



TARTU ÜLIKOOL

ÜLEVAATEUURINGU II ETAPI ARUANNE

SALVESTUSTEHNOLOOGIATE TÖÖGA SEOTUD VÕIMALIKUD

TERVISERISKID

ÜLEVAATEUURING

Uuringu pealkiri:

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



Rahastanud Euroopa Liit
NextGenerationEU



Eesti
tuleviku heaks

Tartu 2026

Uuringurühma koosseis:

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

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

Töö tellija: Kliimaministeerium

Sisukord

Sisukord.....	3
Sissejuhatus ja uuringu teaduslik taust.....	4
Uuringu eesmärk	6
Meetodid.....	7
Tulemused ja arutelu	8
Pumphüdrosalvestus (PHS) ehk vesisalvesti.....	8
Akud	11
Liitium-ioonakude kasutamisega seotud terviseriskid.....	11
Kasutatud akudega seotud terviseriskid.....	15
Kokkuvõte ja soovitused	19
Kasutatud kirjandus.....	20

Sissejuhatus ja uuringu teaduslik taust

Elektri salvestuse all mõeldakse tehnoloogiat, mis on ühendatud elektrivõrguga ning mis võimaldab ühel ajahetkel elektrit salvestada ning teisel ajal seda salvestatud energiat kasutusele võtta, näiteks öösel, kui päikeseenergiat ei ole (ENMAK 2035, n.d.; IEA, 2026). Üha kõikumavamad elektrihinnad ja Balti riikide desünkroniseerimine Venemaa elektrisüsteemist loob vajaduse kasutada rohkem salvestustehnoloogiaid (Rohetiigri Energia Teekaart, 2025). Salvestamine avaldab elektriturule kahepoolset mõju – ühel ajaperioodil suurendab tarbimist ja teisel ajaperioodil suurendab tootmist. Salvestus võimaldab suurendada elektrisüsteemi paindlikkust ja seeläbi vähendab vajadust juhitavate võimsuste järele (ENMAK 2035, n.d.). Elektrit on võimalik salvestada kasutades pumphüdroalvestust (PHS) ehk vesisalvestust või akuparke (Rohetiigri Energia Teekaart, 2025). Salvestuse turg on käivitunud ning esimesed akupargid Eestisse rajatud ning salvestuse maht järgnevatel aastatel kasvab. 2024. aastal oli liitumisprotsessis akusid kokku 734 MW ulatuses. Sellele lisaks on arendamisel Paldiski vesisalvesti (500 MW) (ENMAK 2035, n.d.).

Pumphüdroalvestus (PHS) on maailmas kõige laialdasemalt kasutatav energiasalvestustehnoloogia, see moodustab 90% kogu salvestusest ja on kõige laialdasemalt kasutuses USAs. Enamik tänapäeval töötavatest pumphüdrojaamadest kasutatakse igapäevase elektritarbimise tasakaalustamiseks (IEA, 2026). Pumphüdrojaamade tööpõhimõte on lihtne, vesi pumbatakse üles reservuaari odava elektri ja taastuvelektri ületootmise ajal ning lastakse hiljem alla elektri tootmiseks, kui hind on kõrgem (IEA, 2026). PHS tehnoloogiat on maailmas kasutatud alates 1890. aastatest ning enamasti pumbatakse vesi merest üles mägedesse (Karambelkar et al., 2025). PHS on ka endiselt soodsaim lahendus energia salvestamiseks kui selleks on olemas looduslikud tingimused (nt mägede vahel), kuid akutehnoloogia on järjest odavnemas ning akude maht maailmas kasvab kiiremini kui PHS oma (Karambelkar et al., 2025). PHS võib olla avatud või suletud süsteem. Avatud tüüpi PHS on pidevas ühenduses loodusliku veekoguga, sest üks reservuaar asub looduslikus veekogus. Suletud süsteem koosneb kahest inimese poolt rajatud reservuaarist (Karambelkar et al., 2025). PHS aitab kasutusele võtta rohkem taastuvenergiat ja sellega vähendada kliimamuutuste ja fossiilkütustest tuleneva õhusaastuse negatiivset mõju tervisele. Lisaks positiivsetele mõjudele võib PHS rajamisega kaasneda aga ka negatiivseid mõjusid keskkonnale ja tervisele.

Akude kasutamine elektri salvestamiseks kasvab maailmas kiiresti. Võrreldes 2021. aastaga kasvas paigaldusmaht 2022. aastal üle 75% (IEA, 2026). Kõige levinumad on liitium-ioonakud

(IEA, 2026). Liitium-ioonakusid kasutatakse väga laialdaselt, lisaks võrgupõhisele elektrisalvestusele ka tarbe-elektronikas, sülearvutites, mobiiltelefonides, droonides, e-sigarettides, elektritööriistades, elektriautodes jne (Park et al., 2018). Viimase kümnendi jooksul on liitium-ioonakude hinnad märkimisväärselt langenud, hoolimata nendeks kasutatavate metallide hinna tõusust (BNEF, 2025; IEA, 2026). Liitium-ioonakude alla kuuluvad liitium-raudfosfaatakud (*lithium iron phosphate batteries*) on enamlevinud elektri salvestamiseks. Koduses energiasalvestuses on kasutusel ka nikkel-koobalt-alumiinium ja nikkel-mangaan-koobalt akud (IEA, 2026). Liitiumioonakud sisaldavad tavaliselt grafiit-anoodi, liitium-metalloksiidist (metalliks Co ja/või Ni) katoodi ning Li^+ ioone juhtivat elektrolüüti, mis koosneb orgaanilisest lahustist, tavaliselt etüleenkarbonaadist, dimetüülkarbonaadist või nende segust, milles on lahustatud mõni liitiumisool, näiteks liitiumheksafluorofosfaat (LiPF_6) (Gür, 2018). $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$ on kõige populaarsem katoodimaterjal ning grafiit on kõige laialdasemalt kasutatav anoodimaterjal (Arteaga et al., 2017). Liitium-ioonakud sisaldavad potentsiaalselt toksilisi ühendeid nagu nikkel, vask, koobalt (Zeng et al., 2015). Liitium-ioonakud võivad olla plahvatusohtlikud. Selle tõttu on akusid ka turult tagasi kutsutud (Park et al., 2018). Liitium-ioonakudega seotud õnnetusi esineb nende transpordi, ladustamise ja ümbertöötlemise ajal kui neid on valesti ladustatud või pakendatud, nt on tekkinud mehaaniline vigastus või kokkupuude veega (Lisbona & Snee, 2011). Kuna Eestis on salvestustehnoloogiate kasutamine kasvavas trendis, on oluline täpselt teada sellega seotud terviseriske.

Uuringu eesmärk

Käesoleva töö eesmärk anda ülevaade potentsiaalsetest terviseriskidest, mis võivad elanikkonnal tekkida salvestustehnoloogiate kasutamise tõttu Eestis.

