

OÜ Inseneribüroo STEIGER

Maakütte kasutuse reeglistiku loomine Tallinnas

Töö nr 25/5340

Tallinn 2025

OÜ Inseneribüroo STEIGER
Männiku tee 104/1
11216 Tallinn

Tel 668 1011
E-mail: info@steiger.ee
www.steiger.ee

Äriregistrikood 11206437
ak EE701010220051598014
SEB Pank, SWIFT EEUHEE2X

Kinnitan:

Erki Niitlaan
Juhatuse liige

/allkirjastatud digitaalselt/

Aruande koostasid:

Aivar Auväärt
Geotermaalenergia spetsialist

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaarel Mänd
Hüdrogeoloog

/allkirjastatud digitaalselt/

Lizet Tüvi
Hüdrogeoloog

/allkirjastatud digitaalselt/

Mark Karimov
Geoloog (puurija tase 3, tunnistus 150105)

/allkirjastatud digitaalselt/

Jevgeni Fjodorov
Puurimisspetsialist

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaja Paat
Joonestaja

/allkirjastatud digitaalselt/

ANNOTATSIOON

Aruandes antakse ülevaade Tallinna linnas kehtivatest ja kavandatavatest soojuspuuraukude rajamise ning maasoojussüsteemide kasutamise põhimõtetest. Dokument käsitleb õiguslikku raamistikku, geoloogilisi ja hüdrogeoloogilisi tingimusi ning kohaliku omavalitsuse rolli maakütte lahenduste koordineerimisel. Fookuses on põhja- ja joogivee kaitse tagamine, soojuspuuraukude ohutute rajamissügavuste määratlemine ning nende integreerimine linna keskkonnakaitselisse planeerimisse vastavalt kehtivatele ehitus- ja keskkonnanõuetele.

Esitatud on kehtivate määruste ja rahvusvahelise praktika analüüs, sh Eesti ja Euroopa riikide õigusaktide ning soojuspuuraukude rajamise kogemuste põhisätteid. Aruandes käsitletakse soojuspuuraukude rajamise protsessi alates taotluste menetlusest kuni tehniliste piirangute määratlemiseni, arvestades Tallinna eripärast geoloogilist ehitust, kinnitatud joogiveevarusid ning muinsus- ja looduskaitsepiiranguid. Lisaks kirjeldatakse keskkonnamõju riske ja ohutuskaugusi, mis tulenevad nii vertikaalsete kui ka horisontaalsete maasoojussüsteemide iseloomust.

Lisaosades on toodud kitsenduste kaart ja soovituslikud tingimused soojuspuuraukude rajamiseks erinevates linnalinnades, sealhulgas maksimaalse lubatud sügavuse määrangud, sanitaarkaitsealad ja kaitstavad objektid. Aruanne on mõeldud eeskätt kohaliku omavalitsuse ametnikele, planeerijatele ja projekteerijatele, toetades Tallinna soojuspuuraukude rajamise ühtset, läbipaistvat ja keskkonnahoidlikku korraldust.

SISUKORD

ANNOTATSIOON	3
1. TÖÖÜLESANNE	8
2. MAASOOJUSSÜSTEEMID JA TÖÖPÕHIMÕTTED	9
Kinnised süsteemid.....	9
- Vertikaalne väliskontuur	10
- Horisontaalne väliskontuur	12
Avatud süsteemid	13
Erilahendused	15
3. PUURIMISMEETODID VASTAVALT SÜSTEEMILE	19
Vertikaalne puurimine kinniste süsteemide jaoks	19
Puurimine avatud süsteemide jaoks	20
Kaevetööd horisontaalsüsteemide jaoks	20
Energiavaiade puurimine ja integreerimine.....	21
4. PAIGALDUSPROTSESS.....	22
Kinnise süsteemi u-kollektori ja muude elementide paigaldamine.....	22
Täitematerjalide ja tihenduse roll	22
Katsed ja süsteemi käikulaskmine.....	22
5. TÖÖDEGA SEOTUD RISKID JA OHUD.....	24
Geoloogilised riskid	24
Vee- ja keskkonnariskid	24
Tehnilised ja paigaldusriskid.....	24
Järelevalve	25
6. ÜLEVAADE MAASOOJUSSÜSTEEMIDE RAJAMIST REGULEERIVAST SEADUSANDLUSEST MEIL JA MUJAL ..	26
Maasoojussüsteemide seadusandlus Eestis	26
Maasoojussüsteemide reeglistik Soomes	26
Maasoojussüsteemide reeglistik Rootsis	27
Maasoojussüsteemide reeglistik Taanis	28
Maasoojussüsteemide reeglistik Hollandis.....	29
Maasoojussüsteemide reeglistik Suurbritannias.....	29
7. SOOJUSPUURAUKUDE RAJAMISE SENINE PRAKTIKA EUROOPA RIIKIDES JA EESTIS	31
8. ÜLEVAADE MAASOOJUSE KASUTAMISEST TALLINNAS..	36
9. TALLINNA GEOLOOGILINE EHITUS JA HÜDROGEOLOOGILISED TINGIMUSED	39
Geoloogiline ehitus.....	39
Hüdrogeoloogilised tingimused	41
10. SOOJUSPUURAUKUDE MÕJU KESKKONNALE, TALLINNA ERIPÄRA.....	45

11. ETTEPANEKUD SOOJUSPUURAUKUDE RAJAMISE REGULEERIMISEKS TALLINNA ERINEVATES PIIRKONDADES	48
12. KIRJANDUS	56

ELEKTROONILISED LISAD

1. Klindijoon.shp
2. YhisvvPK.shp
3. PiiranguAlad.shp
4. Puhver250m.shp
5. Kaugküttepiirkonnad.shp
6. Lontova_40.shp
7. Tyrisalu.shp
8. Puhver200m.shp
9. O-C_z.shp
10. C-V_z.shp
11. Soojuspuuraugu rajamise kitsenduste kaart.pdf

TERMINOLOOGIA

ATES - *Aquifer Thermal Energy Storage* / põhjavees oleva soojuse abil soojusenergiat tootev süsteem

BTES - *Borehole Thermal Energy Storage* / puuraukudega avatud kivimite soojuse abil soojusenergiat tootev süsteem

C-V PVK – Kambriumi-Vendi põhjaveekompleks

EGS - *Enhanced Geothermal System* / kunstlike reservuaaride loomise abil kuumades kuivades kivimites murendamise teel soojusenergiat tootev süsteem

Filtratsioonikoefitsient – näitab, kui kiiresti vesi suudab liikuda läbi kivimi või setete

Keerd-löökpuurimine / DTH (*Down-The-Hole hammer*) - puurimistehnika, kus puurpea lööb ja keerleb samaaegselt, sobib kõva kivimi läbimiseks. Pneumaatiline löök toimub puurpeasse suunatava õhu või vee surve

Klindias tang - järsk nõlv maastikus, kus lubjakivid tulevad pinnale

Konsolideerimata setted - setted mis pole veel tihenenud ega kivistunud (nt liiv, kruus, turvas)

Kristalsed kivimid - väga tihedad moonde- või tardkivimid, nt graniit

Kvaternaari PVK - ülemine veekiht, 0-25 m sügavusel

Lamam - kihi alumine piir

Lasund - kivimikihi ülemine piir

Manteltoru - metallist või plastist toru, mis paigaldatakse puuraugu ülaossa, et stabiliseerida seda ja takistada saaste sattumist sügavamatesse kihtidesse

MSS - maasoojussüsteem

O-C PVK - Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleks

PDC - *Polycrystalline Diamond Compact* / polükristallilised teemant lõikeelemendid

PE - *Polyethylene* / Polüetüleen

Pinnavesi - vesi, mis asub maapinna lähedal või selle peal, näiteks jõed, järved, tiigid, ojad

PNEC - *Predicted No Effect Concentration* – kontsentratsioon, mille juures aine ei avalda looduskeskkonnale kahjulikku mõju

Põhjavesi - vesi, mis asub maapinna all küllastunud vööndis, täidab maapõue poorid, lõhed või õõnsused

Puurhiiv - puurimisel tekkiv peen materjal (liiv, kivipuru), mis eemaldatakse puuraugust

PVC - *Polyvinyl Chloride* / polüvinüülkloriid

RT I - Riigi Teataja I osa

Sanitaarkaitseala - maa-ala ümber puurkaevu või veevõtukohta, kus kehtivad piirangud saastamise vältimiseks

Settekivimid - kivimid, mis on tekkinud setete ladestumise ja kivistumise teel, nt lubjakivid

Soojuskandevedelik - vedelik, mis liigub torudes ja kannab soojust maapinnast hoonesse või vastupidi; sageli kasutatakse etanooli või glükooli vesilahuseid

Soojusjuhtivus - näitab, kui hästi materjal juhib soojust; mida kõrgem väärtus, seda parem soojusjuht

Tamponeerimine - puuraugu tagasitäitmine tsemendiseguga, et takistada vedelike liikumist, sulgeda kasutuselt välja jäänud auk või vältida lekkeid

TRT-test / *Thermal Response Test* - katse, millega mõõdetakse maapinna soojusomadusi, et projekteerida efektiivne maaküttesüsteem

Tsementeerimine - puuraugu või kaevu mantelkorutaguse tihendamine tsemendiseguga, et isoleerida kivimikihid, takistada vedelike liikumist kihtide vahel ja stabiliseerida mantelkoru

U-kollektor / *U-pipe* - torustik, mis moodustab “u”-kujuliselt ühendatud plasttorud, mis viiakse puurauku ja mille kaudu liigub soojuskandevedelik

Veekiht - kivimikiht, mis sisaldab ja juhib maapõues vett

Veepide - kiht, mis ei lase veel maapõues allapoole, või ülespoole liikuda (nt savikiht)

Ühisveevärk – Tallinna Vesi AS puurkaevud.

1. TÖÖÜLESANNE

- 1.1. Tellitava töö eesmärgiks on Tallinna administratiivpiire hõlmava põhja- ja joogivee kaitsest lähtuva maakütte kasutamise reeglistiku loomine tingimuste seadmiseks soojuspuuraukude rajamise taotlustele.
- 1.2. Töös tuleb käsitleda nii kinnise kui ka avatud süsteemiga vertikaalseid soojuspuuraukusid ja horisontaalseid maasoojuskontuure. Töö koosneb aruandest ja soojuspuuraukude rajamise kitsenduste kaardist.
- 1.3. Töö aruanne peab sisaldama:
 - 1.3.1. Ülevaadet maasoojussüsteemide rajamist reguleerivast seadusandlusest meil ja mujal;
 - 1.3.2. Soojuspuuraukude rajamise senist praktikat Euroopa riikides ja Eestis;
 - 1.3.3. Ülevaadet maasoojuse kasutamisest Tallinnas;
 - 1.3.4. Tallinna geoloogilist ehitust ja hüdrogeoloogilisi tingimusi;
 - 1.3.5. Soojuspuuraukude mõju keskkonnale, Tallinna eripära.
- 1.4. Töö aruanne peab sisaldama ettepanekuid soojuspuuraukude rajamise reguleerimiseks Tallinna erinevates piirkondades, sealjuures
 - 1.4.1 Soojuspuuraukude maksimaalne ohutu sügavus Tallinnas (väljundiks soojuspuuraugu rajamise kitsenduste kaart);
 - 1.4.2 Kinnitatud joogiveevarude paiknemise sügavuse kaart;
 - 1.4.3 Kaugus kinnistu piirist (nii vertikaalne kui ka horisontaalne kontuur);
 - 1.4.4 Kaugus hoone välispiirist;
 - 1.4.5 Kaugus naaberkinnistu soojuspuuraugust;
 - 1.4.6 Kaugus puu vertikaalprojektsioonist maapinnal;
 - 1.4.7 Kaugus hooldusalaga puurkaevust ja salvkaevust;
 - 1.4.8 Muud soovitud ja tingimused soojuspuuraukude rajamiseks;
 - 1.4.9 Ettepanekud lisauuringuteks (vajadusel).
- 1.5. Soojuspuuraugu rajamise kitsenduste kaart peab sisaldama järgmist:
 - 1.5.1 Soojuspuuraugu rajamise suurimad lubatud sügavusvahemikud 5 või 10 m täpsusega;
 - 1.5.2 Puurkaevude sanitaarkaitsealad;
 - 1.5.3 Ühisveevarustuse puurkaevude 200 m puhvertsoon;
 - 1.5.4 Kinnitatud joogiveevarude (C-V kogu Tallinn, O-C Nõmme ja Lasnamäe) paiknemise sügavuse kaart;
 - 1.5.5 Kinnismälestiste kaitsevööndid ja muinsuskaitsealad;
 - 1.5.6 Kaitstavad loodusobjektid ja kaitsealad;
 - 1.5.7 Tallinna kaugküttepiirkonnad.

2. MAASOOJUSSÜSTEEMID JA TÖÖPÕHIMÕTTED

Eestis on geotermaalenergia, eriti madalatemperatuurilise maasoojusenergia rakendamine, kujunemas üha olulisemaks taastuvenergia allikaks. Kliimamuutuste leevendamise ja energiatõhususe suurendamise kontekstis nähakse selles tehnoloogias suurt potentsiaali nii väikeelamute, avalike hoonete kui ka kvartalipõhiste lahenduste jaoks. Eesti geoloogiline ehitus võimaldab mitut tüüpi maasoojussüsteemide (MSS) rakendamist. Ehituselt jagunevad MSS-id avatud ja kinnisteks. Saadaval on süsteemid millel võib olla nii jahutus- kui ka kütisfunktsioon. Euroopa Liidu kliima- ja energiapoliitika seab selged sihid: aastaks 2030 tuleb vähendada kasvuhoonegaaside heidet vähemalt 55 % võrreldes 1990. aastaga ((EU) 2021/1119), tõsta taastuvenergia osakaal energiatarbimises vähemalt 42,5 %-ni ((EU) 2023/2413) ja parandada energiatõhusust 11,7 % võrreldes 2020. aasta prognoosidega ((EU) 2023/1791). Lõppeesmärk on saavutada kliimaneutraalsus aastaks 2050 ((EU) 2021/1119). MSS-id on üks realistlikest ja praktilistest vahenditest nende eesmärkide täitmiseks. Erinevalt kõrge geotermilise gradiendiga riikidest (nt Island, Itaalia) on Eestis maa-alune temperatuur suhteliselt madal ja sellest ei piisa hoonete otsekütmiseks. Seetõttu kasutatakse Eestis MSS-ides soojuspumpasid, mis tõstavad madala temperatuuriga põhjaveest või maapinnast saadud soojusenergia hoonete kütmiseks vajaliku tasemeni (30–60 °C). Soodsates tingimustes tarbib maasoojuspump oluliselt vähem elektrienergiat, kui ta suudab soojusenergiat edasi anda. See tähendab, et süsteemi kasutegur on kõrge ja aitab vähendada nii energiakulusid kui ka süsinikuheidet.

Kinnised süsteemid

Kinnised süsteemid on kõige levinumad maasoojusenergia kasutamise lahendused. Need kasutavad maapõuest soojusenergia kogumiseks spetsiaalset torustikku, milles tsirkuleerib soojuskandjana vedelik. Soojus eraldatakse maapinnast ja kantakse üle hoone sisekliimasüsteemi. Süsteem on hermeetiline ja vedelik ringleb torustikus, mis on täidetud madala külmumispunktiga soojuskandvedelikuga. Selline lahendus minimeerib keskkonnamõjusid ja põhjavee reostusohud. Süsteemi efektiivsust mõjutab torustiku paigutus, geoloogiline läbilõige ja kasutatud täitematerjalid. Kinnise soojussüsteemi levinumaks näiteks on horisontaalse väliskontuuriga MSS.

MSS koosneb kolmest põhiosast: väliskontuurist, soojuspumbast ja hoone sisemisest küttesüsteemist. Väliskontuur võib paikneda horisontaalselt maapinnas, vertikaalses puuraugus või veekogus, sõltuvalt süsteemi tüübist ja krundi eripäradest.

Väliskontuuri torustikus ringlev spetsiaalne soojuskandvedelik ammutab madala temperatuuriga soojust maapinnast ning kannab selle soojuspumbale, kus see tõstetakse kasutustemperatuurile. Hoone sees liigub soojus edasi tavaliselt vee abil.

Soojuspumbas kasutatakse külmaaine aurustub ja kondenseerub hermeetilises tsüklis. Eestis enim kasutatavad külmaained kuuluvad fluorosüsivesinike hulka, mis ei ole plahvatusohtlikud ega mürgised ning on seetõttu sobivad kasutamiseks ka elamutes. Vastavalt fluoritud kasvuhoonegaase käsitlevale Euroopa Parlamendi ja Nõukogu määrusele nr 573/2024 (Euroopa Parlament ja Euroopa Nõukogu, 2024), tohib seadmete paigaldust ja hooldust teostada ainult vastava sertifikaadiga isik.

Tavaliselt ulatub külmaaine kogus 0,5 kg-st kodumajapidamistes kasutatavates soojuspumpades kuni umbes 100 kg-ni suurtes tööstuslikes soojuspumpades. Soojussüsteemides kasutatavad külmaained on välistemperatuuril ja õhurõhu juures

gaasilised ja lekete korral lenduvad ning seetõttu ei kujuta nad ohtu veekeskkonnale. Otseaurustita kinnise soojussüsteemi külmaaine paikneb soojuspumbas ning selle sattumise oht veekeskkonda on välistatud.

Kinnise soojussüsteemi otseaurustiga variant on energiatõhusam, kuid nõudlikum aurusti torustiku tehniliste näitajate osas. Kinnise soojussüsteemi otseaurustiga variandi puhul paikneb külmaaine väliskontuuris, suurem on risk külmaaine keskkonda sattumiseks seoses väliskontuuri vigastusega. Sellised süsteemid ei ole Eestis enam laialdaselt kasutusel. Eesti Soojuspumba Liidu hinnangul selliseid süsteeme enam ei ehitata hinna konkurentsivõime puudumise tõttu ning otseaurustiga süsteemide arv võib olla kuni ca 130 (Maves, 2012).

Vertikaalne väliskontuur

Vertikaalse väliskontuuriga MSS-id sobivad hästi piirkondadesse, kus maa-alune ruum on piiratud, näiteks linnadesse ja tiheasustusega elamualadele. Nendes süsteemides paigaldatakse torustik Tallinna piirkonnas 50–150 meetri sügavustesse puuraukudesse, mille kaudu vahetatakse soojust pinnakatte ja/või aluspõhjaga. Sügavamates kihtides püsib maapinna temperatuur aastaringselt stabiilsena, tavaliselt 6–8 °C, mis tagab süsteemi töökindluse ja tõhususe ka külmematel kuudel. Vertikaalsüsteemi eelis seisneb selles, et iga puuraugu meeter tagab suurema soojusvõimsuse. See suudab toota ligikaudu 30–100 W/m, sõltuvalt geoloogilisest läbilõikest ja soojusvaheti tüübist.

Kuigi vertikaalsed süsteemid on efektiivsed ning ruumisäästlikud, kaasneb nendega kõrgem esialgne investeering, sest puurimistöödeks on vaja spetsialiseeritud tehnikat ja oskusteavet. Sellegipoolest kompenseerib kõrge hooajaline kasutegur aja jooksul tehtud kulutused, muutes vertikaalse süsteemi pikaajaliselt kuluefektiivseks ja keskkonnasõbralikuks lahenduseks (Joonis 2.1.).

Tootlikkust mõjutavad olulised kivimi omadused. Tihedad ja hästi soojust juhtivad kivimid, nagu graniit ja gneiss, võimaldavad suuremat soojusülekannet. Savikad või poorsed kihid, näiteks liivsavi, on madalama soojusjuhtivusega ning võivad vajada sügavamaid või rohkem puurauke.

Soojuspuuraugud mõjutavad põhjavee temperatuuri väga lokaalselt ja piiratult. Kinnise kontuuriga soojuspuuraukude mõõdetav mõju põhjavee temperatuurile ulatub reeglina vaid 1–5 meetri kaugusele puuraugust ning ainult väga sügavate (>100 m) puuraukude puhul võib 1° C soojusefekt ulatuda kuni 10 meetrini (Jõelet, 2007, 2012).

Tavaliselt kasutatakse vertikaalses soojuspuuraugus u-kujulist väliskontuuri torustikku, kus soojuskandevahetlik liigub mööda torusid allapoole ja seejärel üles tagasi. Efektiivsemaks lahenduseks loetakse topelt u-kollektorit, mille puhul on puuraugus kaks toru alla ja kaks üles. Paigaldus on keerukam ning nõuab suurema läbimõõduga puurauku, kuid võib anda 10–20 % suurema soojusvõimsuse meetri kohta (Wang et al., 2024; Kerme et al., 2023; Jõelet et al., 2020).

Süsteemi töökindluse ja kasuteguri tagamiseks on oluline ka väliskontuuri torude omavaheline paigutus. Külma ja sooja toru üksteisele liiga lähedal paiknemine võib põhjustada otsest torudevahelist soojusülekannet ning vähendada soojusvahetuse efektiivsust. Selle vältimiseks kasutatakse spetsiaalseid klambreid või vahedetaile, mis hoiavad torude vahel kindlat distantssi. Mõned tootjad pakuvad torulahendusi, millel on juba sisseehitatud vaheseinad torude eraldamiseks. Need konstruktiivsed meetmed

aitavad tagada süsteemi parema soojusülekande ja pikaajalise töökindluse (Fan et al., 2023; Salhein et al., 2024). Kommertskasutuseks pakutavad u-kujulised kollektorid piirnesid veel alles hiljuti 500 m pikkuse ja 50 mm siseläbimõõduga. Paaril viimasel aastal on erinevad tootjad hakanud eksperimentaalselt tootma nii pikemaid u-kollektoreid, kuid suurema läbimõõduga, ovaalseid ja sisemise turbulentsi suurendava sisepinnaga torustikke.

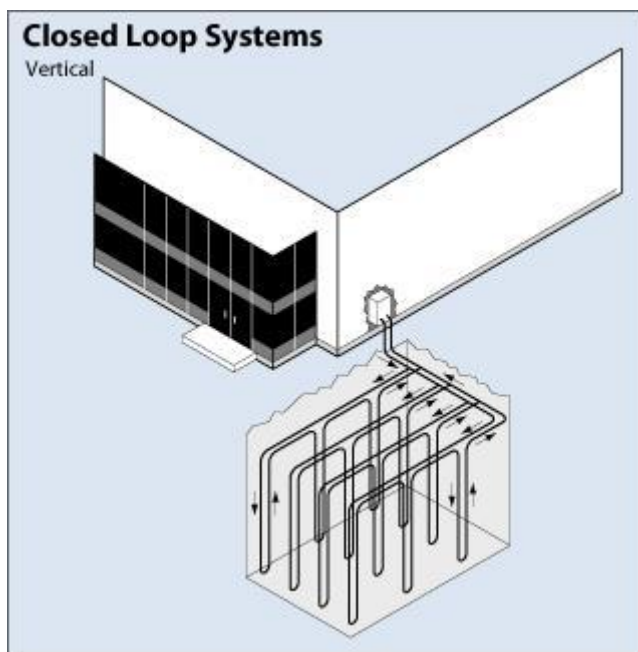
Soojuspuuraukude mõju põhjaveele võib avalduda soojuskandevereliku väliskontuuri rikke korral. Kui puuraugus olev torustik (väliskontuuri) saab kahjustada, satuvad ained soojuskandeverelikus koheselt põhjaveele, kui väliskontuuri ei ümbritse piisavalt tihe ja veekindel tampooneerimismaterjal. Väliskontuuri ümbritsev isolatsioonikiht peab säilitama oma veepidavuse, et vältida põhjaveekihtide saastumist võimaliku lekkiva soojuskandevereliku tõttu. Seepärast tuleb tagada, et torude ja puuraugu seina vaheline ruum oleks täidetud veetiheda seguga. Tavaliselt kasutatakse selleks bentoniidi, liiva ja tsemendi segu. Enamasti püütakse maasoojusenergia süsteemides valida selline täitematerjal, mis juhiks soojust võimalikult hästi, et tõsta kogu süsteemi tõhusust.

