-posavska statistical region	Slovenia	n.s	ns	SIR	Area (region) comparison	Female	0.94 (0.67 – 1.28)

^aCombined weighted summary estimate
n.s not specified

Tabel 8. Frangione et al. (2022) süstemaatilisse ülevaatesse kaasatud uuringud. Ebasoodsad sünditulemid

Authors	Year	Location	Study design	Sample size	Ages	Outcome	Radiation exposure	Timing of exposure	Measure of association	Study quality assessment*
Andreassi et al	2020	Italy	Case-control	357	37.2 ± 5.2	LBW Miscarriage Stillbirth	Medical occupation	Paternal only exposure	Odds ratios	Moderate
Chen et al	2018	China	Retrospective cohort	192,492	25.1 ± 3.9	LBW	Medical diagnostic	Paternal only exposure	Odds ratio	Good
Chiarelli et al	2000	Canada	Cohort	668	> 18	LBW Miscarriage	Medical therapeutic	Prior to pregnancy	Odds ratios	Good
Choi et al	2013	South Korea	Age-matched cohort study	642	31.7 ± 3.8	Birth weight Gestational age	Medical diagnostic	During pregnancy	Odds ratio (excluded from meta-analysis)	Moderate
Doyle et al	2000	England	Retrospective cohort	27,261	39.8 ± 4.1	Miscarriage Stillbirth	Nuclear occupation	Prior to pregnancy	Odds ratio	Moderate
Fucic et al	2008	Croatia	Case-control cohort	462	12-51	Miscarriage	Medical occupation	Prior to pregnancy	Odds ratio	Good
Goldberg et al	1997	Canada	Retrospective cohort	2426	> 15	LBW Miscarriage Stillbirth	Medical diagnostic	Prior to pregnancy	Odds ratio	Good
Gong et al	2017	Texas, USA	Case-control	3,481,077	> 11	LBW	Residential proximity	Prior to and during pregnancy	Odds ratio (excluded from meta-analysis)	Good
Grajewski et al	2015	USA	Case-control	844	26-49	Miscarriage	Flight occupation	During pregnancy	Odds ratio	Good
Green et al	2002	Canada USA	Retrospective cohort	4029	> 15	LBW Miscarriage Stillbirth	Medical therapeutic	Prior to pregnancy	Relative Risk	Good
Green et al	2010	Canada	Case-control	1856	> 15	LBW	Medical therapeutic	Prior to pregnancy	Odds ratios derived from frequencies	Good
Guilbaud et al	2019	France	Prospective cohort	638	30.4 ± 0.7	Miscarriage Gestational age	Medical diagnostic	During pregnancy	Odds ratio	Good
Ha et al	2015	Florida, USA	Prospective cohort	423,719	26.7 ± 7.1	LBW	Residential proximity	During pregnancy	Odds ratio (excluded from meta-analysis)	Good
Hatch et al	2017	Chernobyl	Retrospective cohort	2582		Birth weight Gestational age	Nuclear disaster	During pregnancy	Parameter estimate (excluded from meta-analysis)	Good
Hujoel et al	2004	USA	Case-control	5585	12-45	LBW	Medical diagnostic	During pregnancy	Odds ratio	Good
Igumov & Drozdovitch	2000	Chernobyl	Case-control	500		Birth weight	Nuclear disaster	During pregnancy	Slope (excluded from meta-analysis)	Moderate

Lisa 4. Tuumajaamadega seotud psühholoogilised ja psühhosotsiaalsed mõjud - lisamaterjal