Uuringu küsimused:

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

Meetodid

Käesolev töö on narratiivne ülevaateuuring. Kasutades PECO (*population, exposure, comparison, outcome*) raamistikku küsimuste määratlemiseks kaasasime uuringusse artiklid, mis käsitlesid:

- Rahvastik (ingl *population*): üldrahvastik, kõik elanikud kogu maailmas
- Kokkupuude (ingl *exposure*): salvestustehnoloogiate läheduses elamine, salvestustehnoloogiate kasutamine
- Võrdlusrühm (ingl *comparison*): isikud, kes puutuvad salvestustehnoloogiatega kokku vähem või ei puutu üldse kokku
- Tervisetulem (ingl *outcome*): kõik võimalikud tervisega seotud tulemid, sealhulgas häiritus, unehäired, tervisesümptomid (subjektiivselt või objektiivselt mõõdetud, mõõdetud füsioloogilised parameetrid), tervisega seotud elukvaliteet, psühholoogilised näitajad.

Kaasasime kõik uuringutüübid, mis ei ole kirjad, kommentaarid, juhtkirjad, konverentsi kokkuvõtted. Kaasasime näiteks süstemaatilised ülevaated, meta-analüüsid, narratiivsed ülevaated, tervisemõjude hindamised, kohortuuringud, juht-kontrolluuringud, ristlabilõikelised uuringud, katsed ja keskkonnamõjude või tervisemõjude hindamised.

Välistasime teabeallikad, mis:

- Ei käsitle inimeste tervisemõjusid. Teabeallikad, mis käsitlevad ainult tehnilisi aspekte või on tehtud loomade, eluslooduse või katseloomade kohta
- Käsitlevad salvestustehnoloogiatega kokkupuudet töökeskkonnas, mitte elukeskkonnas
- On avaldatud enne 2015. aastat

Otsing viidi läbi *Scopus* andmebaasis. Kasutati järgmisi märksõnu ja nende kombinatsioone: *energy storage; grid-scale storage; pumped-storage hydropower; pumped-hydro; batteries; lithium-ion batteries; lithium-ion battery technologies, health effects.*

Leitud artiklite pealkirjade ja kokkuvõtetete põhjal hinnati esmast allikate sobivust uuringusse. Potentsiaalselt asjakohased artiklid loeti täistekstina. Artiklite kaasamisel arvestati nende sobivust teha järeldusi salvestustehnoloogiate tervisemõjude kohta Eesti tingimustes. Andmete süntees viidi läbi temaatilise analüüsi põhimõttel. Uuringud rühmitati vastavalt käsitletud teemadele.

Tulemused ja arutelu

Pumphüdrosalvestus (PHS) ehk vesisalvesti

PHS võtab tavaliselt enda alla suure maa-ala ning selle ehitus on pikk ja keeruline. Avatud süsteemide puhul võib veevahetus loodusliku veekoguga oluliselt mõjutada veekogu ökoloogilist keskkonda. PHS võib vähendada põhjavee varu, samuti võib olla mõjutatud joogivee kvaliteet. PHS süsteemid on kõik väga erinevad ja nende mõju keskkonnale ja tervisele sõltub konkreetsest rajatisest (Karambelkar et al., 2025). Seetõttu ei ole mõtet käsitleda PHSide mõju üldiselt, vaid konkreetse Eestisse rajatava PHS põhjal.

Eestis on plaanis rajada Paldiski linna vesisalvesti, mis koosneb maa-alusest reservuaarist, seda maapinnaga ja mereveehaardega ühendavatest šahtist ning maismaal paiknevatest muudest objektidest (juhtimiskeskus, alajaam jms). Ülemiseks veereservuaariks on Läänemeri. Tööpõhimõte seisneb selles, et Läänemere vesi voolab ilma pumpamiseta maa-alustesse veereservuaaridesse, odava elektri ajal aga pumbatakse vett reservuaaridest merre tagasi. Jaama koguvõimsuseks on kavandatud ligikaudu 500 MW ja salvestusmaht ühes 12-tunnises tsüklis on 6000 MWh. Rajatakse 10 veereservuaari, mis asuvad 590,5 kuni 643,6 m sügavusel maa all Paldiski linnas. Projekt näeb ette ulatuslikud kaevetööd reservuaaride ning allmaajuurdepäasu-, hooldus- ja ventilatsioonišahtide rajamiseks, milles kasutatakse ka lõhkamist ja puurimist. Merre rajatakse kuus veehaardetorni, mis võimaldavad võtta salvesti tööks vajalikku vett 10 kuni 15 m allpool veepiiri. Merre rajatakse veel tehissaar ja väikesadam. Projekti arendaja on Energiasalv Pakri OÜ (Skepast&Puhkim OÜ, 2019).

Paldiski vesisalvestiga kaasnevaid võimalikke tervise ja keskkonnamõjusid on hinnatud keskkonnamõtjude strateegilises hindamises „Paldiski pump-hüdroakumulatsioonijaama detailplaneeringu keskkonnamõtju strateegiline hindamine (KSH). Aruanne“ (Skepast&Puhkim OÜ, 2019) ja ehitusprojekti keskkonnamõtjude hindamises „Paldiski pump-hüdroakumulatsioonijaama keskkonnamõtju hindamine ehitusprojekti koostamise käigus. Aruanne“ (Skepast & Puhkim OÜ, 2022). Siinkohal anname ülevaate keskkonnamõtjude hindamiste käigus välja tulnud terviseriskidest põhinedes nendel kahel allikal.

Paldiski PHS rajamiseks tehakse mahukaid kaevetööd. Kristalse aluspõhja kivimi väljakaeve maht on 4 750 000 kuupmeetrit. Välja kaevatud materjale kasutatakse nii PHS rajamisel kui ka turustatakse. Maa-aluste rajatiste rajamine toimub lõhkamise teel, mis tekitab maavõnkeid ja vibratsiooni ehituse ajal. Kriitilised objektid on Alexela terminali seadmed, muinsuskaitse all

olev Paldiski kindlus ja Paldiski endine tuumaobjekt, mis paikneb PHS põhikompleksist umbes 2 km kaugusel. Paldiski endise tuumaobjekti radioaktiivsed jäätmel on kaitstud metallkestade ja raudbetoonkastidega. Ohtude vältimiseks teostatakse PHS rajamise käigus lõhkamisi piiratud laengutega ning rakendatakse pidevat seismilist seiret. Vibratsiooni tekitavad ka ehitusel töötavad suured masinad. Vältitakse vibratsiooni tekitatavate tööde teostamist öhtusel ja öisel ajal ning nädalavahetustel, et vähendada vibratsioonist tulenevat häiringut piirkonna elanikele.