Lekke korral satuvad põhjaveekihti väga väikesed, kuid potentsiaalselt olulised kogused ainet. Ühes kuupmeetris veeküllastunud pinnases (nt liiv või liivakivi) on umbes 100 liitrit vaba vett. Kui mõne ohtliku aine piirnorm põhjavees on 1 µg/l, tähendab see, et ainult 0,0001 grammi ainet kuupmeetri kohta võib piirarvu ületada. Seega, 30 meetri paksuses veekihi hektari suurusel alal piisab ainult 30 grammist reostavat ainet, et põhjavesi muutuks saastunuks (100 µg/l korral vastavalt 3 kg). Samas tuleb arvestada, et enamik tänapäeval kasutatavaid soojuskandeverelikke, nagu etanool (piiritus), ei ole põhjaveele ohtlikud ja lagunevad looduslikult, tõstes ajutiselt vee oksüdeeritavust, kuid põhjustamata püsivat kahju (Maves, 2012).

Etanoolipõhised soojuskandeverelikud on looduses kiiresti biolagunevad. Soome Geoloogiateenistuse poolt läbiviidud 100 ja 300 liitrise soojuskandeverelike lekete modelleerimiskatsete abil (Arola et al., 2021) leiti, et erinevates setetes ja kivimites ei tuvastatud etanooli levikut PNEC-arvu alusel kaugemale kui 40 – 60 m lekkeallikast (etanooli PNEC piirarvuline väärtus on 0,96 mg/l; PNEC – vesikonnaspetsiifiliste saasteainete arvutuslik mittetoimiv kontsentratsioon). Sarnast modelleerimiskatsetel põhinevat tulemust on kirjeldatud ka Jõelet ja Paat (2020) aruandes, kus erinevate soojuskandeverelike või neis kasutatavate orgaaniliste ainete (etüleenglükool, bensotriasool, tolüültriasool, karboksüülhape, bensoehape, etüülhape) lekketsoonid 20 m paksuses hea veejuhtivusega (0,4 m/d) ning konsolideerimata setetest koosnevas veekihi ei ulatunud 100 m kaugusele lekkekohast.

Kinnise kontuuriga vertikaalsed soojuspuuraugud on reeglina ohutud, kui need on rajatud nõuetekohaselt. Põhjaveekihtide segunemine võib toimuda vaid juhul, kui süsteemi kasutatakse vastuolus süsteemi kasutustingimustega.

Kui soojuspuuraugus langeb tagasivoolava soojuskandevereliku temperatuur liiga madalale, külmub toru ümbritsev veetihe täitematerjal. Korduva külmumise ja sulamise tulemusel võib täitekihi veepidavus aja jooksul väheneda. Eriti juhtub see siis, kui MSS-i töörežiim muutub, näiteks talvel toimub kütmine ja suvel jahutamine ning täitematerjal ei suuda külmumise järel täielikult taastada oma vettpidavaid omadusi. Seetõttu on väga oluline tagada süsteemi korrektne töötemperatuur ja hooldus, et vältida täitematerjali lagunemist ja põhjavee saastumise riski.



Joonis 2.1. Vertikaalse kinnise süsteemiga MSS (*U.S Department of Energy*)

Järjest enam on levinud ühistelgsed ehk koaksiaalsed torud, milles soojuskandev vedelik liigub vastassuundades välimises ja sisemises torus. Selline lahendus suurendab soojusvahetuse efektiivsust. Kütterežiimis võetakse soojust maapinnast. Jahtunud vedelik liigub välimises torus allapoole, soojeneb järk-järgult kivimi soojuse toimel ning tõuseb sisemise toru kaudu üles. Jahutusrežiimis antakse soojus pinnasesse. Soojenenud vedelik liigub sisemises torus allapoole, jahtub kivimite soojusjuhtivuse mõjul ning suundub välimise toru kaudu tagasi maapinnale. Koaksiaaltorude kasutamine on eeskätt otstarbekas sügavate puuraukude puhul, kuna lahendus parandab soojusülekannet ja võimaldab energiatõhusamat süsteemi tööd (Wang et al., 2025; Pockelé et al., 2021). Kasutusel on erinevaid torustikutüüpe. Traditsioonilised kahetorulised, vaakum-isoleeritud ja aerogeeltäidisega torustikud. Kaks viimast peaksid lahendama soojuskadude probleeme, kuid on kallid ja tundlikud mehaanilistele kahjustustele.

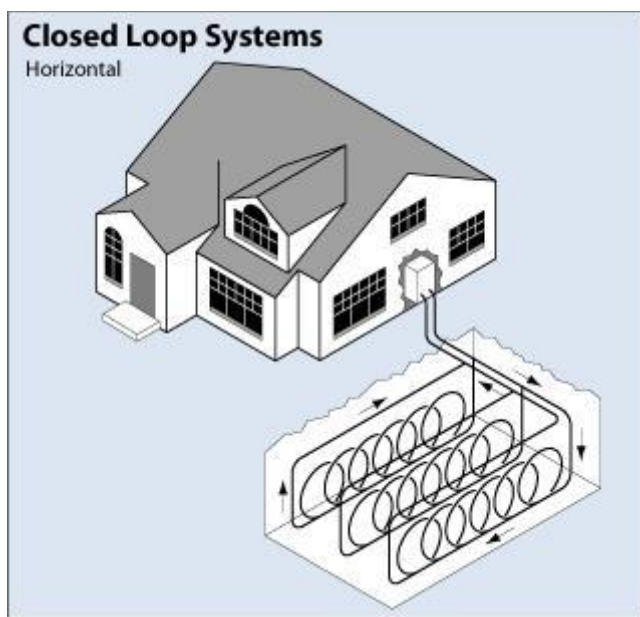
Horisontaalne väliskontuur

Horisontaalse väliskontuuriga süsteemid paigaldatakse 1–1,2 meetri sügavusele ja vajavad suurt maa-ala. Need sobivad hästi eramajadele, kuid nende efektiivsus sõltub pinnase temperatuurist, mis muutub aastaajati. Horisontaalse väliskontuuriga MSS ühepereelamule nõuab 600–800 m² pindala. Torustik asetatakse sirgete, paralleelsete lõikudena, mille vahekaugus on vähemalt 1 m, et piirata torude vahelist soojuslikku ristmõju. Kui torustiku kogupikkus on suur, jagatakse see mitmeks hüdrauliliselt tasakaalustatud ringiks, millest igaühe pikkus ei ületa 500 meetrit. Antud meetodi abil tagatakse süsteemi rõhukadu alla 1 baari, mis on oluline selle töökindluse ja energiakulukuse seisukohalt (Jõelet et al., 2020). Energianõudluse arvestuses rakendatakse rusikareeglit, mille kohaselt paigaldatakse iga 1 m² kütava pinna kohta 3 meetrit maakollektorit. Näiteks 130 m² suuruse elamu korral oleks vajalik paigaldada ligikaudu 400 meetrit toru ja tagada ligikaudu 470 m² suurune maa-ala (Joonis 2.2).

Maa kaudu saadava soojusenergia hulk sõltub olulisel määral pinnase niiskusest ja koostisest ning temperatuur kõigub hooajaliselt. Seetõttu on kasutegur üldiselt mõnevõrra madalam kui vertikaalsetel süsteemidel. Savikad pinnased on madalama

soojusjuhtivusega, kuid säilitavad hästi niiskust ning võimaldavad ammutada kuni 15 W meetri kohta. Liivased ja kruusased pinnased on ülemistes kihtides sageli kuivad, mille tõttu nende soojusjuhtivus on väiksem (10 W/m), kuid veeküllastunud ja voolava põhjavee tingimustes võib saavutada ka kuni 20 W/m energiaväljundit (Soojuspumba Liit, 2024). Sellisel väliskontuuril on ka eelis, sest suvel toimub ammutatud soojuse peaaegu täielik taastumine (Soojuskeskus, 2024).

Maa-alused toruliited tuleb teostada keevisliitmikega, mis on tihedamad ja vastupidavamad kui mehaanilised liited. Erinevad väliskontuuri ringid peavad olema reguleeritavad ja eraldi suletavad, et süsteemi oleks võimalik tasakaalustada ja hooldada. Hea tava kohaselt paigaldatakse ka markerteip kontuuri kohale kraavi, et nende asukoht oleks hiljem tuvastatav.



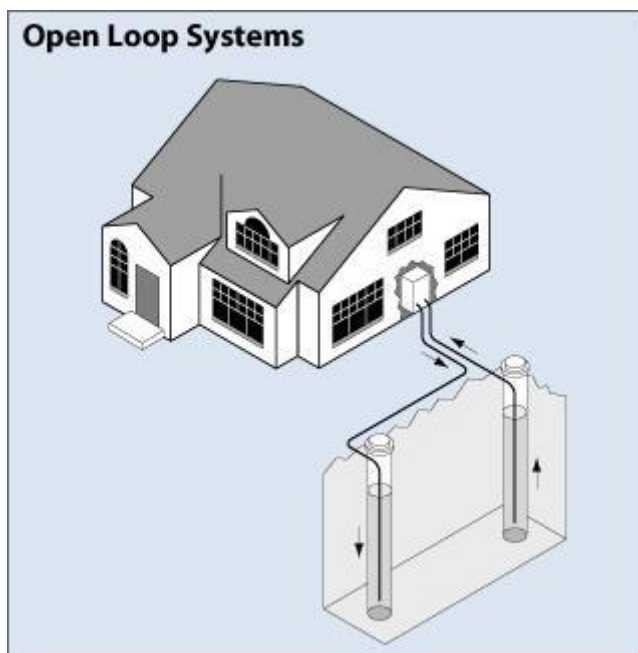
Joonis 2.2. Kinnise ringlusega horisontaalne MSS (*U.S Department of Energy*)

Avatud süsteemid

Avatud soojussüsteemid koosnevad kahest või enamast puurkaevust: sisselaske ja väljalaske puurkaevust. Süsteemi töö põhineb põhjavee ringlusel. Ühest puurkaevust pumbatakse põhjavesi soojusvahetisse, kus toimub energia ülekandumine, ja seejärel juhitakse muutunud temperatuuriga vesi teise puurkaevu kaudu samasse veekihti tagasi (Joonis 2.3). Kuna vooluring on avatud, liigub osa veest piirkondliku põhjaveevoolu mõjul süsteemist eemale.

Väiksemates ning madalama soojuskoormusega süsteemides piisab üldjuhul kahest puurkaevust. Suuremate hoonete või asutuste puhul võib osutuda vajalikuks mitme kaevupaari rajamine. Avatud süsteemides pumbatakse puuraukude kaudu suhteliselt suuri veemahte. Kui see vesi eemaldatakse põhjaveekihiest ilma tagasi juhtimiseta, väheneb põhjavee kogus märkimisväärselt. Seetõttu on oluline, et vesi suunatakse samasse veekihti tagasi. Puurkaevud peavad läbima sama põhjaveekihi sama sügavusintervalli, sest põhjavee juhtimine erinevatesse intervallidesse võib tekitada isegi kinnistu piiridest kaugemale mõjuvaid lokaalseid alandus- ja surve lehtreid (Jõelet et al., 2020). Avatud soojussüsteemide soojusvõimsus jääb vahemikku $0,33\text{--}20 \text{ MW}$ (Fleuchaus et al., 2018). Soojuse salvestamise ja ülekande potentsiaal sõltub peamiselt settekihi ning põhjavee

omadustest. Settekihi soojusjuhtivuse määrab mineraloogiline koostis, soojuse levimist mõjutavad kihistumise aste ja tihendus. Läbilaskvust mõjutab liikumisvõime ning soojuse transporditõhusus. Põhjavee omadustest kujundavad soojusmahtuvust ja ülekandefektiivsust temperatuur, soolsus ning lahustunud gaaside sisaldus (Steiger, 2023).



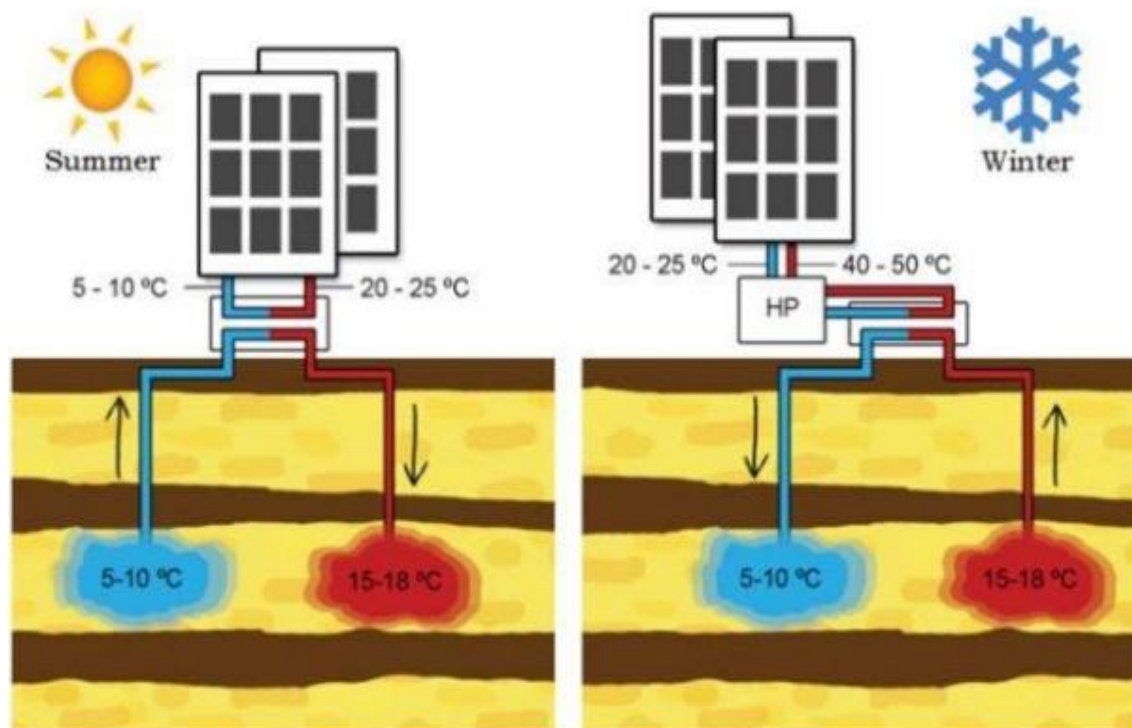
Joonis 2.3. Avatud ringlusega maasoojusenergia süsteem ehk energiakaev (*U.S Department of Energy*)

Puuraukude asendi projekteerimisel tuleb jälgida põhjavee liikumise suunda. Veevõtukaevu asukoht peaks jääma tagasivoolukaevust ülesvoolu. Reeglina järgib põhjaveetase maapinna topograafiat, võimaldades lähtuda maapinnalähedase veehorisondi puhul kohalikust reljeefist. Puurkaevude projekteerimisel peab kavandatav pumpamismaht vastama soojuspumba võimsusele. Avatud süsteemi salvestuskeskkonna moodustab põhjavesi, mistõttu on süsteemi toimimiseks vajalik piisava loodusliku põhjaveeressursi olemasolu. Tulemuslikumate puuraukude tootlikus jääb vahemikku 5-15 l/s (~430-1300 m³/ööpäevas). Kvaternaarisetetes rajatavate kaevude korral on olulised piisava paksusega kvaternaarisetted vajaliku veekoguse tagamiseks ning setete veejuhtivus peab olema väga hea (Steiger, 2023).

Avatud soojussüsteemi puurkaeve on mõistlik rajada madala rõhuga survealise süsteemi osana, sest sõltuvalt geoloogilistest tingimustest ja puurkaevu konstruktsioonist võib tagasivoolukaev aja jooksul ummistuda vees olevate saviosakeste või sealt välja sadestuvate mineraalidega.

Avatud süsteemides võetakse soojust suuremast kivimimahust kui kinnises süsteemis. Avatud süsteemis liigub vesi läbi kivimite, viies endaga kaasa soojust. Kuivõrd vee erisoojus on ligikaudu neli korda suurem kui tüüpilise mineraalse materjali oma, toimib vesi avatud süsteemis peamise soojuskandjana. Vesi ja kivim saavutavad termilise tasakaalu lokaalselt, mistõttu puuraukude vaheline temperatuur määrab süsteemi efektiivsuse (Joonis 2.4). Tagasivoolu puurkaevu ümbrusse kujuneb aja jooksul jahtunud tsoon, mille levik sõltub puurkaevude vahelisest kaugusest. Piisav vahekaugus vähendab termilise lühise riski ning tagab stabiilse vee temperatuuri. Väikestes süsteemides

(≤ 15 kW) hoiab 15–20 meetrine kaugus temperatuuri $4\text{--}5^\circ\text{C}$ tasemel, võimaldades veel $2\text{--}3^\circ\text{C}$ ulatuses jahutust ilma külmumisohuta. Lühemad vahemaad suurendavad vastastikust mõju ja hooldusvajadust, samas suuremate süsteemide (>40 kW) puhul on vajalik soojuslevi arvutuslik modelleerimine, et tagada pikaajaline töökindlus ja energiatõhusus (VDI 4640; Jõelet, 2017).

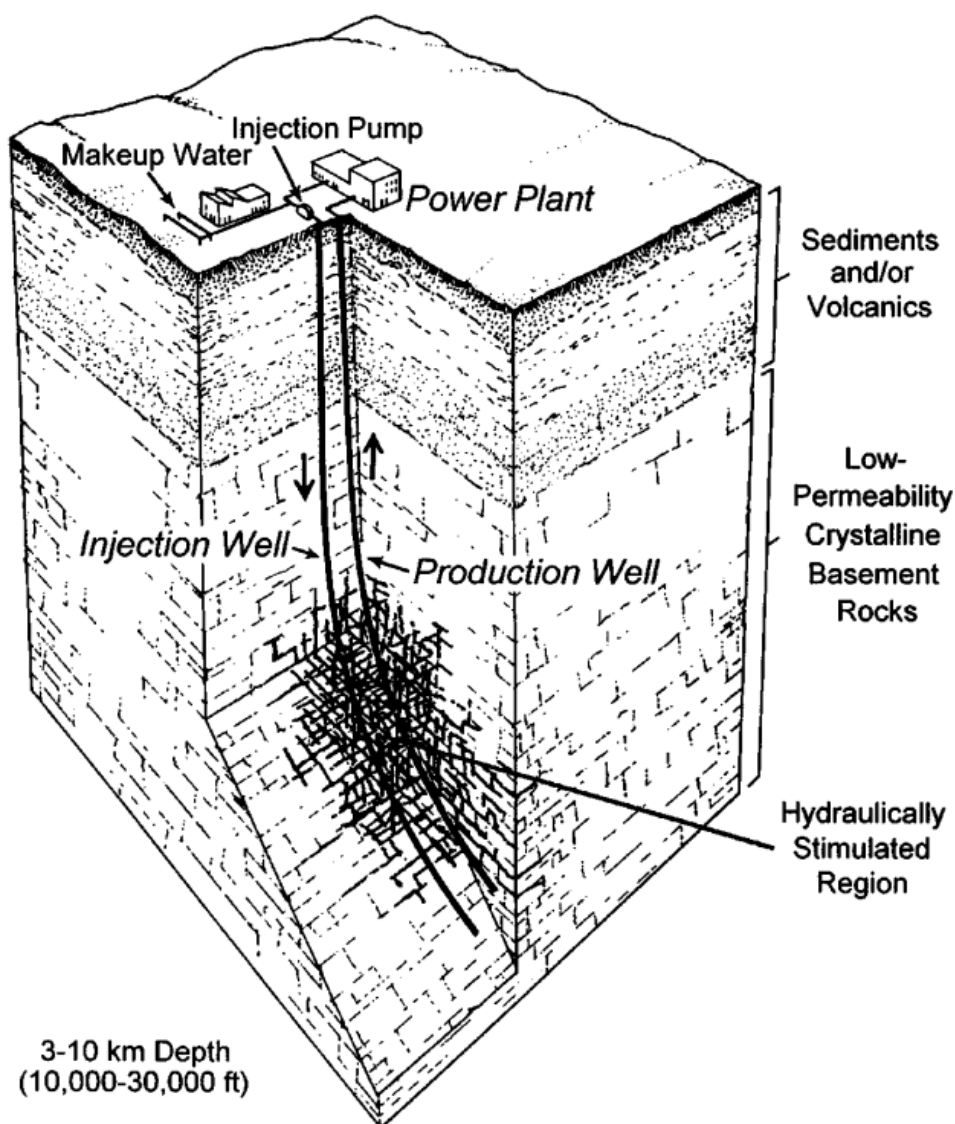


Joonis 2.4. Avatud soojussüsteemil põhinev soojusenergia hooajalise salvestamise lahendus (Bloemendal, Hartog, 2018)

Erilahendused

Lisaks kinnistele ja avatud MSS-idele on kasutusel ka poolkinnised süsteemid, mis ühendavad mõlema tüübi elemente. Need süsteemid kasutavad osaliselt suletud tsirkulatsiooni, kus soojuskandevadelik ringleb puuraugus, kuid võib osaliselt kokku puutuda pinnasega, võimaldades efektiivsemat soojusvahetust, kuid suurendades keskkonnariske nagu saastumine. Poolkinnised lahendused sobivad piirkondadesse, kus pinnase tingimused on stabiilsed ja veekaitse on tagatud, näiteks madala läbilaskvusega kivimites.

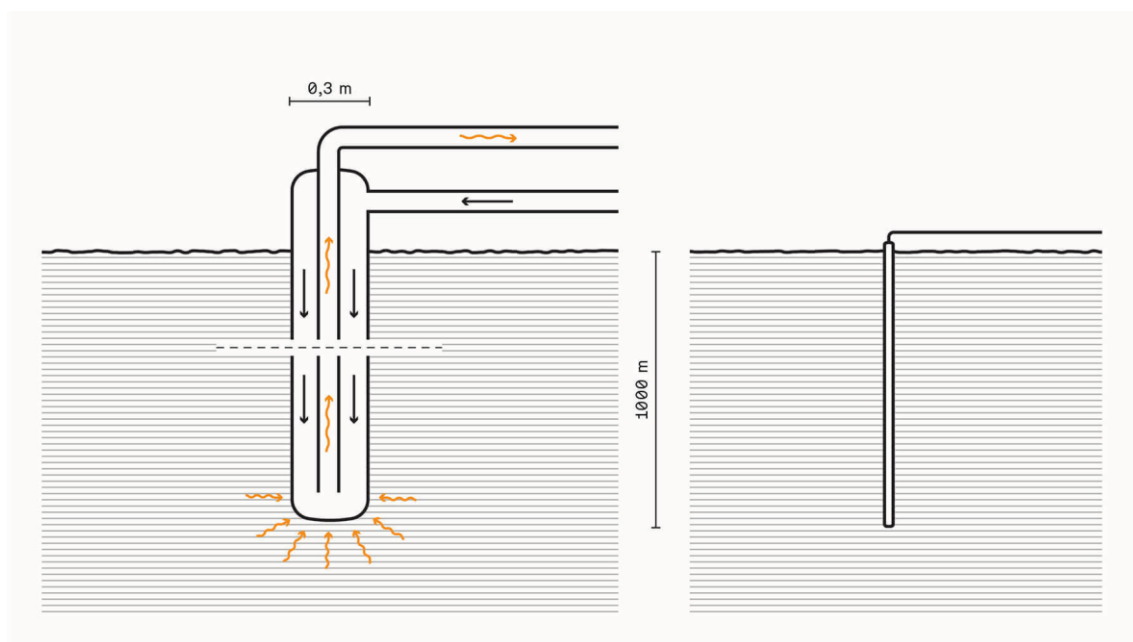
On proovitud ka kasutusele võtta keerulisemaid süsteeme näiteks *Enhanced Geothermal System (EGS)* (Joonis 2.5.) Sellisel juhul puuritakse puuraugud kuivadesse veega mitteküllastunud kivimitesse ning luuakse kunstlikud lõhed vee või muu soojuskandevadeliku pumpamise teel (nt. hüdrauline frakkimine). Soojuskandja liigub mööda ühte puuraku alla ja peaks tekitatud lõhede kaudu soojenedes teisest puuraugust soojana väljuma. EGS kasutab sügavamat maasoojusenergiat (mitmeid kilomeetreid), mis tagab kõrgema temperatuuri maapinnast ja sobib suuremahuliseks energiatootmiseks, nagu kaugküte või elektritootmine. Siiski kaasnevad riskid: maavärinate oht frakkimisel, kõrged kulud ja vajadus täpseks geoloogiliseks modelleerimiseks. Eestis EGS süsteeme rajatud ei ole.