Tabel 9. Edwards et al. (2019) süstemaatilise ülevaate andmetabel

Allikas	Edwards, K. L., Smith, J., & Davies, M. (2019). <i>Living with nuclear energy: A systematic review of the psychological consequences of nuclear power. Energy Research & Social Science</i> , 55
Ekspositsioon	Elamine tuumajaama või muu tuumainfrastruktuuri (nt jäätmekäitlus, tuumaenergiaga seotud rajatised) läheduses; mõnel juhul ka kaudne kokkupuude tuumatehnoloogiaga (nt riskikommunikatsioon, planeerimisprotsessid)
Tervisetulemid	Psühholoogilised ja psühhosotsiaalsed tulemid: ärevus, mure, stress, hirm, riskitaju, usaldus või usaldamatus institutsioonide vastu, heaolu ja elukvaliteedi subjektiivne hinnang
Uuringurahvastik	Täiskasvanud elanikud, kes elavad tuumajaamade või muude tuumaseadmete läheduses; mõnes uuringus ka kogukonnaliidrid või kohaliku tasandi sidusrühmad
Uuringukavandid	Peamiselt kvalitatiivsed uuringud (intervjuud, fookusgrupid, etnograafilised lähenemised); lisaks mõned segameetodiga (mixed-methods) uuringud
Uuringute ilmumisaeg	Uuringud pärinevad peamiselt 1980.–2010. aastatest (metoodikas ei täpsustata algus- ega lõppaastat)
Kaasatud uuringute arv	26 uuringut
Uuringute kvaliteedi hindamine	Autorid hindasid uuringute metodoloogilist kvaliteeti kvalitatiivsete uuringute hindamise raamistikest lähtudes; kvaliteet varieerus ning mitmes uuringus toodi esile piiranguid (nt väikesed valimid, kontekstispetsiifilisus)
Uuringutulemused	Tuumajaamade lähedal elamine on sageli seotud kõrgendatud mure ja ärevusega, eriti seoses tajutud terviseriskide ja ebakindlusega; keskne roll on riskitajul, usaldusel institutsioonide vastu ja kohaliku konteksti tähendusel; mõju ei ole universaalselt negatiivne – mõnes kogukonnas esines ka neutraalseid või pragmaatilisi hoiakuid

Tabel 10. Kokkuvõte Edwards et al. (2019) süstemaatilise ülevaate tulemustest

Mõjuallikas	Ekspositsioon	Mõjutatud elanikkond	Tervise- ja heaolumõjud	Mõju iseloom ja suund	Tõendus	Mõju olulisus	Ebakindlus ja piirangud
Tuumajaama või tuumainfrastruktuuri paiknemine elukeskkonnas	Pikaajaline elamine tuumajaama või muu tuumarajatise läheduses	Kohalikud elanikud; mõnes uuringus kogukonna esindajad	Ärevus, mure, stress, hirm terviseriskide ees; subjektiivne heaolu	Enamasti negatiivne, kuid mitte universaalne	kvalitatiivsed ja segameetodid; korduvad teemad erinevates riikides	Potentsiaalselt oluline kohalikul tasandil	Uuringud kontekstispetsiifilised; tulemusi ei saa otseselt üldistada
Tajutud kiirgusrisk ja ebakindlus	Riskitaju, teadmatus pikaajalistest tervisemõjudest	Tuumajaama lähedal elavad inimesed	Psühholoogiline distress, püsiv mure tuleviku pärast	Negatiivne	Riskitaju oli keskne teema enamikus kaasatud uuringutes	Mõõdukas kuni oluline	Tegemist subjektiivse tajuga; objektiivne risk ei pruugi vastata tajule
Riskikommunikatsioon ja institutsionaalne usaldus	Kokkupuude ametliku info, planeerimis- ja otsustusprotsessidega	Kohalikud kogukonnad	Usaldamatus, kontrollituse tunne, ärevus	Negatiivne, kuid muudetav	Paljud uuringud rõhutasid usalduse rolli psühholoogilistes mõjudes	Oluline mõjutegur	Kommunikatsioonipraktikad varieeruvad riigiti
Sotsiaalne ja kohalik kontekst	Majanduslik kasu, töökohtade olemasolu, kogukonna identiteet	Kohalikud elanikud	Mõnel juhul turvatunne, normaliseerumine, pragmaatiline suhtumine	Neutraalne või positiivne	Mitmes uuringus kirjeldati ambivalentseid või positiivseid hoiakuid	Väike kuni mõõdukas	Vähem käsitletud kui negatiivsed mõjud
Elukoha ja identiteedi seotus	„Sense of place“, kodukoha tähendus	Pikaajalised elanikud	Mõju heaolule sõltub isiklikest väärtustest ja kogemustest	Muutuv	Kvalitatiivsed kirjeldused intervjuudes	Mõõdukas	Raske kvantifitseerida