Kaevetööd võib mõju avaldada põhjaveele, sest ehitamise käigus tuleb šahtidesse tungiv vesi välja pumbata. Ehitustegevuse ajal on Paldiski linna joogiveevaru ohus. Et ohtu leevendada seiratakse põhjavee seisust ja piiratakse vajadusel väljapumpamist. Väljapumbatavat vett taaskasutatakse tehnoloogilistes protsessides, näiteks tolmutõrjes ja haljastuses. Šahtidesse vee sissevoolu vähendamiseks ja põhjaveekihtide isoleerimiseks kasutatavad meetmed on šahti külgekivimite külmutamine või injekteerimine, mille käigus pumbatakse kivimisse veevoolu takistavat tsementeerivat ainet.

Jaamas kasutatakse suures koguses õli, peamiselt trafodes, laagrites ja reguleerimissüsteemides, mis võib samuti sattuda vette. Elektri jaama paigaldatakse spetsiaalne õlipuhasti. Projektis nähakse ette õli korduvkasutust puhastussüsteemide kaudu, on läbi mõeldud jäätmekäitlus ja reostustõrje võimalike avariide korral.

Kaevetöödel kujutab riski ka asjaolu, et tuleb läbistada maapõues asuv ca 5–5,5 meetri paksune graptoliitargilliidi kiht. Graptoliitargilliit on põlevkiviliik, milles orgaaniline aine on segunenud savikivimiga. Kui hapnik pääseb graptoliitargilliidi kihti, siis see võib ise süttida ning sealt võib eralduda palju väevliühendeid, mis võivad hapestada vett ja leostada mullast raskmetalle (*Graptoliitargilliit – Eesti Maavarad*, n.d.). Sõltuvalt ainete sisaldustest võib graptoliitargilliit olla ka kiirgusohtlik. Kahju vältimiseks tuleb avatud graptoliit-argilliit võimalikult kiiresti uuesti isoleerida. Graptoliitargilliidi käitlemiseks on koostatud eriprojekt, et vältida isesüttimist ja hapestumist.

Ehituse ajal (kuni 8 aastat) on tegemist tugeva müra reostusega, sest toimuvad lõhkamistöed, puurimistöed ja müra teevad ka transpordivahendid ja muud ehitusseadmed (nt buldoosid, laadurid). Ehitustööd kestavad 21 h päevas ning killustiku laadimine 4,5 h päevas. Elamualade ja Kaitseväge kasarmute kaitseks rajatakse ehitusala ümber 5 m kõrgune muldvall, mille peal on 4,5 m kõrgune müratõke. Koos müratõkkega levib lähimate müratundlike kinnistuteni päevasel ajal müratase $L_d \leq 40$ dB ning öisel ajal $L_n \leq 35$ dB. Tehakse ka müraseiret. Müratõke jääb paika ka pärast valmimist jaama käitamise ajaks, kuigi siis ei teki enam suurt mürareostust.

Elektrijaama käitamise ajal tekitavad müra peamiselt 330 kW alajaam ja ventilatsioonišahtid. Maa-aluste pumpade ja turbiinide müra maapinnale ei levi.

Ehitusperioodil on probleemiks ka õhusaaste. Ehitustegevuse käigus on peamisteks tolmuallikateks purustus- ja sorteerimissõlmed, pinnasetööd ning materjali ladustamise ja transpordiga seotud tegevused, mis tekitavad õhusaaste osakesi PM₁₀ ja PM_{2,5}. Ehitusel kasutatavad sisepõlemismootoritega masinad paiskavad õhku kütuse põlemisjääke, nagu süsinikoksiid, lämmastikoksiidid ja lenduvad orgaanilised ühendid. Tolmu tekkimise vältimiseks kasutatakse ehitusmaterjalide ja ladustamisalade pidevat niisutamist veega, mis on eriti oluline sademeteta perioodidel. Suurema liiklusega väljaveoteed viiakse tolmuvaba katte alla või töödeldakse neid tolmu levikut takistavate kemikaalidega (nt kloriididega). Ehitustööde ajaks paigaldatakse piirkonda seirejaamad PM₁₀ ja PM_{2,5} jälgimiseks. PHS käitamisperioodil märkimisväärseid välisõhu saastajaid ei ole. Ehituse ajal viiakse läbi ka radooni mõõtmised, sest kaevandatavalt alalt võib eralduda radooni. Selleks, et karbid ja muud veeloomad ei ummistaks meres asuvaid vee sissevoolu torusid, kasutatakse nende eemaldamiseks kloori sisaldavaid aineid, seetõttu satub osa kloori ja teisi ühendeid ka merevette. Kokkuvõttes on PHS rajamine tehniliselt keerukas projekt, millega on seotud mitmed riskid ja olulised mõjud tervisele, kuid neid on võimalik leevendusmeetmetega ohjata (Skepast & Puhkim OÜ, 2022; Skepast&Puhkim OÜ, 2019).

Olulisemad terviseriskid kohalikule elanikkonnale on seotud PHS ehitusega. Lõhkamistest, kaevetöödest ja ehitusel kasutatavatest masinatest tekib müra, tolmu ja vibratsioon ning oht veevaru vähenemiseks Paldiski linnas. Mürasaastega kõige sagedamini seostatud terviseprobleemide hulka kuuluvad häiritus ja unehäired ning kõrge risk südame-veresoonkonnahaigusteks ning ainevahetushäireteks, nagu II tüüpi diabeet ja rasvumine (Fu et al., 2023; WHO, 2019; Wu et al., 2023). Samas on nendes uuringutes näidatud terviseriskide suurenemist alates müratasemest 45 dB, kuid kui antud projektis rakendatakse tõhusalt leevendumeetmeid (müratõke), peaks müratase elamute lähedal jääma alla 40 dB. Õhusaastuse ja tolmu osakesed (PM_{2,5}, PM₁₀) ning lenduvad orgaanilised ühendid on seotud krooniliste hingamisteede haigustega, nagu astma, krooniline obstruktiivne kopsuhaigus ja kopsuvähk. Samuti soodustab see südame-veresoonkonnahaiguste teket, sealhulgas südame isheemiatõbe ja insulti. Pikaajaline kokkupuude on seotud ka imikute sünnikaalu vähenemise ja enneaegse sünnituse riski suurenemisega (WHO, n.d.). Vibratsioon võib põhjustada elanikes häiringut ja vähendada üldist rahulolulust. On näidatud, et pidev korduv kokkupuude vibratsiooniga suurtest transpordivahenditest, näiteks veokitest võib põhjustada elamute konstruktsioonides

kahjustusi, näiteks pragude teket seintes ja lagedes ning vundamendi kahjustumist. Sellised mõjud võivad suurendada elanike psühholoogilist ebakindlust ja stressi. Vibratsiooniga võib kaasenda ka müra, näiteks akende kolisemine (Khan & Burdzik, 2025).