Joonis 2.5. Kuuma kivimi kontseptsioon madala läbilaskvusega kivimites (Mock et al., 1997)

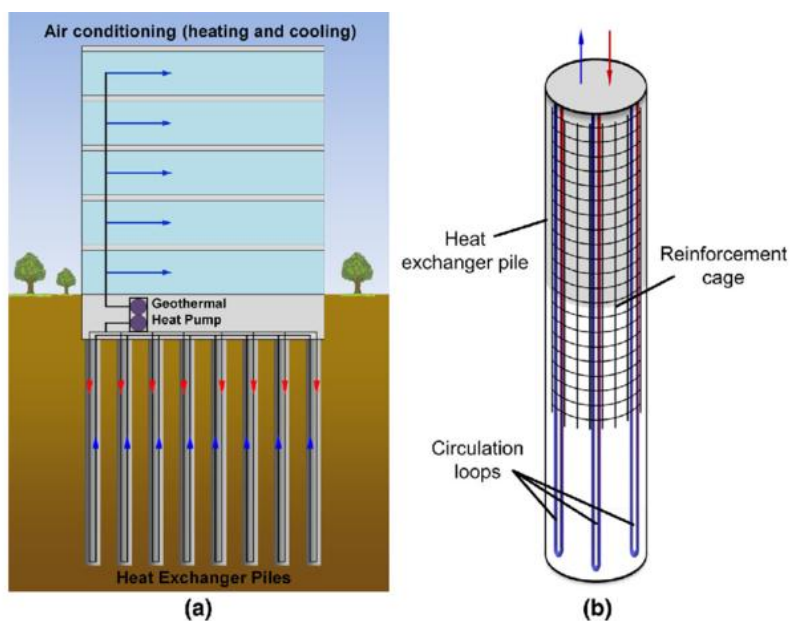
Eestis ja Soomes nimetatakse üheks perspektiivikaks erilahenduseks ühistorulist (koaksiaalset) lahendust (Joonis 2.6.), mille töötas välja Soome firma Quantitative Heat OY (QHeat). Selle eripäraks on see, et puurauk manteldatakse kuni aluskorrani või kuni aluskorra lõhevööndite lõppemiseni. Manteltoru tagune tühimik tsementeeritakse, tagades stabiilsuse ja vältides saastumist. Allpool manteltoru on puurauk lahtine, võimaldades otsest soojusvahetust aluskorra kivimitega. Puurauku paigaldatakse klaasplastist toru, mille kaudu ringleb puuraugu servadest alla pumbatud soojuskandvedelik puuraugust üles. Kuna klaasplasttoru on halb soojusjuht, siis soojusvahetus sisemise ja välimise kontuuri vahel on väga aeglane, mis minimeerib soojuskadusid transportimisel. Kuna puurauk on kristalses aluskorras avatud, siis kasutatakse soojuskandvedelikuna puhast vett, mida vajadusel lisatakse, vältides kemikaalide kasutamist. QHeat'i koaksiaalne süsteem on optimeeritud keskmise sügavusega kaevudele (500–2000 m), kus temperatuur ulatub 15–80 °C, sobides linnapiirkondadesse nagu Tallinn. Eestis on meetodit rakendatud Eesti Geoloogiateenistuse pilootprojektis GEOENEST (Geoenest), kus 712 m sügavusest puuraugust toodetakse energiat madalatemperatuurse kaugkütte ja -jahutuse võrku.

Suuremateks eelisteks on madal maapinna kasutust (vaid 1–2 m² kaevu kohta), heitmevaba tootmine ja pikk eluiga (kuni 100 aastat).



Joonis 2.6. Quantitative Heat koaksiaalse lahenduse skeem (Qheat)

Üheks eradiseisvaks erilahendusks on energiavaiad. Need täidavad nii konstruktsioonilist kui ka energiavajadust teenindavat funktsiooni. Energiavaiad on tavaliselt betoonist valmistatud vaiad, millesse on integreeritud plasttorud (nt u-kollektorid) soojuskandvedeliku tsirkulatsiooniks, mida kasutatakse peamiselt uusehitistes. Vaiadesse paigaldatava sarruse külge kinnitatava soojuskandja kaudu toimub energia ülekandmine pinnasest hoonesse (Joonis 2.7.). Vaiade mõõtmed, arv ja paigaldussügavus määratakse vastavalt hoone konstruktsioonile ja pinnase geotehnilistele omadustele.



Joonis 2.7. (a) Skeem, mis näitab hoonet, mida toetavad energiavaiad, (b) tüüpiline energiavaia konfiguratsioon integreeritud tsirkulatsiooniringidega (Olgun et al., 2015)

Energiavaiade esmaseks eesmärgiks on hoone kandevõime tagamine, mistõttu on vaiadest võetav soojushulk piiratud. Liialt madalatele temperatuuridele langemine võib põhjustada vaiade külmumist, mille tagajärjel võivad betoonkonstruktsioonides tekkida termilise pinge tõttu mikropaod või lõhed. Sellised kahjustused mõjutavad vaiade kandevõimet ning ohustavad kogu vundamendisüsteemi konstruktiivset terviklikkust. Vaiadele ehitatakse hooned eelkõige nõrkade pinnaste korral ning neid kasutatakse sageli olukorras, kus pinnase kandevõime ei võimalda madalvundamenti.

Vaiad paiknevad tihedalt piiratud alal, sügavusel 5-30 m, mistõttu ei pruugi need katta kogu hoone küttevajadust. Samas sobivad energiavaiad hästi linnakeskkonda, sest vajavad vähem ruumi kui traditsioonilised horisontaalsed või vertikaalsed maaküttesüsteemid. Samuti sobivad vaiad suurema energiatarbimisega hoonetele, nagu näiteks büroodele, haiglale ning kortermajadele, millel on pidev kütte- ja jahutusvajadus aastaringselt.

Süsteemi tõhusust suurendab see, kui osa energiast suunatakse tagasi pinnasesse või kasutatakse akumulatsioonina erinevatel ajaperioodidel. Energiavaiad ei ole üldjuhul mõeldud katma kogu hoone aastast energiavajadust, vaid pigem täiendama hoone energiasüsteemi tõhusust. Arvestades vaialuse füüsilisi piiranguid, sealhulgas piiratud mahtuvust ja soojusvõimsust on nende potentsiaal piiratud. Siiski võib ka osaline taastuenergia kasutus, näiteks kütmise või jahutamise toetamine teatud perioodidel, märkimisväärselt parandada hoone energiatõhusust ja aidata saavutada A-energiaklassi nõudeid (Di Donna & Laloui, 2015; Brandl, 2006).

3. PUURIMISMEETODID VASTAVALT SÜSTEEMILE

Vertikaalne puurimine kinniste süsteemide jaoks

Vertikaalse kinnise süsteemi puhul on peamise tähtsusega soojusülekande efektiivsus, mis sõltub geoloogilisest läbilõikest, kivimi soojusjuhtivusest ja täitematerjalist. Vastavalt Saksamaa standardile VDI 4640 on Eesti kivimites tavaline erivõimsus 50 W/m (Jõelet, 2007). Vertikaalne puurimine kinniste süsteemide jaoks on Eestis levinud meetod, kuna see sobib hästi nii tiheasustuse kui ka väiksemate kruntide tingimustesse.

Enne puurimistöödega alustamist tuleb vastavalt projektdokumentatsioonile määrata puuraugu täpne asukoht. Asukoha valikul arvestatakse nii geoloogiliste tingimustega (nt setted, settekivimid, aluskord) kui ka tehniliste ja ohutusnõuetega (hoonete kaugus, olemasolevad kommunikatsioonid, pinnavee ja põhjaveekaitse). Asukoht märgistatakse ning tööala valmistatakse ette ja paigaldatakse puurimismasin koos vajalike puurseadmetega, rajatakse juurdepääsuteed ja tööplats. Vajaduse korral kaevatakse settetiigid, kuhu kogutakse puurimise käigus tekkivad puurimislahused, vesi ja pinnas. See võimaldab vältida keskkonnareostust ja lihtsustab tööplatsi korrashoidu.

Puurimist kasutatakse erinevaid meetodeid, levinumad on:

- Topeltpöördpeaga puurimine
- Kombineeritud meetod rataspuuri ja PDC ning DTH-ga

Topeltpöördpeaga puurimise piiranguks on sügavuse piiratus. Põhjused tavaliselt toru raskus ja hõõrdumine ning pinnase surve tõttu muutub manteloru sisestamine järjest raskemaks. See on kiireim ja odavam meetod soojuspuuraukude puurimiseks. Samas kui erinevate puuride kombinatsioon muudab töö tegemise oluliselt kallimaks on see ainuvõimalik meetod sügavamate aluskorra puuraukude puurimisel.

Kombineeritud meetodi korral kasutatakse sõltuvalt kivimite omadustest ja kivisuse astmest erinevaid puure. Rataspuur või PDC-puur on sobivad moreeni puurimiseks. PDC sobib hästi pehmematesse settekivimitesse, kuid ei talu hästi väga kõvasid või tugevasti lõhelisi kivimeid. Puurimist jätkatakse kuni lubjakivi või muu aluskivimi lasundini. Kui jõutakse monoliitse lubjakivini, manteldatakse puuraugu moreeni osa terastoru või plasttoruga. Manteltoru tsementeeritakse paika alt-üles meetodil, mis tähendab, et tsementlahus pumbatakse toru ja puurseina vahele altpoolt ülespoole, kuni kogu vahe on täidetud. Pärast tsementlobri kivistumist on puurauk edasiseks tööks stabiilne. Tsemendi kivistumisel paigaldatakse uus sobilik puurseadeldis. PDC-puur sobib pehmemate kivimite puhul, kuid DTH-puur on universaalsem lahendus, mis töötab õhu või vee surve pneumaatilise haamrimehhanismiga ja võimaldab puurida kiiresti nii settekivimeid kui ka väga kõva aluskorda (nt graniit, gneiss). DTH puurimise jaoks on vajalik võimsa õhukompressori kasutamine. Topeltpöördpeaga puurimise korral kasutatakse korraga kahte pöörlevat süsteemi, kus välimine puurimise üksus surub manteltoru pinnasesse ja sisemine puurib edasi lõppsügavusse.

Kui puurauk on jõudnud projekteeritud sügavuseni, viiakse läbi puuraugu läbipesu. Sellega eemaldatakse puurauku jäänud lahtise kivi purud. Läbipesu tagab, et u-kollektorite paigaldatakse puhtasse ja vabasse puurauku. Pärast läbipesu paigaldatakse maasoojusenergia kollektor. Tavaliselt kasutatakse selleks suure tihedusega PVC toru, mis on spetsiaalselt mõeldud maasoojusenergia rakendusteks, tavaliselt diameetriga 32-50 mm. Enne paigaldamist tuleb plastiktoru ujuvuse vähendamiseks ning torustikus sisemise vasturõhu tekitamiseks täita vedelikuga. Sügavamas otsas asuva keevisliitega tagasipöörde külge saab kinnitada raskuse, võimaldades torustiku lihtsustatud

paigaldamist puurauku. Lisaraskuse kogukaal arvutatakse puuraugu sügavuse, vee staatilise taseme ning plastiku ujuvuse järgi. Koos kontuuriga lastakse alla ka tamponeerimisvoolik.

Kui torustik on paigaldatud, alustatakse tamponeerimist, sageli kasutatakse spetsiaalset soojusjuhtivat täitesegu, mis parandab soojusvahetust kivimiga. Tsement pumbatakse alt-üles meetodil, täites kogu vahe puuraugu seina ja torustiku vahel. Selle tulemusel saadakse kinnine, lekkekindel ja pikaajaliselt stabiilne vertikaalne kollektorpuurauk, mis on valmis maasoojusenergiat kasutava soojuspumba süsteemi ühendamiseks. Topeltpöördpeaga puurimisel eemaldatakse manteltoru peale kollektori paigaldamist ja tamponeerimist.

Puurimine avatud süsteemide jaoks

Avatud maasoojusenergia süsteemide rajamisel kasutatakse põhjavee otsest ringlust, mistõttu on nende ehitus ja käitamine seotud mitmete täiendavate tehniliste ja keskkonnavaluste nõuetega. Kuni filtersektsooni paigaldamiseni on puurimise tööprotsess kinnise süsteemiga sama.

Filtri paigaldamine aitab ära hoida kiviosakeste sattumist väljapumbatavasse vette, savide paisumist ning puurkaevu töötava osa varisemist. Filtreid saab liigitada materjali või filtriavade tüübi järgi. Materjaliks on sagedamini süsinikteras, galvaniseeritud ja roostevaba teras, PVC-plast ja PE-plast. Kõige tõhusamalt töötab pilufilter koos kruusafiltriga ehk puistega. Kruusa terasuurus valitakse vastavalt filtri pilude laiusele ja puurauku ümbritsevale pinnasele. Puiste vähendab vee sisendkiirust ning takistab tahkete osakeste liikumist enne kaevu jõudmist. Puiste valatakse maapinnalt filterkolonni taha, samal ajal pumbatakse vett läbi filtri puurauku selleks, et liivapuiste täidaks filtri ümbruse ühtlaselt ära. Filtri ülemine ots suletakse, et puistematerjal ei satuks filtrisse. Puiste filtrite paigaldamise eel tehakse pumpamiskatse, mille käigus hinnatakse transmissiivsust, staatilist ja dünaamilist veetaset ning vee kvaliteeti.

Kaevetööd horisontaalsüsteemide jaoks

Enne töödega alustamist määratakse vastavalt projektdokumentatsioonile kindlaks soojuskollektori täpne asukoht ja kaevikute kulg, arvestades olemasolevaid maa-aluseid kommunikatsioone, hoonete ja rajatiste paiknemist. Eelhindamise käigus analüüsitakse pinnase ja põhjavee taseme sobivust kaevetöödeks ja torustiku paigaldamiseks. Süsteemi efektiivsuse määravad pinnase koostis, piisav soojusmahtuvus, soojusjuhtivus, niiskusesisaldus ja külmumissügavus.

Tööala ettevalmistus hõlmab kivide, kändude ja tiheda taimestiku eemaldamist ning vajadusel drenaaži rajamist. Kaevikute sügavus on üldjuhul 1,2-1,8 meetrit ning sõltub külmumispiirist. Kollektor peab jääma külmumispiirist allapoole, et tagada stabiilne töö ka kõige madalamate välistemperatuuride tingimustes. Laius oleneb torustiku paigutuse tüübist (sirge, spiraal, kahe- või mitme realine).

Kaevetööde ajaks tõstetakse pinnas ekskavaatoriga kaeviku kõrvale või transporditakse mujale. Teravatest kividest ning ebatasasustest tingitud kahjustuste vältimiseks paigaldatakse torud kaeviku põhja liivapadjale või muule siledale pinnasekihile. Kollektortorustik laotakse sirgelt või keeratakse spiraaliks. Seejärel torud ühendatakse ning veendumaks torusiku lekkekindluses sooritatakse enne tagasitäidet rõhutest. Seejärel torud kaetakse esmalt liiva või peene pinnasekihiga, et kaitsta neid mehhaaniliste

kahjustuste eest. Edasi täidetakse kaevik ülejäänud väljakaevatud pinnasega kihiti tihendades, et vältida pinnase hilisemat vajumist ja soojuskollektori võimalikke deformatsioone. Kogu protsessi vältel tuleb tagada, et torustik jääb projekteeritud sügavusele, kaevikute kulg järgib planeeritud geomeetriat ning pinnase taastamine jätkaks võimalikult vähe visuaalseid ja ökoloogilisi häiringuid.

Energiavaiade puurimine ja integreerimine

Energiavaiadele ehitatakse hooned eelkõige nõrkade pinnasekihtide korral. Vaiade puurimisel kasutatavad spetsiaalsed masinad suudavad saavutada 20–100 cm läbimõõdu ning 5-30 meetrise sügavuse, puurimis tööriistaks on tigupuur. Kuigi soojuspuuraukude rajamisel kasutatavad tavapärased puurimismasinad võimaldavad puurida oluliselt sügavamale, piiravad mehaanilised omadused läbimõõdu 10–35 cm vahemikku (Jõelet et al., 2020). Energiavaiade rajamisel on vajalik valida sobiv vaia konfiguratsioon vastavalt geotehnilistele ja konstruktiivsetele tingimustele. Kõige sagedamini rakendatakse u-kujulist torustikku, suurema soojusülekandepinna saavutamiseks kasutatakse spiraal- või keerdtorustikke.

Kui üldjuhul toimub väliskontuuri paigaldamine MSS-ides eraldiseiseva protsessina, siis vaiade puhul on väliskontuur juba eelnevalt liidetud aukudesse paigaldatava terasarmatuuri külge, tagades torude jäiga kinnituse ning vähendades mehhaaniliste kahjustuste riski. Betoneerimine piirab vee vertikaalset liikumist, tagab vaiade kandevõime ning soodustab soojuse ülekandumist kontuuri ja pinnase vahel. Torustike ülemised otsad juhitakse maapinnale ning ühendatakse hoone kütte- ja jahutussüsteemi ning maasoojusenergia soojuspumbaga (Jõelet et al., 2020).

4. PAIGALDUSPROTSESS

Kinnise süsteemi u-kollektori ja muude elementide paigaldamine

Soojuspuuraugu diameeter peab olema projekteeritud selliselt, et soojuskandevadeliku väliskontuuri ja puuraugu sein vahele jääks vähemalt mõnesentimeetrine ruum täitematerjali paigaldamiseks. Suurema efektiivsuse saavutamiseks võib U-kujulise alla mineva ja üles tuleva toru teineteisest klambritega eraldada. Juhul kui puuraugu rajamise käigus tekivad vastuolud torude paigalduse, täitematerjali või veepidavuse nõuete osas, võib projektis nõuda metallist manteltoru jätmist kogu puuraugu sügavuses (Maves, 2012).

Allalastava toru kokkupuude manteltoru või puuraugu seinaga võib vigastada sisemist kontuuri. Kahjustuse tagajärjel ei pea kontuur enam rõhku ning ei läbi survetesti. Samuti tuleb jälgida raskuste paigaldust, kuid kaaluga ei ole vaja tagasi hoida. Tihtipeale rakendatakse toru alla laskmisel liiga väikest raskust ning puuraugus olev vesi ei ole kõige puhtam, põhjustades toru ujuvust.

Torude korrektne paigaldus tagab süsteemi tasakaalu ning voolukiiruse. Paigaldustööd tuleb teha vastavalt projekteeritud skeemile. Liikumise vältimiseks fikseeritakse torude ühendused enne täitematerjali lisamist. Torustiku paigaldamisel tuleb järgida projekti järgset paigalduse tolerantsi ± 5 cm, et tagada ühtlane soojusvahetus ning hoiduda kattuvuse või külmasilla tekkest.

Täitematerjalide ja tihenduse roll

Täitematerjal peab tagama soojusülekanne torustiku ja ümbritseva pinnase vahel ning takistama põhjaveekihtide segunemist. Soojusülekanne tõhustamiseks kasutatakse sageli terminiselt täiustatud bentoniitsegusid ($\geq 1,5$ W/mK), mõnel juhul ka spetsiaalseid geopolümeerseid täitematerjale. Traditsiooniliselt on täitematerjalina kasutatud hea paisumisvõime ja madala hüdraulilise juhtivusega bentoniidipõhiseid segusid.

Täitmise kvaliteet mõjutab suurel määral kogu MSS-i töökindlust. Ebaõnnestunud täitmise tagajärjel võivad tekkida õhutaskud või manteltoru poolik tsementeerimine. Defektid kujunevad siis, kui ei järgita alt- üles täitmise põhimõtet, täitematerjali ei suruta puurauku piisava survega või täitmisprotsess kulgeb liiga aeglaselt, mille tulemusel hakkab täitesegu enneaegselt tahkuma. Sellisel juhul on väliskontuur avatud välistele mõjuteguritele ning manteltoru taguse mittetäitmine võib põhjustada pinnavee sattumist põhjavette.

Maasoojusenergia puuraugu täitematerjal täidab mitut kriitilist funktsiooni. Täitematerjal peab tagama tõhusa soojusülekanne torustiku ja ümbritseva pinnase vahel ning toimima hüdroteoloogilise barjäärina, takistades põhjaveekihtide omavahelist segunemist.

Katsed ja süsteemi käikulaskmine

Ehitusseadustiku § 35 lõike 6, § 43 lõike 5, § 47 lõike 7 ja § 126 lõike 6 alusel kehtestatud keskkonnaministri 09.07.2015 määrusest nr 43 § 21 tuleb nõue katsetada kinnist soojussüsteemi maasoojustorustiku surveprooviga. Survekatse tuleb läbi viia enne maasoojustorustiku paigaldamist puurauku, et veenduda torustiku hermeetilisuses (RT I, 14.07.2015, 1).

Torustike elektrilise ja termilise isolatsiooni nõuetele vastavust tuleb eraldi kontrollida. Eelkõige on määrava tähendusega süsteemi liitumiskohad hoonega, põhjustades seal ebaõige isolatsiooni tagajärjel soojuskadu ja kondensatsiooni. Vajadusel lisatakse torustikele täiendav isolatsioon või läbiviik, et tagada veetihedad ühenduskohad ning vähendada külmasildade teket.

Lisaks survekatsele viiakse läbi voolukiiruse mõõtmine ning jälgitakse rõhulangust terves kontuuris. Algandmete dokumenteerimine käikulaskmisel võimaldab hilisemat järelevalvet ja energiatõhususe hindamist. Torustiku tsirkulatsiooni voolukiiruse mõõtmise teel kontrollitakse soojuspumba ja süsteemi vahelist vedeliku voolu hulka. Piisav voolukiirus tagab nominaalse soojusvahetuse. Voolukiirus mõjutab otseselt küttehooaja keskmise soojusteguri väärtust ja süsteemi töökindlust.

Kui süsteemis on mitu kontuuri, tuleb läbi viia hüdrauliline tasakaalustamine, et tagada kõigis kontuurides võrdne vooluhulk. Tasakaalustamata kontuurid võivad põhjustada ebaühtlast koormust ja süsteemi efektiivsuse langust.

5. TÖÖDEGA SEOTUD RISKID JA OHUD

Geoloogilised riskid

Eestis on puuraukude kokkuvarisemisoht seotud kvaternaari lõhedega sette kivimite, peamiselt suure poorsusega liiva- ja kruusakihtides. Ebastabiilsetes setetes soodustab pinnaseosakeste omavaheline madal sidusus osakeste liikumist. Puurimisega kaasnev vibratsioon ning vee sissevool võivad pinnase struktuuri oluliselt nõrgestada ning põhjustada seinte varisemist. Kui puursegu omadused ei sobi geoloogiliste tingimustega, võib segu tsirkuleerimine põhjustada puuraugu seinte nõrgenemist ja ava laienemist. Seinte stabiilsuse tagamiseks kasutatakse stabiliseerivat puursegu või paigaldatakse manteloru, mis toetab puuraugu seina ning mille seest saab edasi puurida.

Vee- ja keskkonnariskid

Kui MSS rajatakse reostunud pinnase kohale, võivad puurtööd ning kaevetööd ja seejärel tehtav tagasitäide suurendada riski, et sademevesi kannab pinnases leiduvad reoained sügavamale. Kui tagasitäide on võrreldes algse pinnasega vett paremini juhtiv, võib sademevesi kanda reostust kiiremini sügavamatesse kihtidesse. Samuti suureneb reostuse leviku oht, kui torustik paigaldatakse tagasitäite kihile, mis juhib vett kergesti. Seetõttu ei ole soovitatav rajada MSS-e reostunud pinnasega aladele enne, kui pinnase seisund on viidud vastavusse kehtivate keskkonnanõuetega.

Põhjaveekihtide reostumine maapinnalt lähtuva reostuse tõttu võib eelkõige toimuda puurimisel kasutatava masina hüdraulika õlide ja diislikütuse lekkimisel maapinda või selle imbumisel põhjavette piki mittevettpidavalt paigaldatud manteloru. Soojuskandevedeliku lekkimise tõenäosus on võimalik horisontaalsete maaküttesüsteemide kollektortorustikust, mille vigastamine võib tavaliselt leida aset kaevamistöode käigus.

Tehnilised ja paigaldusriskid

Vajadusel tuleb enne puurpingi paigutamist tööplatsile teostada aluspinna tasandamine. Puurpingi hüdraulilised tugijalad ei taga seadme püsivat loodimist, kui tööpind paikneb suurel kaldel. Töö käigus võib tekkida olukord, kus puurtööriist kiilub kinni ningööriista väljatõmbamiseks tuleb rakendada jõudu. Sellisel juhul kandub tööpingile märkimisväärne surve, mille tulemusel avaldub aluspinnale koormus. Tasandamata pinnal võib puurpink surve toimel nihkuda. Nihkumine sunnib seadet uuesti puuraugu suhtes tsentreerima ja loodima, vähendades töö efektiivsust ning soodustades protsessi katkemist.