Akud

Liitium-ioonakude kasutamisega seotud terviseriskid

Liitium-ioonakud on praegu kõige levinum tehnoloogia, mida kasutatakse igapäevaselt kaasaskantavates elektroonikaseadmetes, elektrisõidukites, lennunduses, sõjaväes ja suuremahulistes energiasalvestuse lahendustes (akupargid). Liitiumioonakude kasutamine suureneb maailmas kiiresti seoses elektrisõidukite ja akuparkide nõudluse kasvu tõttu. 2019. aastal müüdi 2,1 miljonit elektriautot ning eeldatakse, et see arv kasvab 2040. aastaks kümnekordseks (Łukasz et al., 2023).

Liitium-ioonaku koosneb kolmest põhiosast: katoodist (positiivse laenguga), anoodist (negatiivse laenguga) ja separaatorist, mis kõik paiknevad vedelas elektrolüüdis. Elektrolüüdis lahustunud liitiumisoolad on peamine positiivsete liitiumioonide (Li^+) allikas. Nende liikumine anoodi ja katoodi vahel (läbi elektrolüüdi ja separaatori) võimaldab elektronide liikumist ning seeläbi aku laadimist ja tühjenemist. Liitiumisoolad moodustavad kuni 2% aku massist (Łukasz et al., 2023). Liitiumioonakude elektrolüüdid on orgaanilised lahustid, mis on väga lenduvad ja olemuselt äärmiselt tuleohtlikud (Liu et al., 2018). Elektrolüüdis on mitmeid lisaaineid, nt leegiaeglustajaid ja ülelaadimiskaitset pakkuvad aineid (Łukasz et al., 2023). Lisaained on sageli ärisaladus, mistõttu nende toksilisus ja põlemisomadused on suuresti teadmata (Mrozik et al., 2021). Anoodina on kasutusel kõige sagedamini grafiit ja see moodustab kuni 30% aku massist. Katoodina on kasutusel enamasti nikkel-mangaan-koobalt ($\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$) ja katood moodustab kuni 14% aku massist (Łukasz et al., 2023). Zhang et al (2026) tuvastasid hiljuti, et metallisegu (Ni, Co, Mn ja Li) on toksilisem, kui need metallid eraldi võetuna ning see võib akude tootmises kujutada töötajatele suuremat ohtu kui seni arvati (Zhang et al., 2026).

Liitium-ioonakud on tavakasutuse korral enamasti ohutud. Peamine akude tavakasutusega seotud risk on akude kontrollimatu kuumenemine (ingl *thermal runaway*). See on kiire soojenemise protsess, mida käivitavad akus toimuvad eksotermilised sisereaktsioonid. Aku sees tekivad keemilised reaktsioonid, mis tekitavad soojust, see omakorda viib reaktsioonideni, mis tekitavad veelgi rohkem soojust ja see protsess võib viia tulekahju või plahvatuseni. Põlengule

eelneb tihti elektrolüüdi leke akust (Łukasz et al., 2023; Park et al., 2018; Wang et al., 2025). Kontrollimatu soojenemine võib tekkida igas olukorras - aku kasutamisel või mittekasutamisel (nt kodus hoiustamisel), samuti transpordi käigus, tootmisprotsessis või juba ladustatuna prügilasse. Igapäevaelus on liitiumakudest tingitud õnnetuste oht sageli siiski märksa väiksem kui kaubandus- ja tööstuskeskkonnas (Wang et al., 2025)

Kontrollimatu kuumenemine (ingl *thermal runaway*) võib tekkida mehhaanilisel vigastamisel, siis, kui akut laetakse üle kavandatud pingele (ülelaadimine), see puutub kokku liiga kõrge välistemperatuuriga, tekib väline lühis vigase juhtmestiku tõttu või sisemine lühis elemendi defektide tõttu (Liu et al., 2018; Łukasz et al., 2023). Peamine kontrollimatu kuumenemise põhjus on sisemine lühis ning seda on suhteliselt keeruline ennetada. Sisemine lühis võib tekkida näiteks elemendi muljumisel sõiduki kokkupõrke korral, ülelaadimistingimustes või ka madalatel temperatuuridel. Näiteks kui autoõnnetuses metallese tungib akusse ühendades otseselt katoodi ja anoodi, tekib lühis ja aku süttib (Liu et al., 2018). Üllatuslikult näitab aga Hiinas tehtud statistika, et ligi 87,65% elektriautode akude süttimistest tekib tavakasutuses laadimise, parkimise või sõitmise ajal, mitte kokkupõrgetes. Põlengud võivad olla seotud aku vananemise või liitiumi sadestumisega (Lai et al., 2022). Kuna elektrisõidukeid tuleb pidevalt juurde, on suurenemas ka nende akude süttimiste arv. Kõige rohkem esineb elektrisõidukite akude põlenguid Hiinas kuumade ilmade ajal (Lai et al., 2022).

Kontrollimatu kuumenemise käigus eralduvad akust toksilised, söövitavad ja kergesti süttivad ained. Nende hulgas on kümneid toksilisi ühendeid (nt CO, PF₅, POF₃), millest kõige ohtlikum on vesinikfluoriidhape (HF) (Łukasz et al., 2023; Park et al., 2018; Zhou et al., 2023). HF jõuab organismi sissehingamise teel või naha kaudu ning põhjustab ränka keemilist söövitust ja süsteemset mürgistust, mis võib olla eluohtlik (Mrozik et al., 2021). HF põhjustab südame rütmihäireid, vererõhu tõusu, muutusi kuseteedes, ägedat neerupuudulikkust ning ägedat koronaarnefroosi (Park et al., 2018). Kuna HF on hügrokoopne (vett imav), levib see õnnetuspaigal sageli valge aurupilve koostises, muutes selle eriti ohtlikuks esmareageerijatele ja läheduses viibijatele (Mrozik et al., 2021)

Mehhaanilise kahjustuse käigus võib aku hakata lekkima. Lekkimise käigus eraldub mürgiste ja kergesti süttivate gaaside segu (CO, H₂, HF). Uuring toob näite, et vaid kolme aku purunemine suletud ruumis võib tekitada eluohtliku vesinikfluoriidi (HF) kontsentratsiooni (Łukasz et al., 2023). Isegi vaid 250 ml enamiku tavapäraselt kasutatavate elektrolüütide eraldumine suletud ruumis võib olla inimesele kahjulik. See kogus võib põhjustada pikaajalisi tervisemõjusid või mõjutada inimese võimet ruumist põgeneda. Kõrge lenduvusega

elektrolüütide, nt dietüülkarbonaadi, 1,2-dimetooksüetaani, 1,3-dioksolaani või 2-metüül-tetrahydrofuraani puhul võivad sellised toksilised mõjud tekkida isegi alla 15 ml koguse puhul, mis aurustub 63 m³ suuruses ruumis. Elektriauto aku korpuse kahjustus suletud ruumis (laoruum, garaaž) võib seega kergesti tekitada eluohtlikke olukordi. Lisaks on nende lenduvate orgaaniliste ühendite aurustumine temperatuuri tõustes peamine riskitegur aku korpuse lõhkemiseks (Łukasz et al., 2023).

Liitiumioonakudega seotud tulekahju- ja plahvatusõnnetusi esineb maailmas sageli. Mõned neist on kujutanud tõsist ohtu inimeste elule ja tervisele ning viinud ka tootjate poolt arvukate toodete tagasikutsumisteni. Need juhtumid tuletavad meelde, et ohutus on akude puhul esmatähtis ning enne suure energiatihedusega akusüsteemide laialdasemat kasutuselevõttu tuleb lahendada tõsised ohutuse probleemid (Liu et al., 2018).

Viimastel aastatel on ka suurtes energia salvestusjaamades (akuparkides) sagenenud tulekahjuõnnetused. Viimase kümnendi jooksul on teatatud enam kui 60 suurest salvestusjaama põlengust maailmas. Need on oluliselt ohtlikumad kui elektrisõidukite põlengud, kuna akude hulk on suurem. Akupargi kustutamiseks võib kuluda päevi ning tuhandeid tonne vett. Põlengu tekitatud kahjud ulatuvad miljonitesse dollaritesse. Hoonesiseste süsteemide puhul on suurim oht mürgiste, tule- ja plahvatusohtlike gaaside kogunemine suletud ruumi, mis võib viia ränkade plahvatusteni (Lai et al., 2022).

Enamasti paiknevad akupargid vabas õhus. USAs Aizonas 40 MWh mahutavusega jaamas algas aprillis 2022 põleng ühe aku kontrollimatust kuumenemisest. Jaam põles viis päeva, eraldades pidevalt suitsu, mis mõjutas tõsiselt ümbritsevat keskkonda (Liu et al., 2018). Ka aastal 2019 toimus Arizonas liitium-ioonakudega energiasalvestussüsteemi plahvatus, kus sai vigastada ka 4 tuletõrjujat. Salvestussüsteem oli võimsusega 2,16 MWh ja kasutas nikkel-mangaan-koobalt akusid. Automaatne kontrollsüsteem tuvastas suitsu ja käivitas automaatse kustutussüsteemi. Umbes tunni pärast saabusid tuletõrjujad, kes tuvastasid valge mürgise aurupilve konteineri kohal. Pärast seda, kui auru eraldumine näis peatuvat, otsustasid tuletõrjujad konteineri ukse avada, et olukorda hinnata. Ukse avamine lisas konteinerisse hapnikku, mis segunes kergesti süttivate gaasidega ja toimus plahvatus, mis paiskas päästjad eemale. Tuletõrjujad said ajukahjustuse, selgroovigastusi, roiete ja jäsemete murde ning termilisi ja keemilisi põletusi (McKinnon et al., 2020). Selle õnnetuse raportis toodi välja järgmised meetmed, et tulevikus selliseid õnnetusi ära hoida: tuletõrjujate väljaõppe parandamine; kaugloetavate gaasiandurite paigaldamine; süsteemid peavad sisaldama passiivset või aktiivset plahvatuskaitset (nt ventilatsioon vastavalt NFPA 68 või 69 standarditele) (McKinnon et al., 2020).

Suure salvestusjaama põlengu kustutamiseks võib kuluda 3000–5000 tonni vett, samas kui ühe auto puhul on see vajadus tavaliselt 20–100 tonni. Isegi pärast leekide kustutamist on akud alati uuesti süttima, mistõttu on vajalik pikaajaline ja pidev jahutamine veega. Kuna salvestusjaamade maht kasvab, on Liu et al. (2018) autorite sõnul hädavajalik karmistada ohutusstandardeid ja arendada uusi tehnoloogiaid, nagu näiteks uputatavad akukonteinerid, mida saaks õnnetuse korral kiiresti veega täita ja arendada varajased hoiatussüsteeme. Vajalik on reaajas jälgida akude temperatuuri ja gaaside eraldumist, et pakkuda täpset eelhoiatust, mis võimaldaks inimestel õigeaegselt evakueeruda (Liu et al., 2018).

Liitium-ioonakude ohutuse suurendamiseks rakendatakse nii välist kaitset (nt temperatuuriandurid ja survet vabastavad ventiilid) kui ka akude siseselt toimivaid meetmeid, näiteks lisaaineid, termiliselt stabiilseid katoodkatteid, automaatse väljalülitusega separaatoreid ja muid meetmeid (Liu et al., 2018).

Kõik liitium-ioonakud peavad enne kasutuselevõttu läbima põhjalikud ohutustestid, mis on reguleeritud rahvusvaheliste ja riiklike standarditega (nt ISO, IEC, SAE, UL, GB). Vastavalt riiklikele või piirkondlikele standarditele jagunevad need katsed kolme peamisse kategooriasse: mehhaanilised, elektrilised ja keskkonnatestid. Mehhaanilised testid simuleerivad füüsilisi mõjutusi, näiteks kukkumist, vibratsiooni (sõiduki liikumisel), mehhaanilist lööki (nt kokkupõrkel), survet (deformatsiooni hindamiseks), läbitungimist (nt terasvardaga) ja ümberminekut. Hinnatakse ka aku vastupidavust ebanormaalsele elektritingimustele, nagu ülelaadimine, ületühjenemine ning väline ja sisemine lühis. Samuti simuleeritakse äärmuslikke keskkonnatingimusi, sealhulgas vastupidavust kõrgele temperatuurile, termošokki (kiired temperatuurimuutused), niiskust, vette uputamist, soolapihustust, madalat õhurõhku (kõrgmäestikus sõitmisel) ja välist põlengut. Hoolimata sellest, et kasutusel olevad akude ohutusmeetmed peavad vastu neile testidele, esineb ikkagi akupõlenguid, sest tegelikud kasutusolukorrad on ettearvamatumad kui testtingimused (Lai et al., 2022).

Hiina, Ameerika Ühendriikide, Jaapani ja teiste riikide valitsused on hakanud toetama vanaadiumakude tööstuse arengut. Vanaadiumakusid peetakse ohutumaks, kuna need ei kujuta endast plahvatusohtu ega sisalda raskmetalle. Kuigi pulbriline vanaadium (nagu enamik pulbrilisi metalle) on põlev, ei ole enamik vanaadiumiühendeid põlevad (Park et al., 2018).

Ühe võimalusena on välja pakutud ka tahke elektrolüüdi kasutamist (tavapärase liitiumioonaku kasutab vedelat elektrolüüti). See hoiab ära elektrolüüdi aurustumise ja lekked. Tahkes

elektrolüüdis on agaioonjuhtivus väiksem ning anoodi ja katoodi vaheline takistus on suurem, mis tähendab, et nende akude eluiga ja võimsus on kehvemad (Park et al., 2018)..