Vee või õhuga puurimisel võib põhjavesi sattuda lähedal asuvate hoonete keldrikorrusele. Kui puuraugu staatiline veetase puudub, on puurimisel võimalik küllastada puurlahusega ümbritsev pinnas. Sarnaselt võib suruõhu kasutamine puurimisel survestada põhjavee liikumist lõhede kaudu. Vee sattumine keldritesse võib olla ajutine nähtus puurimistööde ajal või vahetult pärast töid, kuid lõhelise kivimi ning kõrge põhjavee survetaseme korral võib probleem osutuda püsivaks.

Samuti on oluline kommunikatsioonide ja torustike kahjustamise risk. Suur osa olemasolevast tehnovõrgust on rajatud Nõukogude perioodil ning täpsed asukohad ei pruugi olla dokumenteeritud või usaldusväärselt kaardistatud. Seetõttu võib kaabel

paikneda kavandatust mitme meetri võrra erinevas kohas ning puurimistöö käigus on võimalik seda kahjustada. Sama risk kehtib ka torustike puhul.

Järelevalve

Vastavalt ehitusseadustiku § 20 lg 1 ning majandus- ja taristuministri 02.07.2015 määrusele “Omaniku järelevalve tegemise kord” on puuraukude rajamisel ja ehitamisel omaniku ülesandeks ehitamise üle asjatundliku järelevalve teostamine ehk omanikujärelevalve. Omaniku järelevalvet võib omaniku asemel teha ka vastava kvalifikatsiooniga isik. Sõltumatuse ja erapooletuse tagamiseks ei või majandustegevuse raames tegutsev omanikujärelevalve tegija olla sama ehitise ehitaja ega olla seotud nende isikutega, kelle tegevuse üle ta järelevalvet teostab (RT I, 05.03.2015, 1).

Puuraugu rajamisel tehakse omanikujärelevalvet samadel alustel nagu teiste ehitiste puhul, kuid arvestades puurimistööde ja maa-aluse konstruktsiooni eripära, keskendub järelevalve konkreetsetele tehnilistele ja keskkonnavalastele aspektidele. Puuraukude rajamisel algab omanikujärelevalve juba enne puurimistööde alustamist, hõlmates põhjalikku dokumentatsiooni ja ehitusprojekti kontrolli. Omanikujärelevalve tegija ülesandeks ei ole ehitusprojekti esitatud arhitektuurilise või tehnilise lahenduse sobilikkuse hindamine, kuid siiski kuulub tema pädevusse ehitustööde käigus kontrollida, kas tehnilised lahendused nagu näiteks manteltorude paigaldus, tihendustööde teostus või põhjaveekihtide isoleerimine viiakse ellu vastavalt projektile, normidele ja töö kvaliteedinõuetele. Vajadusel võib omanikujärelevalve tegija teha ettepanekuid projektis esitatud lahenduste muutmiseks ja täiendavate mõõtmiste, katsetuste ja ekspertiiside tegemiseks. Lisaks hinnatakse ka puuraugu püsivalt paigaldatud ehitustoote ja -materjali dokumentatsiooni ja selle nõuetele vastavust ning kontrollitakse töövõtjate tööohutuse tagamist. Omanikujärelevalve tegija kontrollib, et puurplats ja selle ümbrus oleksid korras ning ohutud, tagades nii teiste inimeste turvalisuse kui ka keskkonnanõuete täitmise kogu ehitamise vältel. Kui puurimistööd on lõpetatud, jätkub järelevalve tööde vastuvõtuga. Samuti tuleb üle vaadata kogu teostatud tööde dokumentatsioon: puurimistööde päevik, kasutatud materjalide ja seadmete andmed, kaetud tööde aktid, teostusjoonised ja muud asjakohased dokumendid. Omanikujärelevalvet tehakse vähemalt ehitise kasutusteatises esitamiseni või kuni kasutusloa saamiseni (RT I, 03.07.2015, 27).

Puuraugu rajamise järel annab puurimistööde teostaja omanikule üle vastava hooldusjuhendi, mis sisaldab juhiseid süsteemi igapäevaseks kasutamiseks ning teavet hooldus- ja korrashoiuprotseduuride kohta. Iga hooldustoimingu juurde on lisatud soovituslik ajavahemik selle teostamiseks. Kui puuraugus tehakse muudatusi, tuleb hooldusjuhendit vajaduse korral muuta. Puuraugu hooldusjuhendi eesmärk on tagada, et puurauku saab kogu kasutusea jooksul ohutult, sihipäraselt ja säästlikult kasutada. Hooldusjuhendis kajastuvad ka olulised kasutuspiirangud, juhised potentsiaalsete avariilukordade ja nende lahendamise kohta, suunised vee- ja energiatarbimise jälgimiseks ning soovitusel energiakulu optimeerimiseks (RT I, 18.02.2020, 9).

6. ÜLEVAADE MAASOOJUSSÜSTEEMIDE RAJAMIST REGULEERIVAST SEADUSANDLUSEST MEIL JA MUJAL

Maasoojussüsteemide seadusandlus Eestis

Puurkaevude ja puuraukude rajamist Eestis käsitletakse:

- Ehitusseadustikus (§122–129)
<https://www.riigiteataja.ee/akt/108072025039?leiaKehtiv>
- Veeseaduses <https://www.riigiteataja.ee/akt/108072025070?leiaKehtiv>
- Keskkonnaministri määruses nr. 43 (09.07.2015) "Nõuded salvkaevu konstruktsiooni, puurkaevu või -augu ehitusprojekti ja konstruktsiooni ning lammutamise ja ümberehitamise ehitusprojekti kohta, puurkaevu või -augu projekteerimise, rajamise, kasutusele võtmise, ümberehitamise, lammutamise ja konserveerimise korra ning puurkaevu või -augu asukoha kooskõlastamise, ehitusloa ja kasutusloa taotluste, ehitus- või kasutusteate, puurimispäeviku, salvkaevu ehitus- või kasutusteate, puurkaevu või -augu ja salvkaevu andmete keskkonnaregistrisse kandmiseks esitamise ning puurkaevu või -augu ja salvkaevu lammutamise teate vormid". <https://www.riigiteataja.ee/akt/127062022013?leiaKehtiv>

Need kolm alusdokumenti on põhjalikult refereeritud 2020. aastal SA Keskkonnainvesteeringute Keskuse tellimusel koostatud ülevaates "Maasoojussüsteemide rajamisega seotud seadusandlik regulatsioon ja selle muutmise vajadus" (Jõeleht et al., 2020). Lisaks on Eestis soovituslik puuraukude projekteerimisel ja ehitamisel kasutada ka EVS-EN 17522:2023 „Täidetud soojuspuuraukude projekteerimine ja ehitus“ antud soovitusi. Keskkonnaministri määrus on hetkel muutmisel, kuid muudatused puudutavad valdavalt puurkaevude rajamise tingimusi.

Maasoojussüsteemide reeglistik Soomes

Alates 2011. aastast nõuab Soome maakasutuse ja ehituse alane seadus (*Rakennuslaki 751/2023, Soome*), et majaanik taotleb ehitusluba (*rakentamislupa*) enne maasoojuskollektori ehitamist. Vastav õigusakt sätestab, et kohalik omavalitsus võib mitte nõuda luba kui vastava maasoojuskollektori rajamist peetakse vähetähtsaks ning sellisel juhul võib piirduda vaid teate esitamisega (Majuri, 2016). Juhul kui MSS-i soovitakse rajada määratletud põhjavee alale, siis vastavalt Veeseadusele (*Vesilaki 587/2017, Soome*), tuleb taotleda täiendavat luba. Soome Keskkonnakaitseadus (*Ympäristönsuojelulaki 527/2014, Soome*) keelab põhjavee reostuse, kuid vastavad selgitavad määrused puuduvad (sh veetemperatuuri muutuste määrad ja piirväärtused). Täiendav luba on vajalik ka soojuspumba paigaldamisel, eeskätt paigaldamisega seotud elektritööde tegemiseks (<https://poratek.fi/fi/vesikaivot/normiporakaivon-kriteerit/#more-343>). Lõuna-Soome erinevates omavalitsustes varieerub soojuspuuraugu piirkauguse nõue kinnistu piirist 4 – 50 m vahel (Nordic GeoEnergy 2020).

Ehkki Soomes ei esitata kvalifikatsiooninõudeid puuraukude ja puurkaevude puurimisel, viib Poratek (Soome Puurijate Selts) 2015. aastast läbi puurijate kutsekoolitust. Olemasolevaid soojuspuuraukude rajamise juhiseid "*Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa*" (Juvonen ja Lapinlampi, 2013) ning "Normienergiakaivo - 17" standardiseerimisjuhust peetakse Soomes piisavaks alusmaterjaliks maaküttesüsteemide rajamisel.

Maasoojussüsteemide reeglistik Rootsisis

Ehkki soojuspuurauke ja -kaeve on Rootsisis rajatud juba 1970ndatest aastatest, käsitlevad ja reguleerivad seda valdkonda vaid vähesed seadused ja regulatsioonid. Peamiselt on maasoojuse kasutust käsitletud looduskeskonna ja ehitustegevuse valdkondi käsitlevates seadustes ning kohalike omavalitsuste poolt kehtestatud regulatsioonides. Rootsi keskkonna- ja tervisekaitseadus (*Miljö- och hälsoskyddslagen, SFS:1998:899, Rootsi*) sedastab, et nii kinnise kui ka avatud süsteemiga soojuspuuraukude rajamise taotlused tuleb eelnevalt registreerida kohalikus keskkonnaametis. Juhul kui puurkaevude baasil rajatud avatud soojussüsteemis ei toimu põhjavee tarbimist (soojusvahetit läbinud jahedam vesi suunatakse tagasi samasse veekihti), siis Rootsi Keskkonnaseadus (*Miljöbalken, MB, SFS 1998:808, Rootsi*) ei nõua põhjaveeloa taotlemist avatud soojussüsteemi ehitamiseks ühe- ja kaheperekonna elamute tarbeks. Eraldi regulatsioonid kehtivad Rootsisis põhjavee kaitse aladel, kus Rootsi Keskkonnakaitseagentuur (*Naturvårdsverket*) võib keelata põhja- ja pinnavee kasutuse maasoojuse ammutamiseks ning puuraukude rajamise. Samas võidakse ka luba anda, kuid koos täiendavate nõuetega puuraukude õõnte tagasitäitmise ning maaküttesüsteemide hilisema monitooringu osas.

Puurimisfirmad peavad Rootsisis alates 1976. aastast registreerima kõik puuritud puurkaevud ja puuraugud Rootsi Geoloogiateenistuse (theraö) hallatavas avalikus Puurkaevude Andmebaasis (<https://apps.sgu.se/kartvisare/kartvisare-brunnar.html>). Kohalikud omavalitsused ja regionaalsed keskkonnateenistused võivad väljastada kohalikke ettekirjutusi põhjavee ja tervise kaitse osas. Tavaliselt määratlevad need soojuspuuraukude täitematerjaliga täitmise tingimusi ning puurimisel tekkiva puurhiiva käsitlemist. Rootsisis on SGU poolt puuraukude puurimiseks väljatöötatud „Normbrunn - 16“ juhend (Normbrunn - 16).

Lisaks annab Normbrunn - 16 soovitusel kollektorites kasutatavate soojuskandevedelike osas ning soovitusliku vahekauguse rajatava puuraugu naaberkinnistutele jääva puuraugu vahel. Esitatud on ka soovitusel vertikaalsete soojuskollektorite materjali ja konstruktsiooni osas. U-kollektoreid tootvad firmad peavad olema sertifitseeritud. Rootsi ei aktsepteeri „*Geothermal testing*“ EN ISO 17628:2015 rahvusvahelist standardit, vaid kasutab Rootsi Geoenergia Keskuse (Svenskt Geoenergicentrum; Gehlin, 2015) poolt väljatöötatud juhendit, mis annab ettekirjutuse MSS-ide dimensioneerimiseks vajaliku *Thermal Response Test* läbiviimiseks koos kasutatavate seadmete kirjelduse, tulemuste analüüsi ja aruandluse vormistamise osas. Hoonete kütmiseks ja jahutamiseks rajatavate (*Borehole Thermal Energy Storage; BTES*) süsteemide kavandamisel Rootsisis võetakse aluseks, et see kütteviis kataks 100 % ühepereelamute kütte- ja jahutusvajadusest. Suuremate hoonete puhul peaks BTES katma vähemalt 60 – 80 % hoone kütmise tippkoormusest ning 100 % jahutusvajadusest.

Puurimisettevõtete Liitu *Borrforetagen*, (<https://borrforetagen.se>) kajastab mitmeid puuragregaatide kasutamist ja puurimistööde läbiviimist käsitlevaid ohutusjuhendeid (<https://borrforetagen.se/trycksaker>) oma kodulehel. Suuremate MSS-ide rajamisel on nõutav, et kollektortorustiku ühendamisel peavad keevitustööd olema teostatud sertifitseeritud keevitaja poolt. Ebakvaliteetseid keevitustöid aitavad välja selgitada MSS-i lekketestid. Arteesiavee esinemisaladel nõutakse Rootsisis tavaliselt puuraugu õõne täitmist pärast U-kollektori paigaldamist, et vältida võimalikku ülevoolu puuraukudest ning madalamate alade üle ujutamist.

Peamised keskkonda mõjutavad probleemid MSS-ide rajamisel Rootsisis on seotud põhjavee reostumisvõimalustega. Sellega seoses antakse põhjaveekaitse aladel

puuraukude rajamiseks lube vaid tingimusel, et valminud MSS-id ei kujuta endast ohtu põhjavee kvaliteedile.

Maasoojussüsteemide reeglistik Taanis

Taanis kasutatakse MSS-ide kohta terminit *jordvarme* ning need on defineeritud kui süsteemid, mis töötavad kuni 250 meetri sügavusel.

Rakendatav seadus on *Bekendtgørelse om jordvarmeanlæg*, mis reguleerib puurimist, rajamist ja järelevalvet. Kõik lubade andmised ja kontrollid on omavalitsuste pädevuses. Sügavamate süsteemide puhul (250–3000 m) rakendub *Miljøvurderingsloven*, mille menetleb *Energistyrelsen* (Taani Energiaamet).

Määruse *Jordvarmeanlæg* (Maaküttesüsteemide määrus) paragrahv §14.4 sätestab, et puuraugu soojusvaheti torude ja puuraugu seina vaheline ruum peab olema täielikult täidetud ja tihendatud. Paragrahv §10 täpsustab, et puurimistööd tuleb korraldada ja läbi viia nii, et põhjavee saastumise oht oleks välistatud. Pärast eemaldatava torustiku väljatõmbamist paigaldatakse maaküttesüsteemi soojusvaheti, ning puurauk tuleb täita veekindla materjaliga. Puuduvad riiklikud juhised või protokollid tagasitäitmise meetodite ja/või täitematerjalide kohta, kuid kasutatakse VDI standardeid 4640 1–4. Omavalitsus võib nõuda puuraugu täielikku täitmist tagasitäitematerjaliga. Tavapraktikas kasutatakse eelnevalt segatud tööstuslikke tagasitäitematerjale, nagu näiteks *Dantonit Thermal C2L*, mille soojusjuhtivus kahe nädala möödudes on 2,1 W/mK. Sama määrus sätestab temperatuurinõuded süsteemidele. Avatud süsteemides võib see olla 2–25 °C ning kinnistes süsteemides: alates 0 °C, ajutiselt kuni –4 °C, maksimaalne puudub. Soojuskandevedelikud peavad olema biolagunevad ja keskkonnasõbralikud.

Eripiirkondades, kus kaitstakse joogivett, on kinnise tsükliga maaküttesüsteemi paigaldamiseks vajalik omavalitsuse kooskõlastus. Määruses on süsteemi paigalduskoha kohta sätestatud järgmised nõuded (§9.2 ja §9.3): süsteem peab paiknema vähemalt 300 meetri kaugusel avalikust või mitteavalikust veevõtukohast ning vähemalt 50 meetri kaugusel teisest süsteemist. Erandina võib süsteemi paigaldada vähemalt 50 m kaugusele mitteavalikust veevõtukohast ainult siis, kui kasutatav soojuskandevedelik vastab §15.1 ja 15.2 nõuetele. §15.1 ja 15.2 nõuetele vastavad etanool või IPA alkohol (etanool, mis on denatureeritud 10% isopropanooliga), propüleenglükool ilma roostevastaste lisaainete või muude lisanditeta, etüleenglükool või propüleenglükool, kui eelnevalt on täielikult deklareeritud kõik roostevastased ja muud lisandid valmissegatud külmumisvastases vedelikus. Kohalik omavalitsus võib lubada ka muude ainete kasutamist, kui taotleja suudab tõendada, et aine ei moodusta tervist kahjustavaid ega raskesti lagunevaid vaheprodukte, ei aeroobsetes ega anaeroobsetes tingimustes, ning on samavõrd kergesti lagunev pinnases ja põhjavees ega ole toksilisem inimestele ja keskkonnale kui eelnevalt loetletud antifriisid

Taani Keskkonnakaitseagentuur on lisanud järgmised juhised lisaainete kasutamiseks:

- Lubatud: Mostanol (70 % etanool ja 30 % isopropanool)
- Lubatud: Etüülheksaanhape (ethylhexansyre), sarnane etanoolile
- Lubatud: Naatrium-2-etüülheksanoaat (Natrium-2-ethylhexanoat), sarnane etanoolile
- Lubatud: NaOH, sarnane etanoolile
- Mitte lubatud ja tugevalt toksiline: Tolüültriasool (Tolyltriazol)

Omavalitsus võib taotluse alusel anda leevendusi, näiteks lubada MSS-i paigaldamist kuni 5 m kaugusele mitteavalikust veevõtukohast, juhul kui tegemist on üksnes selle

kinnistu veega varustamisega. Samuti võib omavalitsus karmistada kaugusenõudeid või kehtestada eritingimusi süsteemi paigutusele, kui see on vajalik veevõtu saastumise vältimiseks.

Maasoojussüsteemide reeglistik Hollandis

Hollandis kuuluvad MSS-id üldmõiste „*bodemenergiesystemen*“ alla. Süsteemide maksimaalne töösügavus on tavaliselt kuni 500 meetrit. Sügavamad projektid liigitatakse maasoojusenergia alla ning käsitletakse Hollandi Kaevandusseaduse (*Mijnbouwwet, Holland*) alusel.

Seaduslik alus madalsügavuse süsteemidele on Hollandi keskkonna- ja ehitusseadus, mis reguleerib ka MSS-ide paigaldust (*Omgevingswet, Holland*), mis reguleerib projekteerimist, keskkonnakaitset ja loa-/registreerimismenetlusi. Kinnised süsteemid ei vaja ehitusluba, vaid tuleb registreerida riiklikus BRO (*Basis Registratie Ondergrond*) andmebaasis. Avatud süsteemid vajavad luba provintsitasandil.

Hollandis on tugev rõhuasetus põhjaveekaitsele. Regulatsioonid määravad minimaalsed kaugused joogiveekaevudest (tuntud kui „*beschermingszone*“ või kaitseala), puuraukude tamponeerimise bentoniidi või tsemendiseguga, et säilitada veekindlad kihid. Lubatud temperatuurivahemikud avatud süsteemides on 2–25 °C ja kinnistes süsteemides – 3 kuni 30 °C. Soojuskandevadeliigid peavad olema mittetoksilised ja biolagunevad (näiteks propüleenglükool, etanool, IPA). Suuremahuliste avatud süsteemide puhul on kohustuslik hüdroloogiline ja termiline modelleerimine, et hinnata mõju põhjaveele ja teistele süsteemidele. Süsteemide puhul, mille soojusvõimsus on alla 70 kW, piisab ainult registreerimisest omavalitsuses. Süsteemide puhul, mille võimsus on üle 70 kW, on vaja läbida piiratud keskkonnamõjuga lubade menetlus.

Siiski on olemas keelualad, kus selliste süsteemide paigaldamine pole lubatud, ning teised piirangutega alad, kus iga juhtumit tuleb hinnata eraldi. Kinnise tsirkulatsiooniga süsteemide puhul teeb seda omavalitsus, avatud tsirkulatsiooniga süsteemide puhul aga provintsivalitsus ning samal ajal tuleb taotleda ka keskkonnamõjude luba.

Maasoojussüsteemide reeglistik Suurbritannias

Inglismaa ja Wales

Suletud süsteemidele üldiselt luba ei nõuta, kuid keskkonnaamet võib keelata tegevuse, kui on oht reostusele. Kui suletud süsteem võib lekkida (nt antifriis põhjaveekihti), võib amet väljastada keelustamisteate. Kui suletud süsteemi torustik rajatakse jõkke või selle lähedale võib vaja minna *Flood Defence Consent* vastavalt veeseadusele ja *Main River byelaws*’ile. Puurkaevude rajamisel rohkem kui 15 m sügavusele tuleb teavitada Briti Geoloogiateenistust vastavalt veeseadusele (*Water Resources Act*, Suurbritannia).

Avatud süsteemid vajavad lubasid. Enne puurimist ja katsepumpamist on vaja luba. Vee kasutamise litsents, kui kasutatakse vett rohkem kui 20 m³ ööpäevas. Keskkonnaluba on vajalik vee tagasi juhtimiseks põhjavette või pinnavette. Keskkonnaseaduse alusel on vee tagasivoolu ja väljalaske temperatuurile on kehtestatud piirid: max +10 °C tõus või mitte üle 25 °C. Juhul kui kasutatakse saastunud vett peavad süsteemid vastama EL-i raamdirektiivile veekeskkonna kaitseks *Water Framework Directive* (2000/60/EC). Kui süsteemide rajamisel puuritakse läbi söekihi või kaevanduste peab lähtuma lisaks söetööstuse seadusest (*Coal Industry Act* 1994, Suurbritannia). Soojuskandevadeliikuna

soovitatakse kasutada propüleenglükooli ja etanooli. Piiranguid soojuspuuraukude kaugustele teistest rajatistest pole määratletud.

Šotimaa

Kõik keskkonnamõjuga tegevused (nt puurimine, vee kasutamine) on Scottish Environment Protection Agency SEPA hallata. Nende "Requirements for Activities Related to Geothermal Energy" (2022) juhend annab detailsed reeglid väiksematele süsteemidele. Šotimaal on regulatsioonid sarnased ülejäänud Suurbritanniaga, kuid kohandatud kohalike keskkonna- ja veejuhtimise seadustega, nagu Water Environment (Controlled Activities) (Scotland) Regulations 2011 (CAR). Suletud süsteemide rajamine on üldiselt lihtsam, avatud süsteemid vajavad rohkem lubasid. Enamikel juhtudel ei vajata eraldi luba, kuid tundlikel aladel (nt kaitsealad) tuleb konsulteerida kohaliku omavalitsusega.

Soojuskandevedelikuna soovitatakse kasutada propüleenglükooli ja etanooli. Soovituslik soojuspuuraukude kaugus hoonetest 3-5m.

Põhja-Iirimaa

Regulatsioonid põhinevad *Northern Ireland Environment Agency* (NIEA) ja *Department of Agriculture, Environment and Rural Affairs* (DAERA) juhiste ning *Water Abstraction and Impoundment (Licensing) Regulations* (Northern Ireland) 2006 alusel. Põhja-Iirimaa on regulatsioonid sarnased Ühendkuningriigi teiste osadega, kuid keskendutakse vee võtmise ja tagastamise kontrollile. Suletud süsteemid vajavad lubasid ainult riskantsetel juhtudel, avatud süsteemid vajavad alati lubasid. Soojuskandevedelikuna soovitatakse kasutada propüleenglükooli ja etanooli. Soovituslik soojuspuuraukude kaugus naabri eluhoonetest 30m, mürariski vähendamiseks.