Kui kodus tekib akupõleng, tuleb koheselt helistada päästeteenistusse ja otsida professionaalset abi. Võib proovida eemaldada põleva aku lähedusest kergesti süttivaid materjale, kui see ei kujuta endast ohtu tervisele (Wang et al., 2025). Ka päästeamet märgib oma kodulehel, et liitiumioonakude põleng on tavaliselt intensiivne, kiire ja võib olla väga ohtlik ning alati tuleb kutsuda professionaalset abi. Kui põleng toimub siseruumides, tuleb sealt viivitamatult lahkuda ja sulgeda uksed, sest tekkiv suits on mürgine. Kui on tegu väikese seadmega, võib tuld aeglustada tulekustustusteki, pulberkustuti, vahtkustuti (sobilik elektriseadmetele), spetsiaalse liitiumioonakudele mõeldud kustuti või liivaga. Tuleb teada, et liitiumioonakuseadme taassüütimine on väga tõenäoline ja voolu all olevaid seadmeid ei tohi kustutada veega.

Tuleb arvestada, et tulekustutusvahendid (vesi, vaht jne), toimivad kandjana kõigile eralduvatele saasteainetele. See võib suurendada saasteainete mõjupiirkonda. Näiteks võib tulekahju käigus eralduv HF moodustada lahuse koos tulekustutusvahendiga ning juba 0,01% kontsentratsioonis põhjustada kahjustusi inimese nahale, isegi vaid 5-minutilise kokkupuute korral. Seda tuleks samuti arvestada, kui projekteeritakse tulekustutussüsteeme akuparkidele (Mrozik et al., 2021).

Kasutatud akudega seotud terviseriskid

Väikeste akude eluiga on 3 aastat, suurematel 5-10 aastat, mis akude kasvava tarbimise tõttu tekitab suure ohtlike jäätmete voo (Dobó et al., 2023). 2019. aastal koguti dokumenteeritult ja suunati ringlusse vaid 17,4% globaalsetest elektroonikajäätmetest, mis tõstatab küsimuse ülejäänud akude saatusel keskkonnas (Łukasz et al., 2023). Euroopa Liit tekitab ligikaudu 44,3 miljonit tonni elektroonikajäätmeid aastas, kuid neist jõuab prügilatesse teadaolevalt vaid 0,6 miljonit tonni; ülejäänud ladestatakse ebaseaduslikult, eksporditakse mitteametlikult või taaskasutatakse keskkonnanõuetele mittevastaval viisil (Mrozik et al., 2021). 2018. aastal hinnati, et maailmas võeti ringlusse umbes 97 000 tonni liitiumioonakusid. Üle 80% ringlusse võetud akudest on väikesed akud (nt mobiiltelefonide akud), kuna elektrisõidukitest ja akuparkidest ringlusse jõudvate akude hulk on praegu veel väike, sest nende eluiga pole veel läbi (Mrozik et al., 2021).

Kasutusest kõrvaldatud liitiumioonakude käitlemine hõlmab nende taaskasutamist, ringlussevõttu, prügilasse ladestamist, töötlemist ning kahjuks ka ebaseaduslikku kõrvaldamist.

Praegu ei ole maailmas liitiumioonakude jäätmekäitluseks ühtseid standardeid. Iga riik kasutab üht või mitut meetodit, näiteks prügilasse ladestamist, põletamist ning täielikku või osalist taaskasutust, sõltuvalt akude arvust, kehtivast seadusandlusest ja infrastruktuurist. Mitteametlik kõrvaldamine või ümbertöötlemine ei ole haruldane tegevus (Mrozik et al., 2021).

Kas teadmatusesest või hooletusest jõuavad väikesed akud tavaprügi või taaskasutus-konteineritesse, mis on põhjustanud tulekahjusid transportimisel või materjalide taaskasutuskeskustes ning prügilates. Tuleb arvestada, et aku võib süttida kuid või aastaid pärast prügilasse ladestamist (Mrozik et al., 2021).

Suured liitiumioonakud transporditakse tavaliselt professionaalide poolt, kuid kui akud on sisemiselt kahjustatud, kuid veel ei põle, võivad nad jääda pikaks ajaks märkamatuks, mille järel need võivad kas süttida või eraldada mürgiseid gaase transpordi, ladustamise, ringlussevõtu või prügilasse viimise käigus. Transpordi ja ladustamisfaas on eriti ohtlik, kuna ladustamise keskkond on sageli ebasobiv. Paljudel juhtudel hoitakse akusid samadel tingimustel kui stabiilsemaid ja ohutumaid tooteid, ilma nende spetsiifilisi nõudeid piisavalt arvestamata (Wang et al., 2025).

Prügila tulekahjud, mida põhjustavad (tavaliselt väikesed) liitiumioonakud on kiiresti kasvav probleem. Suurbritannia jäätmekäitlusasutustes toimus aprill 2019 kuni märts 2020 umbes 250 tulekahju, mida põhjustasid väikesed akud võrreldes umbes 130 tulekahjuga eelmisel aastal – see tähendas 25% tõusu kõigist nende asutuste tulekahjust. Kõige tõsisem tulekahju nõudis üle 100 tuletõrjuja sekkumist, sulges rajatise 3 kuuks ning restaureerimine maksis üle 8,5 miljoni dollari (Mrozik et al., 2021).

Prügila põlengust tekib toksiliste ühendite ja suitsu segu, mis sisaldab polütsükklilisi aroomaatseid süsivesinikke, dioksiine/furaane, lenduvaid orgaanilisi ühendeid, raskmetalle, polüklooritud bifenoole ning õhusaaste osakesi PM_{2,5} ja PM₁₀. Põlengu suits kannab saasteaineid kilomeetrite kaugusele. Prügilapõlengute tõttu võib ka veekogudes lühiajaliselt tõusta raskmetallide või PAH-ide kontsentratsioon (Mrozik et al., 2021).

Lisaks põlengutele võivad akudest vabanevad ained prügilas jõuda ümbritsevasse pinnasesse ja pinna- ning põhjavette ka leostumise teel. See võib saastada pinnast või põhjaveevarusid ning transportida saasteaineid märkimisväärsetele kaugustele. Akude lagunemisel leostuvad keskkonda raskemetallid (koobalt, nikkel, liitium, mangaan, vask jm) (Mrozik et al., 2021).

Liitiumi suuremaid koguseid on juba leitud Yangtze'i ja teiste Shanghai jõgede vees. Liitiumi kõrge tasemeid mõõdeti ka Shanghai kraanivees. Liitiumil on suhteliselt madal toksilisus, kuid tegemist on üsna aktiivse elemendiga, mis suuremates kontsentratsioonides võib põhjustada seedetrakti ja närvisüsteemi häireid (Łukasz et al., 2023).

Raskmetallid võivad tekitada geneetilisi kahjustusi ning võivad põhjustada ka madalamat akadeemilist sooritusvõimet. Nikkel on tuntud allergeen ning suuremate kontsentratsioonide korral võib see põhjustada ka vähki. Koobalti tervisemõjud pole üheselt halvad, väikesed koobalti kogused on inimestele kasulikud (vitamiin B12 sünteesiks), kuid suuremad annused võivad põhjustada hingamisprobleeme ja nahalööbeid. Üldiselt sõltuvad koobaltiga kokkupuute kahjulikud mõjud peamiselt selle keemilisest vormist. Nikkel ja selle ühendid on klassifitseeritud 1. rühma kantserogeenideks, koobalt aga 2B rühma (võimalik kantserogeen) (Łukasz et al., 2023).

Taaskasutus

Alumiinium (Al), raud/teras (Fe), vask (Cu), mangaan (Mn), koobalt (Co), liitium (Li), nikkel (Ni) ja grafiit on toorained, mis on akude tootmiseks hädavajalikud. Välja arvatud raud ja vask, on need kantud USA Geoloogiateenistuse koostatud 50 kriitilise maavara nimekirja, mis viitab nende suurele majanduslikule ja poliitilisele tähtsusele. Neid nimetatakse ka energiapöörde metallideks (ingl *energy transition metals*), mille staatus ja nõudlus kasvavad kiiresti seoses nende kasutamisega rohetehnoloogiates (Łukasz et al., 2023). Seetõttu on suur huvi ka akudes sisalduvate metallide taaskasutamiseks, kuid taaskasutus on kogu maailmas alles lapsekingades. Praegu on Hiina suurim akude tootja ja tarbija, kuid ringlussevõtt on alles hiljuti alanud. Prognooside kohaselt võiks 2050. aastaks Hiinas toodetavate liitiumioonakude liitiuminõudlusest kuni 60% katta ringlussevõtu kaudu (Mrozik et al., 2021). Ringlussevõtt on majanduslikult atraktiivne eelkõige koobalti ja nikli tõttu (Łukasz et al., 2023). Praeguseks ei paku ükski olemasolev taaskasutusmeetod täiuslikku lahendust, mis võimaldaks kõigi aku komponentide ringlussevõttu ilma kahjulike emissioonideta, madala energiatarbimisega ja sealjuures väikeste kuludega (Dobó et al., 2023).

Euroopa Liidus hakkas 2023. aastal kehtima uus määrus EU2023/1542, mis reguleerib ja kontrollib liitium-ioonakude toorainete hankimist, kõrvaldamist ja taaskasutamist. See seab eesmärgiks, et 63 % portatiivsetest akudest peab olema kogutud eraldi muust prügist 2027. aastaks (Mrozik et al., 2021).

Akude taaskasutuses saab kasutada kolme protsessi: pürometallurgia, hüdro metallurgia ja otsene ringlussevõtt. Pürometallurgia hõlmab kõrge temperatuuriga sulatamist, mille järgselt saadakse segametalli sulam, mis koosneb Co, Cu, Fe ja Ni metallidest. See meetod ei nõua akude eelnevat sorteerimist, kuid saadud sulam vajab edasist töötlemist. Hüdro metallurgia võimaldab soovitud metalle taaskasutada katoodimaterjalist, leostades metalle välja happelises või aluselises keskkonnas. Otsene ringlussevõtt tähendab katoodi ja/või anoodimaterjali otsest taaskasutust, kuid see tehnoloogia ei ole veel täielikult välja arenenud (Mrozik et al., 2021). Pürometallurgia ei suuda taaskasutada mõningaid aku materjale, näiteks alumiiniumi, grafiiti ja plastikut, sest see nõuab suurt energiakulu ning tekitab palju ohtlikke gaase. Hüdro metallurgia on kulukas ja keeruline ning otsene taaskasutus on endiselt kaugel praktilisest rakendamisest. Kuna kasutatud akude ringlussevõtt on alles algusjärgus, on vaja edasisi jõupingutusi ja investeringuid, et saavutada tõhusad ja keskkonnasõbralikud lahendused (Dobó et al., 2023).

Keskkonnale ja tervisele kujutab ohtu ka akude ebaseaduslik kõrvaldamine. Ebaseaduslikud prügimäed asutatakse juhuslikult, kohad ei sobi selleks eesmärgiks ja see toob kaasa tõsise saastuse, ootamatuid tulekahjusid ning suuri täiendavaid kulusid kohalikele elanikele ja omavalitsustele ala puhastamiseks (Mrozik et al., 2021).

Kokkuvõte ja soovitused

Üha kõikumavamad elektri hinnad ja Balti riikide desünkroniseerimine Venemaa elektrisüsteemist loob vajaduse kasutada rohkem salvestustehnoloogiaid. Elektrit on võimalik suuremas mahus salvestada kasutades pumphüdrosalvestust (PHS) või akuparke. Salvestus võimaldab suurendada elektrisüsteemi paindlikkust ja seeläbi vähendab vajadust juhitavate võimsuste järele. Esimesed akupargid on Eestisse rajatud, arendamisel on Paldiski vesisalvesti ning akude kasutust suurendab ka elektriautode arvu kasv.

PHS jaama ehitus on keeruline, paljude keskkonna- ja terviseriskidega ning kestab eeldatavalt kaheksa aastat. Olulisemad terviseriskid kohalikule elanikkonnale on seotud ehitusega. Lõhkamistest ja ehitusel kasutatavatest masinatest tekib müra, tolmu ja vibratsioon, kuid nende leevendamiseks on kasutusel erinevad meetmed. Ehituse ajal esineb oht joogivee varule Paldiski linnas. Pärast jaama valmimist käitamise ajal on riskid oluliselt väiksemad.

Peamine akude tavakasutusega seotud risk on akude kontrollimatu kuumenemine (ingl *thermal runaway*). See on kiire aku soojenemise protsess sisemiste keemiliste reaktsioonide tõttu, mis võib lõppeda aku süttimise või plahvatusena. Kontrollimatu kuumenemine võib tekkida ilma nähtava põhjuseta tavakasutuse või ladustamise ajal. Suuremate akude (nt auto aku, akuparkide akud) lekkimise või põlemise käigus eralduvad toksilised ühendid (nt vesinikfluoriidhape (HF)), mis võivad olla siseruumides eluohtlikud. Akude põlengut on väga raske kustutada, sest nad süttivad uuesti.

Akude vastupidavust erinevates situatsioonides (mehhaanilisele vigastamisele, kõrgele temperatuurile, ülelaadimisele) testitakse enne nende turule lubamist ja kasutusel olevad akud peaksid olema ohutud. Siiski on maailmas kasvamas elektrisõidukite põlengute ja akuparkide põlengute arv, mis on kaasa toonud ka inimohvreid. Akude (enamasti väikeste akude, nt telefonidest) viskamine tavaprügi hulka on suurendanud Euroopa riikides põlengute teket jäätmekäitlusjaamades ja prügilates, mis tekitab kaugemale levivat õhusaastust ja pinnase ning vee reostust ohtlike ühenditega.