7. SOOJUSPUURAUKUDE RAJAMISE SENINE PRAKTIKA EUROOPA RIIKIDES JA EESTIS

Euroopa

Euroopas on tänaseks müüdnud ligikaudu 2,5 miljonit MSS-ides kasutatavat soojuspumpa. Aastas lisandub ca 150 000 uut soojuspumpa. Suurem osa Kesk ja Lõuna Euroopast kasutab avatud süsteeme ja sügavaid veekihte, kus temperatuurid ulatuvad 20 kraadist 180 kraadini, enamusele juhtudel kasutatakse süsteeme otsekütmiseks või ka ligi kahesajal juhul elektritootmiseks. Põhjamaades kasutatakse valdavalt soojuspumpasid kasutavaid kinniseid süsteeme, kuna temperatuurid ulatuvad pigem kuni 20 kraadini. Peamised mured, millele on tagantjärei suuremat tähelepanu osutatud ja uute puuraukude rajamisel arvestatud on:

- indutseeritud maavärinad EGS süsteemide ehitamisel
- geoloogiliste ootuste ebakõla - vee puudumine eeldatavas intervallis,
- pinnase vajumine, põhjavee taseme langus,
- terminline interferents juhul kui süsteemid rajatakse üksteisele liiga lähedale.

Šveitsis Baselis ja Prantsusmaal Soultz-sous-Forêtsis tekitasid EGS rajamisel indutseeritud maavärinad kogukondades vastuseisu. Baselis toimud hüdrauliline simulatsioon põhjustas kuni 3,4 magnituudiga maavärinaid ning projekt peatati (Baisch et al., 2009). Põhjalikud seismika uuringud tehti peale probleeme seoses Prantsusmaa projektiga, kuid rangete seiremeetmetega lubati projekti jätkata (Charlét et al., 2007). Termaalvee puudumine on olnud probleemiks Geretsriedis Saksamaal, kus oodatud intervallis termaalvee puudumine katkestas projekti (Drews et al., 2020) ja selle asemele luuakse eksperimentaalset Eavor Loop 2.0 tehnoloogial põhinevat kinnise süsteemiga jaama. Põhjaveetaseme langust seoses hüdrotermaalsete soojussüsteemidega on põhjalikult käsitletud (Alsaleh et al., 2022) ning uuring näitas, et riikides, kus geotermaalse energia kasutamine on ulatuslik (nt Prantsusmaa, Saksamaa), on täheldatud mõõdetavat põhjavee taseme alanemist ning mõningal määral ka veekvaliteedi halvenemist. Terminise interferentsi kohta mitmeid uuringuid (Fasci et al., 2019; Angelotti ja Sterpi, 2024), suuremad probleemid hakkavad juba tekkima Rootsis, eriti Stockholmi piirkonnas, kus MSS-ide kasutuselevõtt on maailmas esirinnas.

Eesti

Praktikas ei ole Eestisse rajatavaid soojuspuuraukuseid mõistlik võrrelda tektooniliselt aktiivsetes piirkondades rajatud soojuspuuraukudega, ega ka sügavate hüdrotermaalsete puurkaevudega. Eesti õhukese settekihi geoloogia korral oleme oluliselt sarnasemal positsioonil Põhjamaade ning Hollandi ja Taaniga. Põhjamaades on enamik soojuspuurauke rajatud õhukest settekihti läbivatesse aluskorra puuraukudesse kinniste süsteemidena, mis sarnaneb Põhja-Eesti tingimustega. Hollandis ja Taanis rajatakse enamjaolt avatud süsteeme ning kasutatakse sügavate hüdrotermaalsete puurkaevude kõrval ka olulisel määral kvaternaarisetetes olevat veevaru, mille ärakasutamiseks on ka Eesti puhul eriti Lõuna- Eestis rohkem potentsiaali.

2025. aasta septembri seisuga oli Eestis registreeritud 6776 kinnise süsteemi soojuspuurauku (EELIS), neist 6772 kehtiva kirjega, millest enamik on rajatud viimase kümne aasta jooksul. Suurimad soojuspuuraukude väljad Eestis asuvad Koerus, Paides ja Tallinnas. Puurimisel järgitakse ehitusseadustikku, kuid puuritud augud/kaevud tuleb registreerida Eesti looduse infosüsteemis. Tööde teostajad peavad omama

hüdrogeoloogiliste tööde luba <https://kliimaministeerium.ee/hydrogeoloogiliste-toode-komisjon>, järelevalve on kirjeldatud Ehitusseadustikus. Ulatuslikke probleeme, ennekõike lekkeid pole teada. Eestis kehtib kohustuslik õõne täitmine kogu sügavuses, sõltumata veekihtide arvust, mida puurimisel läbitakse. Kasutusele on võetud ka avatud süsteeme, registri järgi 99 tükki, mis viitab sellele, et kõigi süsteemide korral pole mõlemad kaevud registris. 95 kaevu on registris kehtivad. EELISE andmetel valmis viimane soojuspuurkaev 2022 ja rekonstrueeriti 2024 aastal. Suurim avatud süsteemi lahendus asub Paines 10 registreeritud kaevuga. Kaevude sügavused varieeruvad 10 meetrist Viimsi vallas 238 meetrini Saaremaa vallas.

Holland

Hollandis haldab süsteemi kvaliteeti ja järelevalvet sõltumatu organisatsioon *Stichting Infrastructuur Kwaliteitsborging Bodembeheer* (SIKB), mis kehtestab sertifitseerimisjuhised BRL. Kõik süsteemide paigaldajad peavad olema sertifitseeritud vastavalt nendele suunistele. Puurimistegevus peab vastama sertifitseerimisjuhisele BRL SIKB 2100 (mehaaniline puurimine) ja SIKB protokollile 210143. Süsteemi projekteerimine, rajamine, käitamine ja hooldamine peab vastama sertifitseerimisjuhistele BRL SIKB 11000 ja SIKB protokollile 1100144.

Veebipõhine *Warmte Koude Opslag* (WKO) tööriist võimaldab väga lihtsalt kontrollida, kas kinnise tsirkulatsiooniga süsteemi on võimalik paigaldada kindlale aadressile, ning pakub kasutaja poolt sisestatud andmete (maja suurus, energiatarve, päikesepaneelid jne) põhjal esialgset kavandit ja maksumuse hinnangut. Digitaalne platvorm võimaldab hinnata süsteemi sobivust asukohas, teha termilisi simulatsioone ja esitada taotlusi digitaalselt.

Rootsi

Peamised parameetrid BTES MSS-i dimensioneerimiseks on pinnase temperatuur, kivimite soojusjuhtivus, ehitise soojus- ja jahutuskoormuse vajadus kuude lõikes koos miinimum- ja maksimumtemperatuuridega, MSS-i tüüp ja võimsus ning voolu kiirus maaküttekollektoris. Planeeritavate puuraukude arv, sügavused ja puuraukude omavaheline vahekaugus määratletakse väiksemate süsteemide puhul kas varasema kogemuse alusel või kasutatakse modelleerimisprogrammi *Earth Energy Designer*, (EED). Suuremate BTES süsteemide rajamisel viiakse tavaliselt läbi veel tasuvusuuringud, mille käigus toimuvad ka katsepuurimistööd (katsepuurimistööde läbiviimiseks omal kinnistul ei ole vaja luba taotleda). Katsepuuraukude rajamisel puuraukude arvu ja sügavuse planeerimiseks ning BTES süsteemi dimensioneerimiseks lähtutakse järgmistest põhimõtetest:

- kuni 10 puurauku: tavaliselt ei tehta katsepuurauke
- 10 - 30 puurauku: puuritakse üks testpuurauk, milles viiakse läbi TRT-test
- 30 - 120 puurauku: puuritakse tavaliselt 2-3 testpuurauku, milles teostatakse 1-2 TRT-testi

Katsepuuraukude dokumenteerimisel kirjeldatakse puurimise käigus läbitud kivimeid, lõhevööndite esinemist, põhjavee taset, puuraugu seina stabiilsust, paisuvate savide esinemist, puurauku vee sissevoolu tasemeid jmt. TRT-testide tegemiseks paigaldatakse katsepuurauku soojuskollektor, tavaliselt kestab TRT-test 50 - 70 tundi.

Tasuvusuuringute käigus võidakse hinnata maaküttesüsteemide maksumust kogu süsteemi eluea jooksul (*Life Cost Cycle analysis*; 40 aastat), sh arvestatakse süsteemi tehniliste osade elueaks 20 aastat.

Puurauke, mida kasutatakse soojuspumpade abil kas kütmise või kütmise ja jahutamise eesmärgil on Rootsis puuritud viimase 40 aasta jooksul ning tänapäeval on Rootsis kasutusel enam kui 500 000 soojuspuurauku – neist umbes 400 000 on kristalsetesse kivimitesse puuritud vertikaalsed soojuspuuraugud (Andersson ja Gehlin, 2018). Enamik soojuspuuraukudest on rajatud eramajade kütteks ning tavaliselt koosnevad nad ühest või kahest puuraugust.

Rootsis puudub detailne statistika BTES MSS-ide osas, kuid 2018. aasta seisuga arvati Rootsis olevat vähemalt 500 BTES süsteemi, milles igasse süsteemi kuulus enam kui 20 puurauku. Selliste süsteemide rajamine toimub kasvavas tempos ning käesoleval ajal lisandub Rootsis iga-aastaselt vähemalt 30 suuremat BTES MSS-i. Suurim BTES süsteem Rootsis rajati aastatel 2015-2016 Volvo kontserni kuuluvas Volvo Powertrain AB tehases Köpingsis, mis koosneb 215 puuraugust kogupikkusega 58 200 meetrit. Rajatud puuraukude keskmine sügavus on 270 m (Olsson, 2023). Vähestel juhtudel on Rootsis rajatud ka kõrgetemperatuurilise salvestusvõimekusega MSS-e (HT-BTES), mis võimaldavad päikesepaneelide abil toodetud soojusenergia või siis tööstuslikul jahutusel tekkiva jääksoojuse salvestamist (Nordell jt, 2016).

Tähelepanuväärne on samuti rootslaste pikaajaline kogemus avatud soojussüsteemiga puurkaevude (*Aquifer Thermal Energy Storage*, ATES) kasutamisel nii suurte taristuobjektide kütmisel ja jahutamisel kui ka nende rakendamisel kaugküttesüsteemides. Lundi linna kaugküttesüsteem Lõuna-Rootsis kasutab Lunds Energi AB poolt ATES-süsteemi abil toodetavat madalatemperatuurilist soojust. Põhjavesi temperatuuriga 13 – 20° C pumbatakse soojusvahetisse nelja tootmispuurkaevu abil 550 – 700 m sügavusel asuvast veerikkast liivakivi kihist ning pärast 2 – 4° C soojuse eraldamist pumbatakse vesi kuue tagastuspuuraugu kaudu tagasi samasse liivakivi kihti. Lundi maasoojusenergia jaam alustas tööd 1985. aastal ning tootis 2017. aastal 250 GWh soojusenergiat (Aldenius, 2017, Rosberg, 2019). Ajavahemikul 1985 – 2016 on pumbatava põhjavee temperatuur puurkaevudes alanenud 2 – 8° C ning lähitulevikus planeeritakse piirkonnas uue süvavee toitega ATES maasoojusenergia jaama rajamist. Suurim kvaternaarisetetes rajatud ATES süsteem Rootsis (aastane jahutus- ja kütteenergia toodang 20 GWh) kütab ja jahutab Stockholmi Arlanda lennujaama (Andersson, 2021). Hinnanguliselt oli 2022 aasta lõpu seisuga oli Rootsis töös umbes 210 üle 100 kW võimsusega ja 320 keskmise võimsusega 50 kW avatud soojussüsteemiga puurkaevude kompleksi (Gehlin jt., 2022).

Peaaegu kõik soojuspuuraugud puuritakse Rootsis keerd-löökpuurimisega vastavalt Normbrunn - 16 juhendile, kasutades puurhiiva eemaldamiseks võimsaid õhkkompressoreid (rõhuga 30 – 35 baari). Enamik puurauke on läbimõelduga 115 mm (manteltoru – 139,7 mm), vähem puuritakse puurauke läbimõeldus 140 mm (manteltoru – 168 mm).

Puuraukude keskmine sügavus on Rootsis aja jooksul kasvanud ning viimastel aastatel on keskmine sügavus olnud 200 m ringis (Gehlin ja Andersson, 2020). Sügavamaid soojuspuurauke rajatakse enamasti väikeste kinnistutega tiheasustusaladel, eriti aga linnades. Kõige sügavamad puuraugud on 500 m sügavused. Ehkki sellise sügavusega puuraukudest on võimalik saada 2 – 3 korda rohkem soojust võrreldes 200 m sügavustega puuraukudega (Piipponen jt, 2022), on sügavamate puuraukude puurimine oluliselt kallim ning nende puurimine on maapõue geoloogiast tingituna tehniliselt

komplitseeritum (enamate lõhevööndite esinemisvõimalus, mitme kompressori ühendkasutamine puurhiiva eemaldamiseks, U-kollektorite keerulisem paigaldus jm). Lisaks tuleb arvestada soojuspumba suuremat energiakulu soojuskandvedeliku ülespumpamisel ning soojuskollektoris soojuskandvedeliku temperatuuri alanemist aeglase ülesvoolu tingimustes.

Ainult maasoojuse kasutamisel on Rootsis puuraukude soovituslikuks vahekauguseks 20 meetrit, BTES soojustagastusega süsteemide puhul aga 5 – 10 meetrit. Puuraukude rajamisel väikestel kinnistutel ja hoonete all kasutatakse sageli suunatud kaldpuurimist. Soojuskollektorina on enamasti kasutusel 40 mm läbimõõduga ühene polüetüleenplastikust U-kollektor (single U-pipe, DN40/2.4 SDR 17), sügavamate puuraukude (sügavus >250 m) puhul kasutatakse ka 45 mm või 50 mm läbimõõduga U-kollektorit. Suuremates BTES süsteemides on tavaliselt installeeritud topelt U-kollektor. Ühistelgset, ehk koaksiaalkollektorit on Rootsis kasutatud harva ning valdavalt teadus- ja arendustegevuse raames. Soojuskandvedelikuna kasutatakse bioetanooli vesilahust, milles etanooli kogus jääb alla 30 % (vastab külmumispunktile – 20,5° C). Et muuta etanoolilahus joogikõlbmatuks lisatakse EU regulatsioonide kohaselt soojuskandvedelikule denaturaate – Rootsis on lubatud lisada propüülalkoholi ja n-butüülalkoholi (Ignatowicz jt, 2017). Mõlemad kasutatavad lisandid esinevad looduses fermentatsiooniproduktina ning nende biolagunemisaeg on kuni 28 päeva. Rootsis tööstuslikult müüdavad soojuskandvedelikud ei sisalda inhibiitoreid ning koosnevad etanoolist (88%), millele on lisatud isopropanooli (8 kaalu %) ja n-butüülalkoholi (8 kaalu %). Mõlemad lisandid parandavad ka soojuskandvedeliku termofüüsikalisi omadusi võrreldes puhta etanooli vesilahusega, vähendades vedeliku dünaamilist viskoossust ning suurendades soojusjuhtivust (Ignatowicz jt, 2015).

Üldreeglina jäetakse Rootsis nii kristalsetes kivimites kui ka kõvades settekivimites (lubjakivid, savikivimid, konsolideerunud liivakivid) puuritud puuraugud pärast U-kollektorite paigaldamist täitmata, sulgedes vaid puuraugud pealt tugevdatud kaanega (Andersson ja Gehlin, 2018). Nendel vähestel juhtudel kui soojuspuuraugud läbivad Rootsis mitut veekihti, viiakse läbi puuraukude õõnte tagasitäitmine, et vältida erinevate veekihtide segunemist. Kuna kristalsed kivimid on hea soojusjuhtivusega (>3 W/m·K), siis tagasitäiteks kasutatakse tavaliselt spetsiaalseid termosegusid, mille soojusjuhtivust on suurendatud kvartsi või grafiidi lisandiga.

Maaküttesüsteemide paigaldamisjärgsed kahjustused on tavaliselt seotud pinnase külmumisega, mis võib peamiselt kahjustada horisontaalorustikke. MSS-ide dimensioneerimisel on Rootsis tavapraktikaks, et soojuskandvedeliku temperatuur ei tohiks alaneda alla -3° C. Suurematel puurauguväljadel võib puuraukude jäätumine toimuda MSS-ide pikaajalisel kasutamisel juhtudel kus puuraugud paiknevad liiga lähestikku või on nende sügavus ebapiisav. Soojuskandvedeliku lekked on Rootsis väga harvad (esinemise tõenäosusega <0,1 %; Andersson ja Gehlin, 2018) ning need on peamiselt põhjustatud hilisemate kaevamistöõde käigus puuraukude ühendustrasside aladel.

Soome

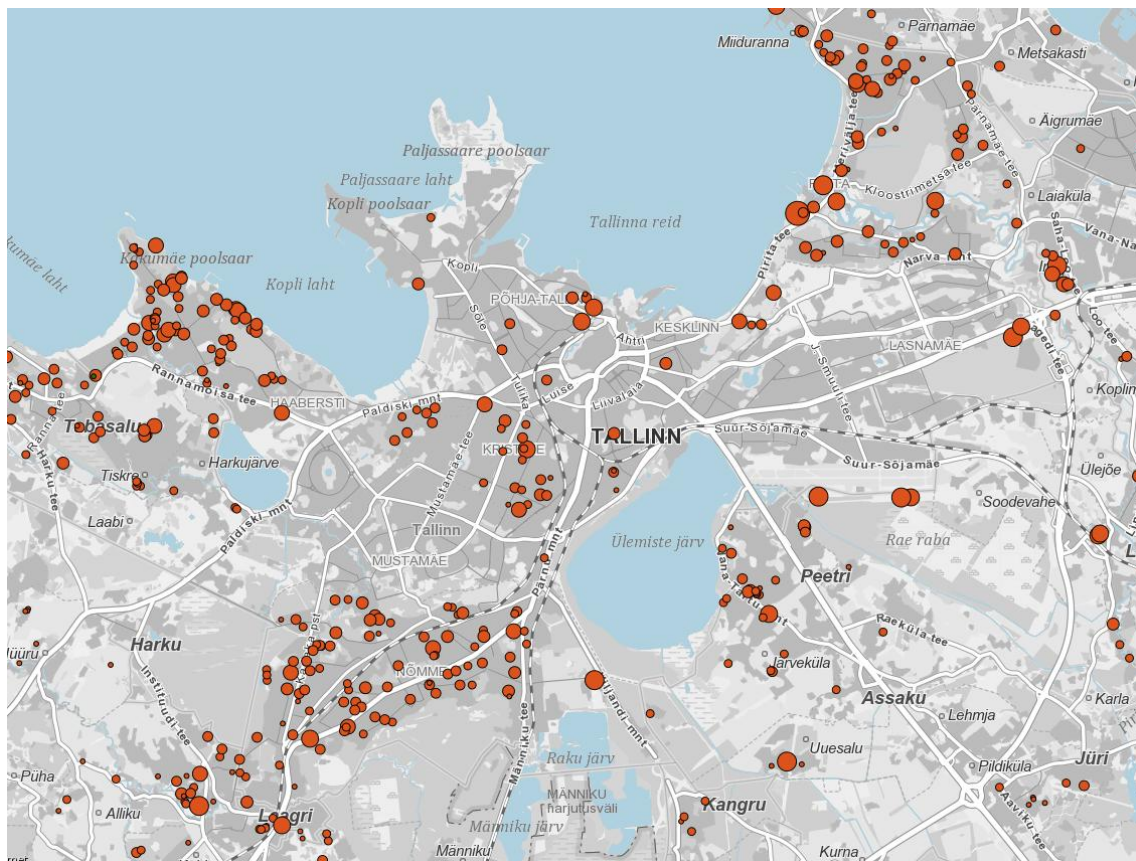
Peamisteks keskkonnariskideks peetakse Soomes (Juvonen and Lapinlahti, 2013; Majuri, 2018; Arola jt, 2021) a) põhjaveekihtide reostumist maapinnalt lähtuva reostuse tõttu, soojuskandvedeliku lekkimist kollektortorustikust, põhjaveekihtide segunemist ja maapõue geoloogilisest ehitusest tulenevaid riske

Soomes on maakollektorites kõige enam kasutatavaks soojuskandevedelikuks etanoolipõhised lahused. Peamiselt kasutatakse Anora Group OY poolt toodetavaid *Naturet* soojuskandevedelikke (<https://anoraindustrial.com/fi/naturet>): *Naturet -17*, mis sisaldab ka korrosiooniinhibiitoreid (kaaluprotsentides: etanool – 28 %, butanool – 0,6 %, isopropanool – 0,6 %; soojuskandevedeliku külmumispunkt on -17° C) või siis ilma inhibiitoriteta *Naturet -17 GeoSafe* soojuskandevedelikku (kaaluprotsentides: etanool – 28 %).

Maapõue geoloogilisest ehitusest tulenevad puuraukude puurimise riskid on Soomes peamiselt seotud paksemate ja vähekonsolideerunud, kuid veerikaste kvaternaarisetete läbimisega. Kuna puurimisel kasutatakse odavuse ja kõrgema puurimiskiiruse saavutamiseks eelkõige keerd-löökpuurimist, mille käigus purustatud kivimiosakesed eemaldatakse puuraugust võimsate kompressorite abil, siis teatud sügavustasemetel vee kõrge sisesevoolu tingimustes ei pruugi kompressorid enam suuta veega küllastunud puurhiiva puuraugu õõnest eemaldada. Sel juhul võib tekkida vajadus puurimine katkestada või teostada puurimist teises kohas. Teiseks peamiseks puurimisriskiks on puurimiskoha geoloogilises läbilõikes lõhevööndite esinemine, mis võib viia puuraugu seina sisse varisemisele ning seetõttu ei õnnestu sellesse puurauku paigaldada U-kollektortoru. Lõhevööndites puurimist peavad Soome puurimisfirmad kõige suuremaks riskiks puuraukude rajamisel.

8. ÜLEVAADE MAASOOJUSE KASUTAMISEST TALLINNAS

Tallinnas on maasoojuse kasutamine levinud, eelkõige eramajades ja väiksemates korterelamutes. Enamus kasutusel olevatest maasoojussüsteemist on kinnise ringlusega, kus soojus ammutatakse horisontaalsetest kontuuridest või vertikaalsetest puuraukudest. Vertikaalseid puurauke on Tallinnas Eesti Looduse Infosüsteemi avaandmete (keskkonnaportaal.ee) järgi 03.09.2025 seisuga 1346 tükki nagu ka Joonis 8.1-lt näha, paiknevad MSS-id Tallinnas valdavalt eramajade piirkondades.



Joonis 8.1. Kinnised MSS-id Tallinna piirkonnas (Eesti Geoloogiateenistus gis.egt.ee)

Horisontaalkontuure pole võimalik ehitisregistrist eraldi välja võtta, kuna majandus ja tariustuministri määrusega „Ehitise tehniliste andmete loetelu ja arvestamise alused“ (MTM, 2015) on sobiva soojusallika liigina kirjeldatud vaid „soojuspump“, mis sisaldab endas ka vertikaalseid süsteeme. Eraldi on toodud ka soojuspumba liigid, kuid ka seal on valikus ainult „maasoojuspump“, kuid seda ehitisregistris ei kajastata. Kaudse hinnangu võiks anda müüdnud soojuspumpade arv, kuid pole teada, kuhu neid on paigaldatud. Tüüpiline tagasitäidetud kinnise süsteemi puurauk ulatub Tallinnas 18 meetrist 150 meetri sügavusele ning sisaldab plasttorustikku, milles ringleb soojuskandev vedelik. Kuna puuraugud on madalad, siis keskmiselt on Tallinnas ühes süsteemis 5,52 puurauku. Tallinnas on ka üks aluskorra soojuspuurauk, mis asub Haabersti linnaosas ja on 505 m sügav. Avatud süsteemi puurkaeve on Tallinnas registreeritud 15, kuid need on vähem levinud, kuna linna geoloogilised tingimused piiravad nende kasutamist (Jõelet et al., 2020). Kuna avatud süsteem eeldab vähemalt kahe kaevu kasutamist, on tõenäoline, et süsteemis on mitmetel juhtudel teine kaev jäänud registrisse kandmata.

Ruumiline ja looduslik sobivus

Maakütte rakendatavus varieerub oluliselt linnaosade kaupa: Nõmmel, Piritall ja Haaberstis on lahendused levinumad, sest seal on suuremad krundid, kaugkütte puudumine ja hajus hoonestus. Linnaosade järgi on soojuspumade ja puurkaevude jaotus välja toodud tabelis 8.1.