Suureneva akude kasutuse tingimustes on väga oluline pöörata tähelepanu nende tuleohutuse suurendamisele ja elanikkonna teavitustööle. Parandada tuleb ka akude kogumissüsteeme, et vältida nende sattumist tavaprügi hulka või loodusesse. Tuleb soodustada akude taaskasutuse arendamist, sest nii kogumine kui taaskasutus on praegu kogu maailmas alles lapsekingades, kuid selle tegemata jätmisega kaasnevad suured keskkonna- ja terviseriskid.

Kasutatud kirjandus

- Arteaga, J., Zareipour, H., & Thangadurai, V. (2017). Overview of Lithium-Ion Grid-Scale Energy Storage Systems. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 4(4), 197–208. <https://doi.org/10.1007/S40518-017-0086-0/FIGURES/5>
- Dobó, Z., Dinh, T., & Kulcsár, T. (2023). A review on recycling of spent lithium-ion batteries. *Energy Reports*, 9, 6362–6395. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.05.264>
- ENMAK 2035. (n.d.). *Energiamajanduse arengukava (ENMAK) | Kliimaministeerium*. Retrieved February 13, 2026, from https://kliimaministeerium.ee/energiamajanduse_arengukava
- Fu, X., Wang, L., Yuan, L., Hu, H., Li, T., Zhang, J., Ke, Y., Wang, M., Gao, Y., Huo, W., Chen, Y., Zhang, W., Liu, J., Huang, Z., Zhao, Y., Hu, F., Zhang, M., Liu, Y., Sun, X., & Hu, D. (2023). Long-Term Exposure to Traffic Noise and Risk of Incident Cardiovascular Diseases: a Systematic Review and Dose-Response Meta-Analysis. *Journal of Urban Health : Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 100(4), 788–801. <https://doi.org/10.1007/S11524-023-00769-0>
- Graptoliitargillit – Eesti maavarad. (n.d.). Retrieved February 25, 2026, from <https://sisu.ut.ee/maavarad/graptoliitargillit/>
- Gür, T. M. (2018). Review of electrical energy storage technologies, materials and systems: challenges and prospects for large-scale grid storage. *Energy & Environmental Science*, 11(10), 2696–2767. <https://doi.org/10.1039/C8EE01419A>
- IEA. (2026). *Energy storage*. <https://www.iea.org/energy-system/electricity/grid-scale-storage>
- Karambelkar, S., Cantor, A., Bui, T. K., Turley, B., Fischer, M., & Ames, S. (2025). Pumped Storage Hydropower in the United States: Emerging Importance, Environmental and Social Impacts, and Critical Considerations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 12(2), e70017. <https://doi.org/10.1002/WAT2.70017>
- Lai, X., Yao, J., Jin, C., Feng, X., Wang, H., Xu, C., & Zheng, Y. (2022). A Review of Lithium-Ion Battery Failure Hazards: Test Standards, Accident Analysis, and Safety Suggestions. *Batteries 2022*, Vol. 8, 8(11). <https://doi.org/10.3390/BATTERIES8110248>
- Lisbona, D., & Snee, T. (2011). A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. *Process Safety and Environmental Protection*, 89(6), 434–442. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2011.06.022>
- Liu, K., Liu, Y., Lin, D., Pei, A., & Cui, Y. (2018). Materials for lithium-ion battery safety. *Science Advances*, 4(6). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAS9820/ASSET/7177CAED-1BD7-4737-ADA5-9BC96E82076F/ASSETS/GRAPHIC/AAS9820-F6.JPEG>
- Łukasz, B., Rybakowska, I., Krakowiak, A., Gregorczyk, M., & Waldman, W. (2023). LITHIUM BATTERIES SAFETY, WIDER PERSPECTIVE. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 36(1), 3. <https://doi.org/10.13075/IJOMEH.1896.01995>

- McKinnon, M., DeCrane, S., & Kerber, S. (2020). *Four Firefighters Injured In Lithium-Ion Battery Energy Storage System Explosion - Arizona*.
https://fsri.org/sites/default/files/2021-07/Four_Firefighters_Injured_In_Lithium_Ion_Battery_ESS_Explosion_Arizona_0.pdf
- Mrozik, W., Rajaeifar, M. A., Heidrich, O., & Christensen, P. (2021). Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, *14*(12), 6099–6121. <https://doi.org/10.1039/D1EE00691F>
- Park, Y. J., Kim, M. K., Kim, H. S., & Lee, B. M. (2018). Risk assessment of lithium-ion battery explosion: chemical leakages. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, *21*(6–8), 370–381. <https://doi.org/10.1080/10937404.2019.1601815>
- Rohetiigri Energia Teekaart. (2025). *Energiasalvestus võimalused- ja vajadused*.
<https://energia.rohetiiger.ee/energiasalvestus-voimalused-ja-vajadused/>
- Skepast & Puhkim OÜ. (2022). *Paldiski pump-hüdroakumulatsioonijaama keskkonnamõju hindamine ehitusprojekti koostamise käigus*. Aruanne.
- Skepast&Puhkim OÜ. (2019). *Paldiski pump-hüdroakumulatsioonijaama detailplaneeringu keskkonnamõju strateegiline hindamine (KSH)*. Aruanne.
- Wang, Z., Huang, G., Chen, Z., & An, C. (2025). Accidents involving lithium-ion batteries in non-application stages: incident characteristics, environmental impacts, and response strategies. *BMC Chemistry*, *19*(1), 94-. <https://doi.org/10.1186/S13065-025-01445-X/PEER-REVIEW>
- WHO. (n.d.). *Air quality, energy and health*. Retrieved February 27, 2026, from https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants?utm_source=chatgpt.com
- WHO. (2019). *Environmental noise guidelines for the European Region*.
<https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563>
- Wu, S., Du, W., Zhong, X., Lu, J., & Wen, F. (2023). The association between road traffic noise and type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis of cohort studies. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(14), 39568–39585.
<https://doi.org/10.1007/S11356-023-25926-5/TABLES/5>
- Zeng, X., Li, J., & Liu, L. (2015). Solving spent lithium-ion battery problems in China: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *52*, 1759–1767. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.08.014>
- Zhang, Z., Miao, G., Zhang, X., Shu, Z., Lu, D., Song, Y., Yu, S., Liu, Q., Song, Y., Zhang, R., Jin, X., & Zheng, Y. (2026). Redefining the Health Risk of Battery Materials Through a Biologically Transformed Metal Mixture. *Advanced Science*, e23469.
<https://doi.org/10.1002/ADVS.202523469>
- Zhou, T., Sun, J., Li, J., Wei, S., Chen, J., Dang, S., Tang, N., Zhu, Y., Lian, Y., Guo, J., Zhang, F., Xie, H., Li, H., Qiu, X., & Chen, L. (2023). Toxicity, Emissions and Structural Damage from Lithium-Ion Battery Thermal Runaway †. *Batteries*, *9*(6).
<https://doi.org/10.3390/BATTERIES9060308/S1>