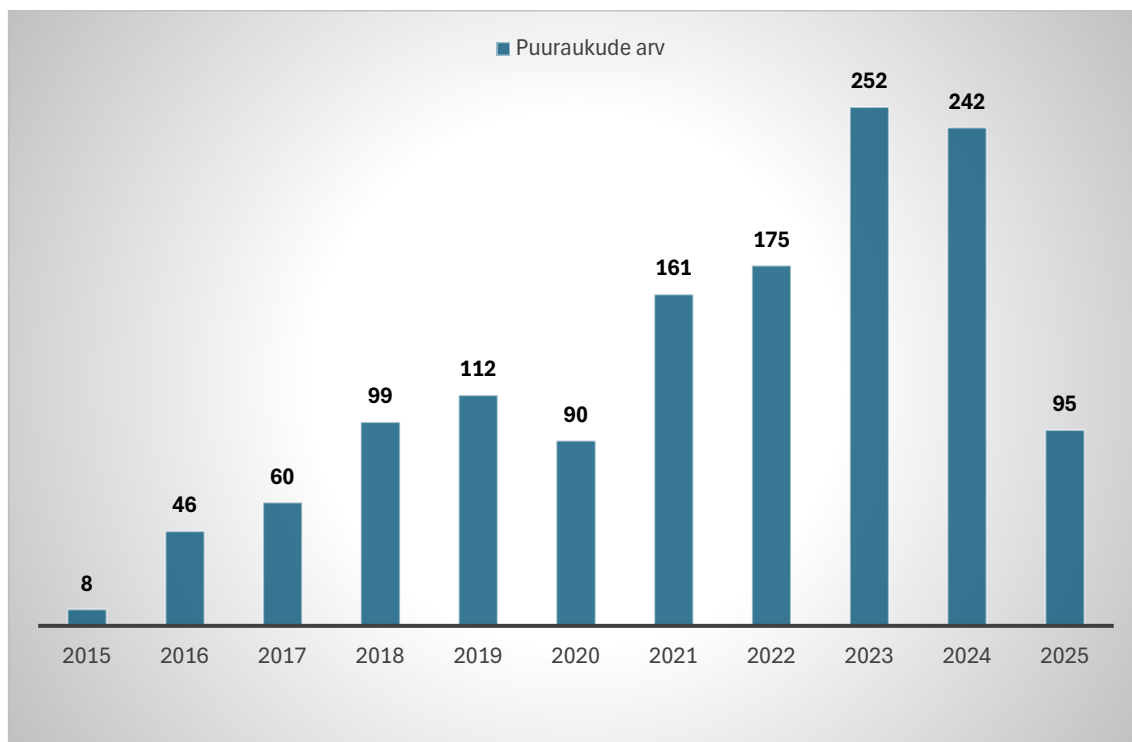
Tabel 8.1. Soojuspumade arv Tallinnas linnaosade kaupa (EELIS)

Piirkond	Soojuspumade arv	Soojuspuurkaevude arv
Nõmme linnaosa	469	7
Pirita linnaosa	309	4
Haabersti linnaosa	303	1
Kristiine linnaosa	96	1
Põhja-Tallinna linnaosa	66	0
Lasnamäe linnaosa	58	0
Kesklinna linnaosa	44	0

Samas on Tallinna vanemates elurajoonides maadepindade rohkem kõrghaljustust, mis teeb horisontaalsete süsteemide paigaldamise keeruliseks ja tihtipeale ka võimatuks. Pumade keskmine sügavus on hakanud ka kasvama. Kui 2015 aastal oli see 79 meetrit, siis 2025 aastaks on see kasvanud juba üle 100 meetri. Geoloogiliselt paikneb Tallinn lubjakivi ja savikate setete alal, mis tõstab puurimise tehnilist keerukust ja maksumust võrreldes nt Soome kristalse kivimiga (Jõelet et al., 2020).

Majanduslik aspekt ja tasuvus

Tüüpiline investeering eramajale tasub end ära 8–15 aasta jooksul (Maasoojus.ee, 2024). Investeeringu edukus sõltub hoone energiavajadusest, kaugkütte hinnatasemest ja alternatiivide kättesaadavusest. Tulusam on lahendus energiatõhusatele uusarendustele. Suuremate hoonete puhul kasutatakse tihti kombineeritud lahendusi (nt koos päikesepaneelidega). Prognooside kohaselt odavneb elektrienergia Eestis järk-järgult ja aastaks 2050 on hinnad oluliselt madalamad, tänu laialdasemale taastuvenergia kasutusele ja tehnoloogilistele arengutele. Samal ajal kasvab kaugkütte hind, kuna kaugkütte tootmiseks kasutatakse peamiselt fossiilkütuseid, mille hinnad tõenäoliselt tõusevad ja keskkonnamaksud suurenevad. Sellistes tingimustes muutub madalatemperatuuriline küte soojuspumpade abil erakordselt tasuvaks. Seda näitab ka pidevalt kasvav puurimistöde maht. Joonisel 8.2 on välja toodud viimase kümne aasta jooksul Tallinnas puuritud soojuspumade arv.



Joonis 8.2. Tallinnas puuritud kinnise soojussüsteemi puuraugud aastatel 2015-2025 (EELIS)

Regulatiivsed väljakutsed

Maasoojuse laiemat kasutuselevõttu Tallinnas piiravad samasugused takistused nagu ülejäänud Eestis, ennekõike kitsendused, mis lähtuvad keskkonnast, võrkudest või muust infrastruktuurist. Kohalik omavalitsus omalt poolt eritingimusi kehtestanud ei ole.

Uued algatused ja teadusprojektid

Tallinnas Tiskre asumis valmis 2024. aastal maapõuesoojust kasutav katsejaam, mis ammutab energiat 505 meetri sügavuselt kristalsest aluskorrast. See kortermaja küttevõrku baaskoormusena soojust andev katsejaam on esimene omataoline Eestis ja kogu Baltikumis. Katsejaam demonstreerib, kuidas kesk-sügav maapõuesoojus võib katta suuremate tarbijate soojusenergia baaskoormust, vähendada sõltuvust fossiilkütustest. Samuti annab see väärtuslikke andmeid vertikaalsete puurkaevude efektiivsuse ja sügavuste kohta, mida saab tulevikus kasutada uute MSS-ide planeerimisel kogu Tallinnas ja Eestis.

9. TALLINNA GEOLOOGILINE EHITUS JA HÜDROGEOLOOGILISED TINGIMUSED

Tallinna geoloogilise ehituse uurituse tase on hea. Linna geoloogilist ehitust on kirjeldatud põhjalikult nii Eesti geoloogilise baaskaardi Tallinna kaardilehe (6334) seletuskirjas (Suuroja jt., 2003) kui ka A. Soesoo ja A. Aaloe (2010) toimetatud kogumikus „Tallinna Geoloogia“. Alltoodud kirjeldus tugineb nendele allikatele.

Geoloogiline ehitus

Tallinna linna aluspõhja moodustab kristalne aluskord, mille peal lasuvad settekivimid. Pinnakatte moodustavad aluspõhjal lasuvad pudedad purdsetted. Kuna Eestis aluskord ei paljandu pärineb teave sellest peamiselt puurimistulemustest, millest ulatuslikumad tööd viidi läbi 1960.-1980. aastatel seoses tööstuse, linnaplaneerimise ja maa-aluste ehitiste arendamisega. Peale puursüdamike on aluskorda kirjeldatud ka kaugmeetodite abil, uurides maakoore geofüüsikalisi välju, kivimite tihedust, elektrilisi ja magnetilisi omadusi.

Eesti aluskord on eelkambriumi vanusega, kujunedes 1,8-1,6 miljardit aastat tagasi ning paikneb Fennoskandia kristalse kilbi lõunanõlval. Kristalsete kivimite sügavus Eestis on väga varieeruv lõuna suunalise kallaku tõttu. Kivimite kalle on ligikaudu 2-4 m kilomeetri kohta. Tallinna keskel ulatub kristalse aluskorra lasum ligikaudu 110-130 m sügavusele.

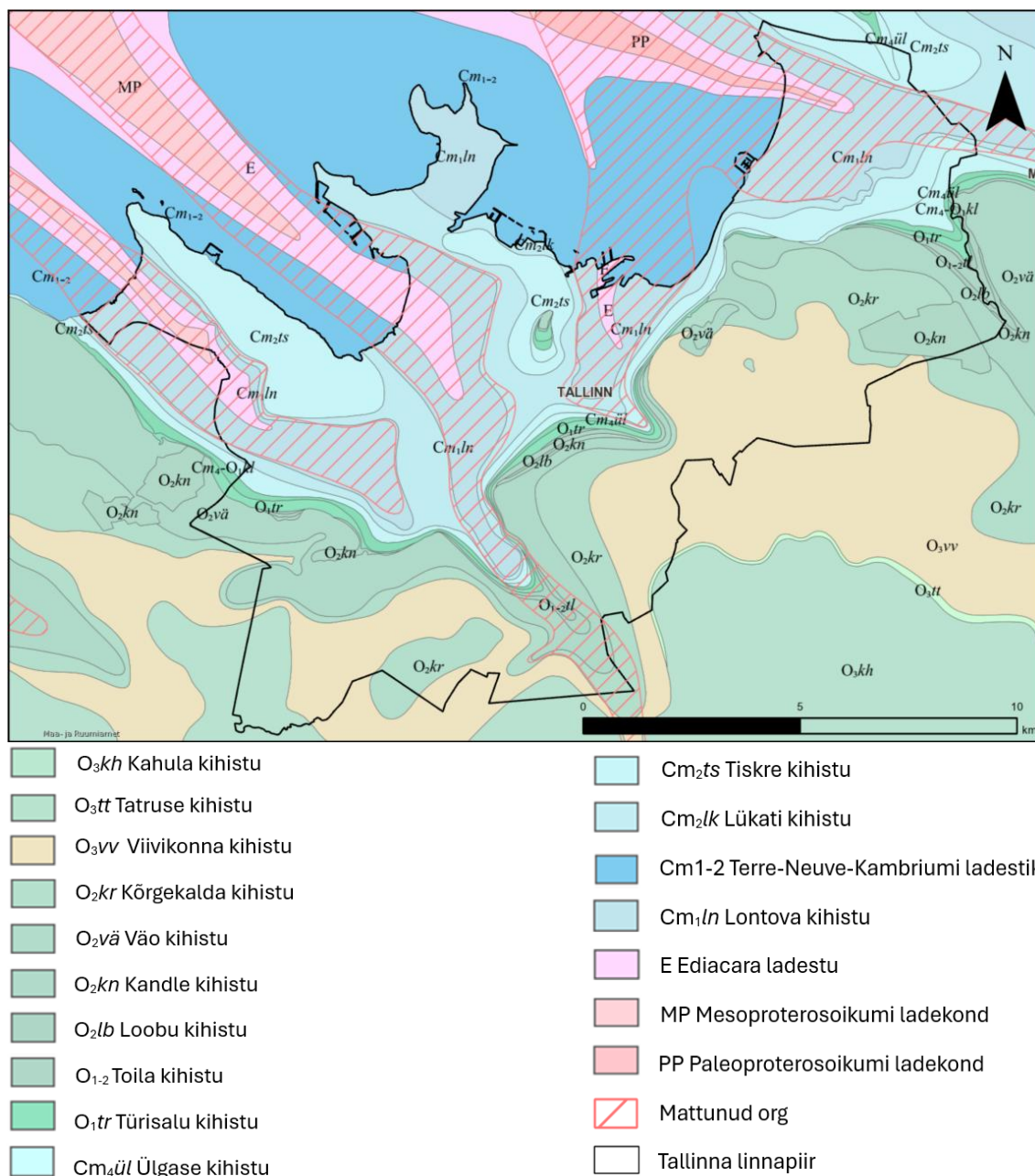
Tallinna piirkonnas ulatuvad puuraugud kristalsete kivimiteni paarisaja meetri sügavusel. Puurimistulemused on näidanud, et aluskorda katab murenemiskoorik, mis koosneb savimineraalidest ning mille paksus varieerub Eesti piires mõnest meetrist kuni 150 m. See murenemiskoorik on tekkinud kristalsete kivimite lagunemisel.

Tallinna alavööndile on kristalses aluskorras iseloomulikud nii iidised vulkaniidid kui ka settelised kivimid, mis on erinevate protsesside käigus moondunud gneissideks. Lisaks leidub Tallinna piirkonnas ka graniitseid magmakivimeid, sest linn asetseb Naissaare ja Neeme graniitse plutooni vahel.

Kristalsel aluskorral lasuvad merepõhjas ladestunud Ediacara settekivimid, mis kujunesid 550-350 miljonit aastat tagasi. Ediacara kivimid on aluskorra murendist moodustunud kruusasegused liivad, peeneteralisemad aleuroliidid ja ka savid ning need lasuvad transgressiivselt, kirdesse tüseneva 40-60 m paksuse lasundina aluskorra murenemiskoorikul. Eestis Ediacara settekivimid ei paljandu.

Ediacara on Tallinna piirkonnas kaetud Kambriumi ja Ordoviitsiumi kivimitega. Erinevalt vanematest kivimitest paljanduvad need Tallinnas ja lähiümbruses. Kambriumi ajastu kivimitest on Tallinna piirkonnas esindatud Lontova kihistu sinisavi, mille lasum on Tallinna põhjaosas vahetult pinnakatte all (minimaalselt 2 m maapinnast), kuid võib ulatuda lõuna pool klinti ka >140 m sügavusele. Sinisavi paksus võib küündida 90 m-ni (keskmiselt paksus vahemikus 65-80 m). Kohati on esindatud Lükati kihistu, mille paksus jääb vahemikku 10-16 m ja moodustab sinisavilasundi ülemise osa. Seda iseloomustab rohekashall aleuriitsavi. Harvemini on esindatud ka Tiskre kihistu, mille paksus jääb vahemikku 11-20 m ning koosneb suhteliselt homogeensest hele- kuni kollakashallist, jämeteralisest kvartsaleuroliidist või peeneteralisest kvartsliaakist.

Ordoviitsiumi ajastu kivimid on Tallinnas hästi esindatud ja määravad suuresti Tallinna paekalda ning Toompea geoloogilise olemuse. Ordoviitsiumi ajastul ladestused esmalt liiva- ja savikihid ning hiljem lubimudad, millest kujunesid liivakivid, graptoliitargilliit, lubjakivid ning dolomiidid. Just need kivimid moodustavad suure osa Tallinna aluspõhjast ning on hästi nähtavad Põhja-Eesti klindil. Klindi ülemises osas näeme Lasnamäe ja Uhaku lademe lubjakive, mis on kõvad ja vastupidavad ehituskivid. Tallinna piirkonnas on Ordoviitsiumi kivimite kogupaksus ligikaudu 70-100 m.



Joonis 9.1. Tallinna aluspõhja avamused Eesti Geoloogiateenistuse 1 : 50 000 geoloogilise baaskaardi andmetel (Suuroja jt., 2003)

Ordoviitsiumi kivimite peal lasub Kvaternaari setetest koosnev pinnakate. Kvaternaari hõlmab jääaegu ja nende vahelisi soojaperioode ehk jäävaheaegu. Jääaegadega on seotud setted nagu moreen, kruus, liiv ja savi. Setete paksus võib olla väga varieeruv. Paksus võib ulatuda kuni 120 m näiteks mattunud orgudes Põhja-Eesti klindivööndi piires või hoopis olla 0-5 m näiteks Mustamäe-Haabersti piirkonnas.

Hüdrogeoloogilised tingimused

Umbes 90 % Tallinna elanikest, kes saavad oma joogivee ühisveevärgist, AS Tallinna Veelt, saavad joogivee Ülemiste järvest. See hõlmab Tallinna Kesklinna, Lasnamäe, Mustamäe, Põhja-Tallinna, Kristiine ja Haabersti linnaosi, samuti Maardu linna, Muugat, Pirita asumit ja osa Harku vallast. Ligikaudu 10 % tarbijatest kasutab joogiveeks põhjavett, eelkõige Nõmmel, Laagris, Meriväljal, Pirital, Tiskres, Sael ning Harku valla Tiskre külas.

Tallinna põhjavee kasutusvõimalused sõltuvad geoloogilisest ehitusest. Tallinna linna piiridesse jäävad Kvaternaari, Ordoviitsiumi-Kambriumi, Kambriumi-Vendi ja Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekogumid.

Tallinna linnas esineb hajusalt Kvaternaari põhjaveekompleks (PVK), mis on suuresti määratletud Kvaternaari Männiku-Pelguranna põhjaveekogumi (29§2019) koosseisu (Keskkonnaministri 01.10.2019 määrus nr 48). Põhjaveekogumi omadusi kirjeldatakse A. Marandi jt. (2019) koostatud põhjaveekogumite kontseptuaalse mudeli aruandes. Kogumi alalt väljaspool on Kvaternaari veekihiid aga määratud ülemiste aluspõhjaliste veekompleksidega samadesse põhjaveekogumitesse. Kvaternaari vettandvad kihid koosnevad peamiselt fluvioglatsiaalse päritoluga liivast, kruusast ja veeristest. Männiku-Pelguranna põhjaveekogumi põhjaosa moodustavad kolm mattunud aluspõhjalist orgu: Mustamäe-Pelguranna, Kesklinna ja Harku. Kogumiga seotud seisuveeökosüsteemid on Harku järv, Männiku järv, Raku järv ja Ülemiste järv. Vettandvad setted paiknevad põhjaveekogumis eri ürgorgudes erineval sügavusel. Näiteks Harku orus esinevad liiv, kruus ja veeris kahes kihis: 25-50 meetri ning 80-115 meetri sügavusel. Nende kihtide paksus jääb enamasti 25-35 meetri vahele, mis on sarnane ka teistes ürgorgudes ja Nõmme-Männiku sandurtasandikul.

Kvaternaari setete põhjaveekihiid on tüüpiliselt nõrgalt kaitstud või kaitsmata kuna need on praktiliselt katmata teiste setete poolt. Veekihiid on teatud ulatuses kaetud jääjärveliste savidega Mustamäe-Pelguranna, Kesklinna ja Harku ürgorgudes. Vettandvaid kihte ümbritseb enamasti suhteliselt vettpidav moreenikompleks, mille filtratsioonikoefitsient on 0,001-1,0 m/ööpäevas. Põhjavee survepind asub Nõmme-Männiku sanduriväljal tavaliselt 10–15 meetri sügavusel, ulatudes maksimaalselt 25 meetrini (Perens jt., 2012). Vastupidi esineb Tiskre oja ja Harku järve ümbruses, samuti Mustamäel ja Öismäel, survelisi ülevoolavaid kaevusid.

Männiku-Pelguranna kogumi põhjavesi on valdavalt Ca-Mg-HCO₃ tüüpi ja sisaldab tavaliselt vähe mineraalaineid (0,2-0,4 g/L). Raua ja ammooniumi sisaldused on sageli looduslikult kõrged, mis tekitavad joogivee kvaliteedi probleeme. Kogumi nii keemiline kui ka koguseline seisund on viimase hinnangu alusel hea, kuigi keemiline seisund on ohustatud ammooniumi ja keemilise hapnikutarbe piirväärtusi ületavate väärtuste tõttu (Marandi jt 2020).

Kvaternaari veekihti tarbitakse tänapäeval Tallinnas üksikute salvkaevudega. Veekihi laialdasemat tarbimist takistab kõrge reostustundlikkus ja kihi väike tüsedus. Põhiliselt on vee esinemine seotud alumise lokaalmoreeni või setete suurema paksuse puhul liivaläätsedega.

Tallinna klindipealses osas on maapinnalt järgmine Ordoviitsiumi PVK, mis on Tallinnas määratud Harju Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekogumi (10§2019) koosseisu (Marandi jt., 2019). PVK koosneb peamiselt erinevatest Ordoviitsiumi ladestu lubjakivi- ja dolomiidi erimitest, milles leidub ka mergli vahekihte, ning nende peal lasuvatest Kvaternaari

veekihtidest (v.a Kvaternaari Männiku-Pelguranna põhjaveekogumi levikualal). Põhja-Eesti klindi lähistel on kogumi paksus ligikaudu 10 meetrit, lõuna suunas see suureneb.

Põhjaveekogumil puudub ühtne ja püsiv lasuv veepide ning valdavalt moodustab see katvate kvaternaari setetega hüdrauliliselt seotud veekihi. Lamava veepideme moodustab (Siluri-) Ordoviitsiumi regionaalne veepide, mis koosneb Põhja-Eestis Türisalu kihistu argilliidist, Leetse kihistu glaukoniitliivakivist, Toila kihistu savikate vahekihtidega glaukoniitlubjakivist ning kogu aluspõhja karbonaatkivimite kihistikust, mis lasuvad maapinnast sügavamal kui ~100 m ning on seega monoliitsed ja veetud.

Põhjavee survepind jääb tavaliselt 2-5 meetri sügavusele maapinnast. Looduslikes tingimustes on põhjavesi valdavalt Ca-HCO_3 tüüpi, mille mineraalainete sisaldus on 0,3-0,5 g/L. Joogiveena kasutamisel on sagedaseks probleemiks looduslikult kõrge rauasisaldus (keskmiselt ~0,7 mg/l). Kohati esineb ka lubatud piirväärtusi ületavate ammoniumi (kuni 3 mg/l) ja fluori (kuni 1,6 mg/l) sisaldust (Karro & Uppin, 2013).

Siluri-Ordoviitsiumi Harju põhjaveekogumi koguseline, keemiline ja üldine seisund on hinnatud heaks (Marandi jt 2020). Kogumi kinnitatud põhjaveevaru on 3510 m³/ööpäevas, kuid see ei kuulu aktiivselt veevarustusse. Üksikud eramajapidamised Tallinna äärealadel, näiteks Nõmmel, Pirital ja Haaberstis, kasutavad oma tarbeks salvkaevudest kogumi vett.

Peaaegu kogu Tallinna piires, välja arvatud mattunud ürgorgude aladel ja klindiesisel madalikul, levib Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleks (O-C PVK), mis on määratud Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekogumisse Lääne-Eesti vesikonnas (04§2019). Kogum koosneb peamiselt Alam-Ordoviitsiumi vanusega Kallavere kihistu ja Alam-Kambriumi vanusega Tiskre kihistu aleuoliitsetest liivakividest (Perens jt., 2012). Kogumi paksus on Põhja-Eestis tavaliselt 10-30 m ja asetseb ligikaudu 10-20 m sügavusel maapinnast.

Lasuva veepideme moodustavad Alam-Ordoviitsiumi Türisalu kihistu graptoliitargilliit ning sellel lasuvad Varangu, Leetse ja Toila kihistu savid, savikad glaukoniiti sisaldavad liivakivid ja tihedad dolomiitlubjakivid. Selle veepideme paksus on piirkonnas 8-10 meetrit. Lamava veepideme moodustavad Alam-Kambriumi Lükati-Lontova kihistu savid ja aleuoliidid, mille keskmine paksus on 58 meetrit (Perens jt., 2012). Tallinna piirkonnas läbivad seda veepidet mitmed Kvaternaari setetega täitunud mattunud ürgorud, näiteks Mustamäe-Pelguranna org, Kesklinna org ja Harku org (Perens jt., 2012).

Põhjavee survepind on Nõmmel ning Tallinna ümbruse asulates, nagu Saku, Saue, Rummu ja Loo, langenud veevõttu tõttu, mille tulemusel on kujunenud kohalikud alanduslehid. Põhja-Eesti rannikualadel, kus lasuvate Ordoviitsiumi kivimite paksus on väike, on põhjavesi valdavalt Ca-HCO_3 tüüpi, mineraalsusega 0,2-0,5 g/L. Iseloomulik on lämmastikuühendite väike sisaldus ning probleemiks on raud, mis paljudes puurkaevudes ületab joogiveele lubatud sisalduse 0,2 mg/L.

Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekogumi koguseline, keemiline ja üldseisund on hea, kuid ohustatud, kuna mõnes seirekaevus on olnud püsivalt kloriidide sisaldus üle läviväärtuse (Marandi jt 2020). Kogumi kinnitatud põhjaveevaru on 24 810 m³/ööpäevas. Tallinna piires on kinnitatud tarbevaruga 2 põhjaveemaardla arvestuspiirkonda, Lasnamäe ja Nõmme, nendes kinnitatud varud on vastavalt 1000 m³/ööpäevas ja

3500 m³/ööpäevas. Lasnamäel on reaalne veevõtt olnud eelneval kahel aastal vahemikus 78-86 m³/ööpäevas ja Nõmmel vahemikus 1409-1476 m³/ööpäevas.

Tallinna peamine põhjaveega varustaja on Kambriumi-Vendi põhjaveekompleks (C-V PVK), mis on määratud Kambriumi-Vendi põhjaveekogumi (03§2019) koosseisu. Kogum koosneb Voronka ja Gdovi kihistu liivkividest. Soome lahe rannikualal ulatub kogumi paksus kuni 100 meetrini, vähenedes lõuna suunas 40-60 meetrini. Keskmine paksus on ligikaudu 67 meetrit.

Kogum on peaaegu kogu ulatuses kaetud Lükati-Lontova kihistu savist ja aleuroliidist koosneva veepidemega. Lamava veepideme moodustab aluskord, mille veepidavus on laias laastus kõrge. Väike vee läbilaskvus on ainult aluskorra ülemises murenenud osas, kus kaevude erideebit jääb vahemikku vaid 0,1-0,2 L/(m·s) (Perens & Vallner, 1997).

Looduslikes tingimustes, enne intensiivset veevõttu, asus põhjavee survepind 1–2 meetrit üle merepinna. 1980. aastatel, tugeva veetarbimise perioodil, langes see kuni 28 meetrit merepinnast allapoole. Viimase kümnendi jooksul on veevõtt märkimisväärselt vähenenud, mis on põhjustanud survepinna tõusu ja selle stabiliseerumise Tallinnas absoluutkõrgusele -5 kuni -7 meetrit.

Keemiliselt on põhjavesi mage, Na-HCO₃-Cl või Na-Cl-HCO₃ tüüpi. Tallinnas ja selle ümbruses võib põhjavee tinglikult jagada kaheks: ülemine Voronka osa ja alumine Gdovi osa. Voronka põhjavesi on madala kloriidisisaldusega (Viimsi poolsaarel umbes 10 mg/l) ja hästi isoleeritud kristalsest aluskorrast. Gdovi osa põhjavesi on aga märksa soolasem ning intensiivse veevõtu korral kipub soolsus, eriti kloriidisisaldus, suurenema, eriti Kopli ja Viimsi poolsaarel.

Kambriumi-Vendi põhjaveekogum on heas, kuid ohustatud keemilises ja koguselises seisundis, kuna veevõtt ületab looduslikku taastumisvõimet ja veetarbimise suurenemine võib põhjustada kloriidide sisalduse kasvu mereäärsetes piirkondades ning halvendada veevarustuse olukorda (Marandi jt 2020).

Kogumi kinnitatud põhjaveevaru on 98 500 m³ ööpäevas. Kogumist ammutatakse enamik Tallinna ühisveevärgis kasutatud põhjaveest. Tallinna piires on kinnitatud tarbevaruga 10 põhjaveemaardla arvestuspiirkonda, kus kokku on kinnitatud põhjavee tarbevaru 31 200 m³/ööpäevas. Täpsemalt piirkonniti määratud tarbevaru näeb allolevas tabelis nr 9.1. Reaalne veevõtt Kambrium-Vendi põhjaveekogumis Tallinna piires oli 2024. aastal kokku 6 569 m³/ööpäevas ja 2023. aastal 6 482 m³/ööpäevas. Järve ja Mere arvestuspiirkonnas on olnud nendel aastatel põhjaveevõtt 0 m³/ööpäevas ning Pelgulinna ainult 1-2 m³/ööpäevas.

Tabel 9.1. Tallinna põhjaveemaardlad ja nendes kinnitatud põhjavee tarbevarud ning otstarve (Keskkonnaministri käskkiri 22.11.2015 nr 1042, 25.04.2016 nr 1-2/16/379)

Veekiht	Põhjaveemaardla arvestuspiirkond	Põhjavee tarbevaru, m ³ /ööpäevas	Veevaru kategooria ja otstarve
Kambriumi-Vendi (C-V)	Pelgulinna	1000	T1 Joogivesi
Kambriumi-Vendi (C-V)	Nõmme	8000	T1 Joogivesi
Kambriumi-Vendi (C-V)	Mere	2000	T1 Joogivesi

Kambriumi-Vendi (C-V)	Pirita	2000	T1 Joogivesi
Kambriumi-Vendi (C-V)	Lasnamäe	1200	T1 Joogivesi
Kambriumi-Vendi (C-V)	Haabersti	4000	T2 Joogivesi
Kambriumi-Vendi (C-V)	Järve	2000	T1 Joogivesi
Kambriumi-Vendi (C-V)	Kopli 1	1500	500 T1 Joogivesi / 1000 T1 Tootmisvesi
Kambriumi-Vendi (C-V)	Pirita 1	3500	T2 Joogivesi
Kambriumi-Vendi (C-V)	Mustamäe	6000	T1 Joogivesi
Ordoviitsiumi-Kambriumi (O-C)	Lasnamäe	1000	T2 Joogivesi
Ordoviitsiumi-Kambriumi (O-C)	Nõmme	3500	T1 Joogivesi

10. SOOJUSPUURAUKUDE MÕJU KESKKONNALE, TALLINNA ERIPÄRA

Maasoojuspuuraukude mõju PVK-le on kardinaalselt erinev avatud ja kinniste (vertikaalsete) süsteemide puhul. Avatud süsteemide mõju on oluliselt suurem, kuna toimub aktiivne veevahetus PVK-ga. Mõjutatud saab põhiliselt lokaalne põhjaveetase, kuid on ka oluliselt suuremad riskid põhjavee kvaliteedi muutusteks. Tulenevalt asustuse tihedusest, põhjaveekihtide tihedast kasutusest ning geoloogilisest ehitusest on Tallinnas avatud süsteemi soojuspuurkaevude rajamise võimalused pigem kitsad (Jõelet et al., 2020). Kinniste (vertikaalsete) MSS konstruktsioon on valitud välistamaks soojuskandevadeliku ja põhjaveekihtide segunemist – puuraugud on settelise aluspõhja ulatuses täielikult manteldatud ja mantlitagune tsementeeritud (s.h ka aluskorra lõhenenud ülaosas ning puuraugu põhjast) või on puuraugud täielikult täitematerjaliga täidetud (alt üles) – ning sellest tulenevalt on ka mõjud ja riskid oluliselt väiksemad.

Korrektset projektteeritud ja õnnestunult rajatud kinnise süsteemi puuraukudel on vaid minimaalne mõju põhjaveekihtidele, mis avaldub põhiliselt puuraugu tamponeerimise eel ja on mitte-avariilistes olukordades lühiajaline (puurmuda, rajamise vibratsiooni poolt lahti raputatud kivimosakesed, survetasemete ajutine muutus vee väljapumpamise või sissejuhtimise tõttu). Oht seisneb seega põhiliselt riskis, et puuraugu konstruktsioon ebaõnnestub. Sellisel juhul võib kontuurist hakata põhjaveekihti lekkima soojuskandevadelikku või moodustab ebaõnnestunud tsementatsiooniga/tamponaaziga puurauk vooluteekonna maapinna ja/või erinevate põhjaveekihtide vahel, mille läbi võib kihtide kaitstus reostuse eest kannatada ning nende survetasemed mõjutada saada (vt peatükk 4). Individuaalse kinnise süsteemi puuraugu puhul on risk põhjaveekihi mõjutamiseks kinnise konstruktsiooni tõttu isegi väiksem kui veevõtu jaoks rajatud puurkaevu puhul, küll aga on puurauke vaja rajada tüüpiliselt rohkem kui üks.

Seega on oht statistilist laadi – kümne puuraugu rajamisel Tallinna linnas on oluline mõju põhjaveele väga vähetõenäoline, kümne tuhande puhul on aga risk põhjaveekihtide mõjutamiseks võrdlemisi suur. Põhjavee kaitse perspektiivist avaldub ka lõivsuhe – rajades puuraugud madalamad ei läbi need nii palju veepidemeid ja seega välistavad riski sügavamate veekihtide reostamiseks. Võrreldes sügavamate puuraukudega on neid aga selle võrra vaja rajada oluliselt rohkem, mis suurendab omakorda riski kõrgemate veekihtide reostamiseks.

Keskkonnakaitselised nõuded puuraukude rajamisele lähtuvad põhiliselt eesmärgist kaitsta põhjaveest joogivett ammutavate veehaarete töökorda ja veekvaliteeti, eriti ühisveevärgi kaevude puhul.

Soojuspuuraukudega kaasneb suurem risk veevarustusele, kui need asuvad konkreetse põhjaveehaarde toitealal ning läbivad vastavat põhjaveekihti kaitsvat veepidet. Tallinna linna põhjaveevarusid on viimati hinnanud AS Maves (Tamm ja Pello 2015, 2016) ning ülevaade veehaaretest on toodud ka viimases Tallinna linna ühisveevärgi ja kanalisatsiooni arendamise kavas (AS Infragate Eesti, 2023). Tallinn ammutab oma joogivee ~91 % ulatuses pinnaveest, s.t Ülemiste järvest, kuid ühisveevarustuse põhjaveehaarded, mida leidub kogu Tallinna piires, moodustavad siiski olulise komponendi veetarbimisest (9 %). Hinnanguliselt tarbib 50 000 inimest Tallinna Vesi AS tegevuspiirkonnas puurkaevuvett, mis on valdavalt ammutatud C-V PVK-ist. Eriti oluline on põhjavesi üksikmajapidamiste poolt domineeritud piirkondades: Nõmme linnaosa,

Haabersti linnaosa Tiskre piirkond ja suurem osa Pirita linnaosa Pirita jõe paremkalda piirkonnast s.h Merivälja piirkond (AS Infragate Eesti, 2023).

Tallinnas on kinnitatud põhjaveevarud kokku 35 700 m³/ööpäevas, millest 4 500 m³/ööpäevas on Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekogumis (Keskkonnaministri käskkiri 22.11.2015 nr 1042) ning 31 200 m³/ööpäevas Kambriumi-Vendi põhjaveekogumis (Keskkonnaministri käskkiri 25.04.2016 nr 1-2/16/379). Reaalne tarbimine aga jääb ~8 000 m³/ööpäevas piiresse, millest valdava osa moodustab veevõtt Nõmme arvutuspiirkonnas O-C PVK ja C-V PVK-ist (jaotatud s.h 39 Tallinna Vesi AS kaevu vahel), oluliselt vähemal määral Haabersti ning Pirita arvutuspiirkondade tarbimine C-V PVK-ist (Keskkonnaportaali andmed) ning veel vähem teiste arvutuspiirkondade veehaaretest. O-C PVKi kohal lasuvas Siluri-Ordoviitsiumi Harju põhjaveekogumis ning Kvaternaari Männiku-Pelguranna põhjaveekogumis ei ole põhjaveevarusid kinnitatud (Männiku-Pelguranna põhjaveekogumis kehtisid põhjaveevarud kuni 2015. aastani, kuid neid ei pikendatud; olemasolevad kaevud on reservis või konserveeritud).

Lisaks ühisveevärgi kaevudele on Tallinnas ning eriti selle naaberomavalitsustes ka ohtralt individuaalseid O-C PVK ja C-V PVK-ist toituvaid puurkaeve, mille tõttu on raske välja tuua piirkondi, kus vastavaid kihte läbivad soojuspuurkaevud ei omaks potentsiaalset mõju veevarustusele. Siiski on ühisveevärgi veehaarded võrdlemisi suurema kaitsevajadusega.

Potentsiaalne mõju põhjavee kvaliteedile on kõige akuutsem klindipealsele alale rajatud Ordoviitsiumi regionaalset veepidet (graptoliitargilliiti) läbivate soojuspuuraukude puhul, kuna veepidet rikkuvad puuraugud mõjutavad O-C PVKi efektiivset kaitstust olulisel määral. Tavalisest kõrgendatud riskiga alad on seotud eelkõige Tallinna Vesi AS Nõmme ja Lasnamäe Ordoviitsiumi-Kambriumi veehaaretega ning Harku, Saku ja Jõelähtme vallas ning Maardu linnas. Antud veehaarete toiteala ei ole varasematel põhjaveevarude hindamistel täpsemalt määratletud (Tamm ja Pello 2015, 2016). Kuna kinnitatud põhjaveevarud aga lubavad võrdlemisi suurt veevõttu ning kuna O-C PVK toitumine leiab aset klindipealsel, toimudes suuresti läbi graptoliitargilliidi nõrgudes, on taoline toitumisala hinnanguliselt suur.

C-V PVK on Tallinna piirkonnas kaitstud Lontova kihistu sinisaviga, millel on omadus niiskusega kokku puutudes punduda. Pundunud savi käitub puuraugu ümber tihendina, takistades maapinnalt ja kõrgematest põhjaveekihtidest lähtuva reostuse jõudmist C-V PVK-i, mis mõnevõrra vähendab puuraukude põhjustatud riski antud veekompleksi kvaliteedile. Seevastu on C-V PVK kõige olulisem PVK Tallinna ja lähivaldade veevarustuse seisukohast. Tallinna piires on raske välja tuua alasid, mis ei ole potentsiaalselt C-V kaevude toitealas, olgugi et toitealasid ei ole konkreetselt modelleeritud (Tamm ja Pello 2015, 2016). C-V PVK-i toitumine toimub valdavalt läbi kvaternaarisetetega täidetud ürgorgude; vee filtreerumine läbi sinisavide on marginaalse tähtsusega.

Aluskorda rajatud soojuspuuraukude puhul peab meeles pidama, et aluskorra ülemises osas (s.h murenemiskoorikus) leiduvates lõhekompleksides leviv vesi on hüdrauliliselt seotud C-V PVK-ga. Seega peab aluskorra ülemises osas tsirkuleerivat vett kaitsma samal määral ning Kambriumi-Vendi veekihi mõjutamist vältimaks tuleb aluskorra ülemine lõhesüsteemidega osa veekindlalt sulgeda, kas puuraukude tamponeerimise või piisava sügavuseni manteldamisega, välistamaks veekihi mõjutamist soojuskandvedeliku või ülalt puuraugust lähtuva vee poolt.

Veevarustuse seisukohast on vähem riskantsed klindipealsed soojuspuuraugud, mis on rajatud Ordoviitsiumi kivimitesse, jättes Ordoviitsiumi regionaalse veepideme (graptoliitargilliidi) puutumata. Vähem riskantsed on ka klindialused soojuspuuraugud, mis on rajatud kuni Lontova sinisavi ülemisse ossa, jättes vähemalt 40 m paksuse kihi sinisavi puutumata, seega välistades C-V PVK-i mõjutamise. Kvaternaarisetetes rajatud soojuspuuraugud on samuti vähem riskantsed, v.a juhul, kui need on rajatud ürgorgude sügavatesse kihtidesse, mille kaudu toimub C-V PVK-i toitumine. Eeltoodud vähem riskantsed kaevud on aga võrdlemisi madalad, mille tõttu tuleks neid rajada rohkem, mis omakorda suurendab riski reostuse levikuks ülemistes põhjaveekihtides.

Juhul kui soojuspuurauk põhjustab ebaõnnestunud konstruktsiooni tõttu reostuskolde, väheneb reoainete kontsentratsioon puuraugust põhjavee voolu mõttes allavoolu. Ülesvoolu reostus olulisel määral ei levi. Reostuse leviku ulatus ja seaduspära sõltub kivimite omadustest, reostuse kontsentratsioonist koldes, reoainete omadustest ning põhjavee voolusuunast. Kuna soojuspuuraukude puhul ei ole oodata suuri lisanduva vee vooluhulki, on ühe puuraugu poolt põhjustatud reostuse levik pigem piiratud; riskantsemaks võib lugeda mitme lekkiva kaevu olemasolu.

Allikad Tallinna linnas ja selle lähiümbruses on põhiliselt seotud klindianguga, kus langeallikates väljub maapinnale klindiangust lõunasuunas leviva kuid astangul välja kiiluva Ordoviitsiumi või O-C PVK-ide vesi. Ohtu allikate veekvaliteedile või vooluhulgale võib põhjustada soojuspuurkaevude rajamine allikate toitealasse neist ülesvoolu. Konkreetsete toitealade täpsem määratlemine eeldab põhjaveevoolu numbrilist modelleerimist ja jääb käesoleva töö mahust välja. Mõju on üldiselt lühiajaline (nt ajutinehägususe tõus puurimise tõttu) ning möödub kiirelt pärast puuraugu valmimist. Korrektselt rajatud puuraugu puhul ei ole oodata pikaajalist mõju, v.a konstruktsiooni ebaõnnestumise puhul, mil puhul võib allikat toitva PVK-i vesi seguneda ülemiste PVK-ide ja pinnaveega. Ka sel juhul on mõju pigem vähene ja lokaalne, arvestades võimalike vooluhulkade väiksust.

Teatud riski PVK-i veekvaliteedile võivad põhjustada ka Lontova sinisavist koosnevad Kambriumi regionaalset veepidet läbivad puuraugud vahetult mere ääres, mille tõttu võib suurened risk merevee poolt mõjutatud pinnavee või pindmise põhjavee sattumiseks C-V PVK-i. Taoline risk realiseerub, kui mererannale lähedale rajatud maasoojuspuurauk või selle ümbrus ujutatakse tormide tõttu üle või kui merevesi on sisse tunginud pinnakatte PVK-i ning veekihtide isoleerimine on puuraugu rajamisel ebaõnnestunud. Veehaaretele avalduvat riski vähendab asjaolu, et C-V PVK voolusuund on maismaalt mere suunas, mille tõttu ei ole selle mehhanismi läbi oodata mõju maasoojuspuuraukudest maismaa suunas paiknevate veehaarete kvaliteedile. Riskantne piirkond ühtib üldiselt mereäärse ehituskeeluvööndiga, mis katab Tallinna piires sagedased üleujutusala ja 50 m laiuse puhvri mererannast maismaa suunas.

11.ETTEPANEKUD SOOJUSPUURAUKUDE RAJAMISE REGULEERIMISEKS TALLINNA ERINEVATES PIIRKONDADES

Soojuspuuraukude maksimaalne ohutu sügavus Tallinnas (väljundiks soojuspuurangu rajamise kitsenduste kaart) elektroonilistes lisades.

Kitsenduste kaardil on kajastatud:

- Kinnitatud joogiveevarude paiknemise sügavuse kaart;
- Soojuspuurangu rajamise suurimad lubatud sügavusvahemikud 5 või 10 m täpsusega;
- Puurkaevude sanitaarkaitsealad;
- Ühisveevarustuse puurkaevude 200 m puhvertsoon;
- Kinnitatud joogiveevarude (C-V kogu Tallinn, O-C Nõmme ja Lasnamäe) paiknemise sügavuse kaart;
- Kinnismälestiste kaitsevööndid ja muinsuskaitsealad;
- Kaitstavad loodusobjektid ja kaitsealad;
- Tallinna kaugküttepiirkonnad.

Kaardil kajastatud kihid on:

- Klindijoon.shp – sisaldab Tallinna klindijoont, mis on loodud osalt 1:50 000 geoloogilise baaskaardi aluspõhja andmete ja osalt MARU reljeefvarjutuse kaardi järgi.
- YhisvvPK.shp – Tallinna ühisveevärgi puurkaevude asukohad (koordinaadid Tallinna puurkaevude inventariseerimise aruandest).
- PiiranguAlad.shp – 450 m raadiusega puhveralad ühisveevärgi puurkaevudest, kus rakenduvad maasoojuspuurkaevu rajamise sügavusest sõltuvad lisanõuded.
- Puhver250m.shp – 250 m raadiusega puhveralad ühisveevärgi puurkaevudest, kus rakendub maasoojuspuurkaevu rajamisel hüdrogeoloogilise uuringu nõue.
- Kaugküttepiirkonnad.shp – Tallinna kaugküttepiirkonnad.

Lisaks kaardi uuendamiseks vajalikud, kuid mitte nähtavad kihid:

- Lontova_40.shp – 450 m puhveralade sügavuse info klindi all (maapinnast Lontova sinisavi lamamini -40 m).
- Tyrisalu.shp – 450 m puhveralade sügavuse info klindi peal (maapinnast Türisalu lasumini).
- Puhver200m.shp - 200 m raadiusega puhveralad ühisveevärgi puurkaevudest.
- O-C_z.shp - kinnitatud joogiveevarude paiknemise sügavus O-C Nõmme ja Lasnamäe.
- C-V_z.shp - kinnitatud joogiveevarude paiknemise sügavus C-V kogu Tallinn.

Kitsenduste kaardil kasutatud ülejäänud kihid on kättesaadavad Maaameti wms/wfs teenustest või genereeritud sealt saadud andmete põhjal:

1. Tallinna piir.
2. EELISE kihid (<https://gsavalik.envir.ee/geoserver/eelis/ows?>):
 - Puurkaevude veehaarde sanitaarkaitsealad
 - Ülemiste järve veehaarde sanitaarkaitseala
 - Ranna või kalda piirangu vöönditest: ehituskeeluvöönd ja korduv üleujutusala
 - Looduskaitse vööndid (kaitstava loodusobjekti piirangud, vääriselupaik)
 - Muinsuskaitse vööndid

Kaugus kinnistu piirist (nii vertikaalne kui ka horisontaalne kontuur

Kohalik omavalitsus määrab kauguse kinnistu piirist tavaliselt ehitusmääruse või detailplaneeringuga. Vertikaalse ja horisontaalse kontuuri kauguse piiramine kinnistu piirist võiks kõne alla tulla samadel alustel kui ehitistele. Soovituslik oleks lähtuvalt Euroopa muude riikide praktikast kasutada ≥ 10 m.

Kaugus hoone välispiirist

Väliskontuuride mõju ehitistele korrektse ekspluateerimise korral on olematu ning ka ehitustehniliselt pole väga lähedale hoonele kontuure rajada mõistlik. Ka teiste Euroopa riikide juhendid tuginevad üldistele ehitusnormidele ning kaugust hoonestest ei reguleeri.

Kaugus naaberkinnistu soojuspuuraugust

Üldiselt seda valdkonda Euroopas seaduse tasemel reguleeritud pole, kuid mitmed Euroopa riikide juhendid annavad selleks piiriks 10-20 m ning arvestades soojuspuuraukude eluea pikenemist on kasvanud ka mõjuraadius, mistõttu oleks lähtuvalt uuringutest (Fasci et al., 2019; Jõelet et al., 2020) vajalik miinimumkauguse kehtestamine. Tallinnas, kui tiheasustusega alal peaks minimaalse soojuspuuraugu kauguse naaberkinnistu soojuspuuraugust kehtestama vähemalt 20 m kaugusele.

Kaugus puu vertikaalprojektsioonist maapinnal

Peaks lähtuma standardi EVS 939-3:2021 Puittaimed haljastuses osa 3 nõuetest. Juurestiku kaitseala meetrites võrdub puu rinnasmõõt (cm) korrutatud 0,12-ga kaevetõid taluva puu korral. Juurestiku kaitseala on üldjuhul suurem kui puuvõra välispiir, mistõttu võiks lähtuda sellest. Sama piirang on kajastatud ka Tallinna kaevetööde eeskirjas.

Kaugus hooldusalaga puurkaevust ja salvkaevust

Lähtuvalt sellest, et puuraugu puurimine vajab enda ümber puurimisplatsi, siis võiks kauguse hooldusalast reguleerida sellest lähtuvalt. Näiteks, et puurimisplatsi kaugus puurkaevust või salvkaevust on minimaalselt 5 m juhul ja puurauku ei tohi puurida hooldusalasse. Ekspluatatsioonialal on hooldusala ise piisav.

Veehaarde ja põhjaveekihi kaitsest tulenevad piirangud

Veehaarde seisukohast on kõrgendatud riskiga soojuspuuraugud, mis läbivad Tallinna piirkonnas veevarustuseks olulisi PVK-e ning neid maapinnalt lähtuva reostuse eest kaitsvaid veepidemeid. Piirangute soovitusel olenemata puuraugu sügavusest ja kehtivast seadusandlusest lähtuvalt on välja toodud tabelis 11.1. Lisaks tabel 11.1. väljatoodud piirangutele on toodud välja ka soovitusel piirkondlikele lisapiirangutele (tabelid 11.2-11.4). Visuaalselt on tingimusi võimalik kontrollida digitaalselt kaardilt „Soojuspuuraukude rajamise suurimad lubatud sügavusvahemikud 5 või 10 m täpsusega“ mille kuvatõmmis asub joonisel 11.1. O-C PVK-i kaitsev veepide moodustub suuresti Ordoviitsiumi ladestu Türisalu kihistu graptoliitargilliidist, C-V PVK-i kaitsev veepide koosneb Tallinna piirkonnas ~70 m paksusest Kambriumi ladestu Lontova ja Lükati kihistute sinisavist. Sinisavi äärmiselt heade vettpidavate omaduste ja paksuse tõttu piisab C-V PVK-i efektiivseks kaitsmiseks ka sellest, kui puutumata jäetakse 40 m paksune kiht sinisavi (Lontova kihistu alumises osas ehk Sämi kihis võib esineda liivakihte, mis võivad olla C-V PVK-ga hüdrauliselt seotud).

Välisdamaks põhjaveekihtide ja pinnavee segunemise, peavad kinnise süsteemi soojuspuuraugud, mis ei ole kogu ulatuses veekindlalt täidetud, olema kogu settelise kivimkompleksi ulatuses manteldatud (k.a. aluskorra ülemises lõhelises osas ning põhjast). Puurimismeetod peab olema valitud taoline, et mantli välisdiameetri ja puuraugu kogudiameetri vahe oleks 50 mm või enam ning see ruum peab olema suunaga alt üles veekindlalt täidetud (tsement või savisegu) nagu kirjeldatud keskkonnaministri 09.07.2015 määruses nr 43, §9.

Aluskorra soojuspuuraugud peavad olema settelises kompleksi täies ulatuses manteldatud. Sügavamale ulatuvate puuraukude puhul peab mantel ulatuma ka vähemalt 5 m aluskorra pinnast sügavamale monoliitsesse aluskivimisse. Välisdamatud peab olema aluskorra ülemises lõhelises osas ringleva C-V PVK-iga hüdrauliliselt seotud põhjavee mõjutamine. Selle jaoks võib olla vajalik mantel viia ka sügavamale kui 5 m aluskorra pinnast või tuleb aluskorra lõhed muul moel veekindlalt täita. Konkreetsete nõuded määratakse projekteerimisel. Aluskorra puurauke ei ole kohustuslik tagasitäita (tamponeerida).

Avatud süsteemi soojuspuuraugud on oluliselt suurema mõjuga põhjaveekihtide režiimile ja veekvaliteedile kui kinnised. Tallinna piires tuleb tulenevalt asustustihedusest avatud süsteemi maasoojuspuuraukude rajamisel eelnevalt teostada hüdrogeoloogiline eksperthinnang, mis hindab nende mõju vastava põhjaveekihi veetasemele ning -kvaliteedile, s.h sellest toituvatele veehaaretele ning teistele soojuspuuraukudele.

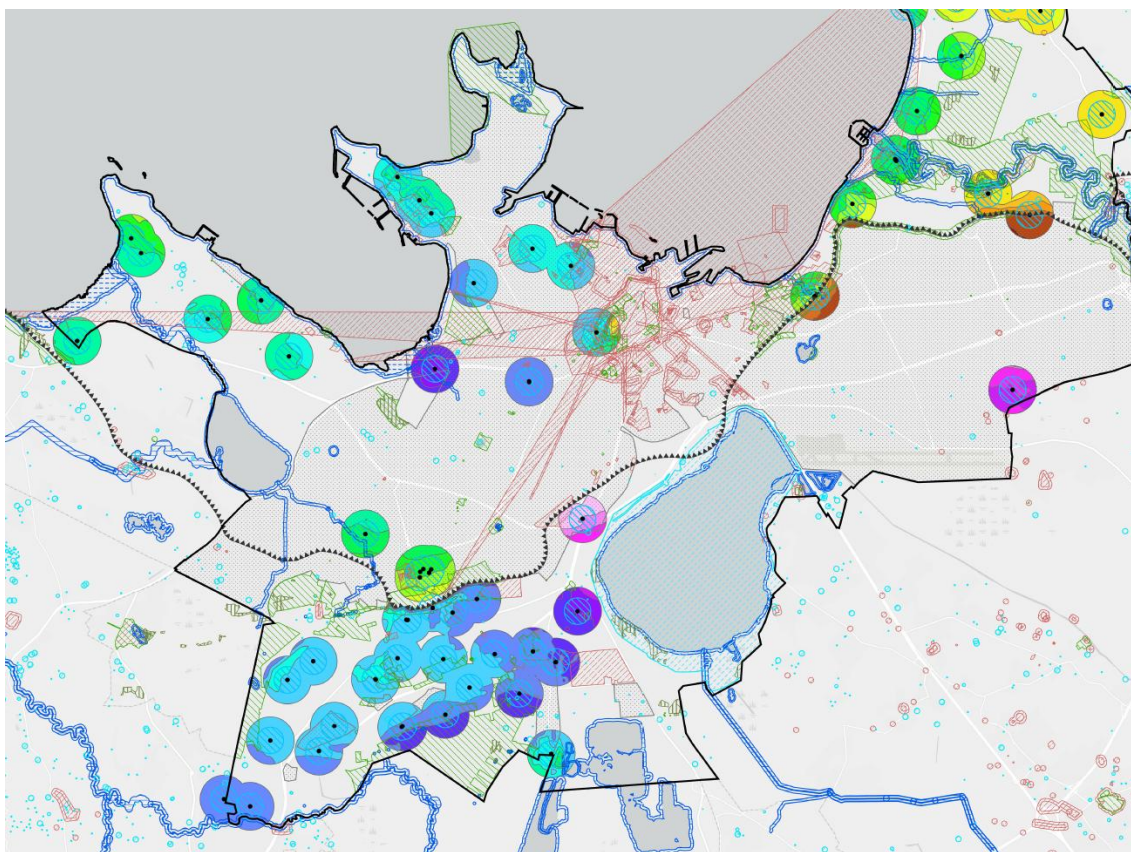
Tabel 11. 1. Soovitused kogu Tallinnas olenemata puuraugu/kaevu sügavusest

	Piirang/nõue	Piirangu põhjendus
Avatud süsteem	Soojuskaevude rajamisel tuleb eelnevalt teostada hüdrogeoloogiline eksperthinnang, mis hindab nende mõju vastava põhjaveekihi veetasemele ning -kvaliteedile	Avatud süsteemi puurkaevud on oluliselt suurema mõjuga põhjaveekihtide režiimile ja veekvaliteedile kui kinnise süsteemi puuraugud. Tiheda asustusega piirkonnas nagu Tallinn tuleb nende mõju väga selgelt hinnata.
Kinnine süsteem	Puuraugud peavad olema kas veekindlalt (alt üles suunaga) taastäidetud või kogu settelise kivimkompleksi ulatuses manteldatud (k.a. aluskorra ülemises lähelises osas ning põhjast).	Kinnine konstruktsioon tagab põhjaveekihi võimalikult vähese mõjutatuse puuraugu poolt..
	Puurimismeetod peab olema valitud taoline, et mantli välisdiameetri ja puuraugu kogudiameetri vahe oleks 50 mm või enam ning see ruum peab olema suunaga alt üles veekindlalt täidetud (tsement või savisegu)	Nõue tagab, et manteldatud puuraukude mantlitagune ruum oleks kvaliteetselt täidetud ning ei tekiks vooluteekondi, mille kaudu saaks põhjaveekihid ja pinnavesi seguneda.
Puur- või salvkaevu hooldusala	Tuleb välistada olemasoleva puurkaevu konstruktsiooni kahjustumine või kui tegemist on olmeveekaevuga, siis kaevu veekvaliteedi pikemaajaline mõjutamine. Hinnatakse projekteerimise käigus.	Veeseadus §154. Keelatud tegevus, mis võib ohustada põhjaveekihi vee omadusi.
Veehaarde sanitaarkaitseala	Soojuspuuraukude rajamine keelatud.	Veeseadus §151. Majandustegevus keelatud v.a. erandid.
Veekogu ehituskeeluvöönd	Soojuspuuraugu rajamine üldiselt keelatud, v.a. Looduskaitseaduses sätestatud eranditega.	Looduskaitseadus §38.
Maastikukaitseala, looduskaitseala, muinsuskaitseala, muu piiranguvöönd	Piirangud vastavalt piiranguvööndi kaitse eesmärkidele.	

O-C PVK kiildub Tallinnas klindiasangul või sealt mõnel määral mere suunas välja ning see omab seega praktilist väärtust veevarustuse jaoks vaid lõuna pool klindiasangut. Klindiasang on käesolevas töös määratud vastavalt:

- Maa- ja Ruumiameti lidar-põhisel 1 m resolutsiooniga kõrgusmudelil ja reljeefikaardil eristuva klindiasanguga, kui see on üheselt määratav (ei ole liialt lauge);
- vastasel juhul Eesti Geoloogiateenistuse 1 : 50 000 mõõtkavas geoloogilisel baaskaardil toodud Toila kihistu (s.t lubjakivide kivimkompleksi) lamami avamusjoonega. Siin ei arvestatud klinti lõikuvaid aluspõhja orge, s.t nende mõlema nõlvani ulatuvad Toila kihistu lamami avamusjooned ühendati risti üle orgude.

Kuigi lubjakivide avamuspiir ei vasta O-C PVK-i või sellel lasuva veepideme (Türisalu kihistu) avamustele, on lubjakivide avamusest mere pool O-C PVK vähesel praktilisel kasutusega ning sealse graptoliitargillitise veepideme efektiivsus on juba looduslikult nõrgestatud, mille tõttu ei suurenda soojuspuuraukude rajamine enam sama olulisel määral PVK-ile avalduvat reostusriski. Samuti, kuna klindiasangu lähedal on Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjavee voolusuund mere suunas (väljub allikatena klindiasangu all), ei ohusta soojuspuuraukudest lähtuda võiv reostus ülesvoolu (klindiasangust lõuna suunas) asuvaid veehaardeid. Piirangute soovitusel klindiasangu alusele piirkonnale on välja toodud tabelis 11.2.



Joonis 11.1. Soojuspuuraugu rajamise suurimad lubatud sügavusvahemikud 5 või 10 m täpsusega

Veehaarete kaitsest tulenevad lisanõuded ja piirangud rakenduvad maasoojuspuurkaevudele, kui need rajatakse ühisveevärgi veehaarde lähedale ning kui need läbivad veehaaret toitvat PVK-i või seda PVK-i kaitsvat veepideme kihti:

- ühisveevärgi O-C PVK puurkaevude lähistel rakenduvad lisanõuded, kui soojuspuurauk läbib Türisalu kihistu (graptoliitargilliidi) lasumit;
- ühisveevärgi C-V PVK lähistel rakenduvad lisanõuded, kui soojuspuurauk läbib Lontova kihistu (sinisavi) lamamist 40 m kõrgusele jäävat pinda.

Avatud süsteemi soojuspuurauke ei tohi kasutada PVK-des, mis on olulised Tallinna ühisveevärgi veevarustusele, s.t klindipealsel (eelmises alapeatükis kirjeldatud klindijoonest lõunas) O-C PVK-s (või seda kaitsvas graptoliitargilliidi lasundis) ning C-V PVK-s. Klindialusel (klindijoonest põhjas), kus O-C PVK kiildub välja ja ei ole veevarustuse seisukohast oluline, ei ole lubatud kasutada avatud soojuspuurauke C-V PVK-is või seda kaitsva sinisavi lasundi alumises 40 m paksuses kihis.

Tabel 11.2 Piirangute soovitusel klindiasangu alusele Tallinnale

Sügavus millest piirang rakendub	Piirang/nõue	Piirangu põhjendus
Sügavustele alates 40 m Lontova kihistu sinisavi lamamist või Türisalu graptoliitargilliidi lasumist.	Avatud süsteemi soojuspuurkaevud keelatud. Kinnise süsteemi soojuspuuraukude rajamisel tuleb kasutada biolagunevaid soojuskandevedelikke.	Joogivee jaoks nõnda tähtsates põhjaveekompleksides nagu Tallinna piires levivates on O-C ja C-V on avatud süsteemi soojuspuurkaevud liiga suure potentsiaalse mõjuga veehaaretele. Biolagunevad soojuskandevedelikud vähendavad reostuse poolt tekitatud riski ja selle kestvust, kui mõne soojuspuurangu kontuur peaks lekkima.

Kui soojuspuurauk läbib O-C PVK-i või C-V PVK-i kaitsvat veepidet ning asub vastavast PVK-ist toituvast ühisveevärgi puurkaevust vähem kui 450 m kaugusel, kehtivad lisanõuded, mis on esitatud tabelis 11.3. Veelgi rangemad tingimused rakenduvad puuraukudele, mis on lähemal kui 250 m ühisveevärgi põhjaveehaardest (tabel 11.4.).

Tabel 11.3 Piirangute soovitused <450 m ühisveevärgi põhjaveehaardest

Sügavus millest piirang rakendub	Piirang/nõue	Piirangu põhjendus
Põhjaveehaardele vastav põhjaveekiht ja seda kaitsev veepide	Projekteerimisel tuleb valida puurimismeetodid, mis minimeerivad ajutist mõju (nt hägususe suurenemist) põhjaveehaarde veekvaliteedile. Konkreetsest tuleb vältida löökpuurimise (n. DTH) kasutamist.	Löökpuurimine (DTH) võib lähipiirkonna kivimitest lahti raputada kivimiosakesi, mis võivad koos põhjaveega jõuda veehaardesse, suurendades seal hägusust. Kui soojuspuurauke rajatakse palju, võib ka taoline ajutine häiring kesta reaalsuses pikaajaliselt.
	Veehaarde haldajat tuleb tööstest teavitada ning veekvaliteedi halvenemisel tuleb töö peatada ning võtta vastu vajalikud meetmed, et veekvaliteet taastuks.	Puurimisel tekkivad ajutised mõjud ümbruskonna veehaardetele võivad paljude puuraukude järjestikusel rajamisel olla ka pikema iseloomuga, mille tõttu tuleb ka ajutisi mõjusid ühisveevärgi lähistel vähendada.
	Soojuspuurangu rajamise järelvalvet ei tohi teostada omanik, vaid soojuspuuraukude rajamise valdkonnas hüdroteoloogiliste tööde tegevusluba omav ettevõtte.	Järelvalve karmistamine annab lisanduva kindluse, et puuraugud rajatakse korrektselt.

Tabel 11.4 Piirangute soovitusel <250 m ühisveevärgi põhjaveehaardest

Sügavus millest piirang rakendub	Piirang/nõue	Piirangu põhjendus
Põhjaveehaardele vastav põhjaveekiht ja seda kaitsev veepide	Kinnise soojuspuuraugu rajamise võimalikkuse hindamiseks tuleb eelnevalt läbi viia piirkonna hüdroteoloogiline eksperthinnang, kus määratakse põhjaveehaarde toiteala (10 a pikkuse perioodi kohta), analüüsitakse juba olemasolevate soojuspuurkaevude tulemusel toimunud võimalikke veekvaliteedi muutusi veehaardes, hinnatakse riski veehaardele ning koostatakse veehaarde põhjavee kvaliteedi seirekava. Hinnang peab arvestama kõigi olemasolevate ja alale planeeritavate soojuspuuraukude koosmõju.	Soojuspuuraukude arvu suurenedes ei saa ka parimat võimalikku tehnoloogiat kasutades välistada riski, et mõnede puuraukude konstruktsioon (puuraugu tsemendiga täitmine või mantlitaguse ruumi täitmine) ebaõnnestuks. Seega ei saa välistada riski, et põhjaveekihti kaitsva veepideme efektiivsus kannataks ning tekiks vooluteed pinnavee ja erinevate põhjaveekihtide vahel, mis võib halvendada põhjaveekihi omadusi. Põhjaveekihi omadusi ja veepideme efektiivsust ei saa hiljem praktilisel moel parandada, seega kui risk realiseerub, on ainus võimalus veevarustus ümber korralda teiste veehaardete baasil.

Muud soovitusel ja tingimused soojuspuuraukude rajamiseks

Soojuspuuraugule peaks määrama kaitseala ehk hooldusala, mis tagab tehnikavahendite juurdepääsu. Soojustorustiku kaugus septikust peaks olema vähemalt 3 m, kogumismahutist 5 m, filtriväljakust, biotiigist, avaveelisest märgalast ja imbeväljakust vähemalt 10 m.

Ettepanekud lisauuringuteks

Hinnata numbrilise hüdroteoloogilise modelleerimise teel Tallinna ühisveevärgi puurkaevude toitealasid O-C ja C-V PVK-ides, et täpsemalt hinnata alasid, kus vastavaid veekihte läbivatest soojuspuurkaevudest lähtuv reostus võib potentsiaalselt sattuda ühisveevärgi veehaardesse.

Hinnata ebaõnnestunud konstruktsiooniga soojuspuuraugust/aukudest lähtuva reostuse võimalikku kontsentratsiooni ja hulka ning numbrilise põhjaveevoolu modelleerimise teel selle transporti, difusiooni ning kontsentratsioonide muutumist reostuspunktist allavoolu Tallinna piirkonna O-C ning C-V PVK-ides, et hinnata täpsemalt soojuspuuraukude poolt tekitatava riski ulatust.

12. KIRJANDUS

1. Aldenius, E. (2017). Lunds Geotermisystem, en utvärdering av 30 års drift. Bachelor's Thesis in Geology at the University of Lund.
2. Alsaleh M, Chen T, Abdul-Rahim AS. (2024). A revisit to the relationship between geothermal energy growth and underground water quality in EU economies. *Environ Technol.* 2024 Mar;45(7):1271-1289.
3. Andersson, O. (2021). The ATES Project at Stockholm Arlanda Airport - Technical Design and Environmental Assessment, SWECO Environment AB.
4. Andersson, O. and Gehlin, S. (2018). State-of-the-Art: Sweden. Quality Management in Design, Construction and Operation of Borehole Systems. A work document prepared within IEA ECES Annex 27.
5. Angelotti, A., & Sterpi, D. (2024). Shallow geothermal systems in dense urban areas: The issue of thermal interference and long-term sustainability. *E3S Web of Conferences*, 523, 05001.
6. Anora Group Oy. Vaadatud 30. septembril 2025, <https://anoraindustrial.com/en/>
7. Arola, T., Luoma, S., Korhonen, K., Jarva, J., Leppäharju, N. And Hagström, M. (2021). Energiakaivon asennus ja käyttö – Ympäristöriskitarkastelu. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 17/2021.
8. AS Infragate Eesti. (2023). Tallinna linna ühisveevärgi ja -kanalisatsiooni arendamise kava aastateks 2023-2034. Töö nr. 196-21 (TKK3). Seletuskiri. Tallinn.
9. Baisch. S. jt. (2009). Deep Heat Mining Basel - Seismic Risk Analysis – (SERIANEX).
10. Bloemendal, M., Hartog, N. (2018). Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low- temperature ATES Systems. *Geothermics* Volume 71, January 2019, Pages 306-319.
11. Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 56(2), 81–122.
12. Charléty. J., Cuenot N., Dorbath L., Dorbath C., Haessler H., Frogneux M. (2007). Large earthquakes during hydraulic stimulations at the geothermal site of Soultz-sous-Forêts, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 44, Issue 8, 2007, Pages 1091-1105.
13. Di Donna, A., & Laloui, L. (2015). *Energy geostructures: Innovation in underground engineering*. Wiley-Blackwell.
14. Directive 2000/60/EC. Water Framework Directive. European Parliament and Council.

15. Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast). Official Journal of the European Union, L 231/1.
16. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources. Official Journal of the European Union, L 2023/2413.
17. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal L 327*, 22/12/2000 P. 0001 - 0073
18. Drews, M.C., Hofstetter, P., Zosseder, K. et al. (2020). Predictability and controlling factors of overpressure in the North Alpine Foreland Basin, SE Germany: an interdisciplinary post-drill analysis of the Geretsried GEN-1 deep geothermal well. *Geotherm Energy* 8, 20.
19. Earth Energy Designer, (EED). Vaadatud 30. septembril 2025, <https://buildingphysics.com/eed-2>
20. EELIS (Eesti Looduse Infosüsteem). Keskkonnaamet, Vaadatud 30. septembril 2025. <https://www.keskkonnaagentuur.ee/eelis>
21. Eesti põhjavee kasutamine ja kaitse. (2004). Põhjavee Komisjon, Tallinn.
22. Eesti Vabariik. Ehitusseadustik. RT I, 05.03.2015, 1.
23. Eesti Vabariik. Veeseadus. RT I, 08.07.2025, 70.
24. Eesti Vabariik. Majandus- ja taristuministri 05.06.2015 määrus nr 57. „Ehitise tehniliste andmete loetelu ja arvestamise alused“. RT I, 14.05.2024, 3.
25. Eesti Vabariik. Keskkonnaministri 09.07.2015 määrus nr 43. „Nõuded salvkaevu konstruktsiooni, puurkaevu või -augu ehitusprojekti ja konstruktsiooni ning lammutamise ja ümberehitamise ehitusprojekti kohta, puurkaevu või -augu projekteerimise, rajamise, kasutusele võtmise, ümberehitamise, lammutamise ja konserveerimise korra ning puurkaevu või -augu asukoha kooskõlastamise, ehitusloa ja kasutusloa taotluste, ehitus- või kasutusteate, puurimispäeviku, salvkaevu ehitus- või kasutusteate, puurkaevu või -augu ja salvkaevu andmete keskkonnaregistrisse kandmiseks esitamise ning puurkaevu või -augu ja salvkaevu lammutamise teatise vormid“. RT I, 14.07.2015, 1.
26. Eesti Vabariik. Keskkonnaministri 01.10.2019 määrus nr 48. „Põhjaveekogumite nimekiri ja nende eristamise kord, seisundiklassid ja nende määramise kord, seisundiklassidele vastavad keemilise seisundi määramiseks kasutatavate kvaliteedinäitajate väärtused ja koguselise seisundi määramiseks kasutatavate näitajate tingimused, põhjavett ohustavate saasteainete nimekiri, nende sisalduse läviväärtused põhjaveekogumite kaupa ja kvaliteedi piirväärtused põhjavees ning taustataseme määramise põhimõtted“. RT I, 02.10.2019, 5.

27. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu määrus 2024/573, 7. 02.2024 milles käsitletakse fluoritud kasvuhoonegaase ning millega muudetakse direktiivi (EL) 2019/1937 ja tunnistatakse kehtetuks määrus (EL) nr 517/2014
28. EVS-EN 17522:2023. Geothermal applications - Grouted borehole heat exchangers - Design and construction.
29. EVS 939-3:2021. Puittaimed haljastuses. Osa 3: Kasvukoha tingimused. Haljasala täiendamine ja kaitse.
30. Fan, Y., Dai, C., Lei, H., & Ma, F. (2023). Structural optimization of underground pipe network for geothermal heat extraction. World Geothermal Congress.
31. Fasci, Maria Letizia, Lazzarotto, Alberto, Acuna, José & Claesson, Joachim. (2019). Analysis of the thermal interference between ground source heat pump systems in dense neighborhoods, Science and Technology for the Built Environment, 25(8), 1069–1080.
32. Gehlin, S. (2015). Riktlinjer för Termisk Responstest (TRT). Svenskt Geoenergicentrum.
33. Gehlin, S., Andersson, O., Rosberg J-E. (2022). Geothermal Energy Use, Country Update for Sweden. European Geothermal Congress 2022.
34. GEOENEST projekti kodulehekülg. Vaadatud 30. septembril 2025, <https://www.egt.ee/uuringud-ja-projektid/maapoueresursid/geoenest>
35. Haehnlein, S., Bayer, P., & Blum, P. (2010). International legal status of the use of shallow geothermal energy. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 (9), 2611–2625.
36. Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G. and Blum, P. (2013). Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. Energy Policy, 59, 914-925.
37. Ignatowicz, M., Acuña, J., Melinder, Å. and Palm, B. (2015). Investigation of ethanol based secondary fluids with denaturing agents and other additives used for borehole heat exchangers. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015, 1–10.
38. Ignatowicz, M., Mazzotti, W., Melinder, Å. and Palm, B. Different ethyl alcohol secondary fluids used for GSHP in Europe. In: 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam, 1–12.
39. Jõelet, A. (2007). Soojuspuuraukude mõju keskkonnale. Tartu Ülikool.
40. Jõelet, A., Gaškov, M. ja Polikarpus, M. (2012). Soojussüsteemi puurkaevu ja -augu mõju põhjavee ja pinnase füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes. Tartu Ülikool, Ökoloogia ja Maateaduste Instituut, Geoloogia osakond.
41. Jõelet, A. ja Paat, R. (2020). Maasoojussüsteemide rajamisega seotud seadusandlik regulatsioon ja selle muutmise vajadus. Tartu Ülikool. KIK projekt 17523.

42. Juvonen, J. and Lapinlampi, T. (2013). Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöministeriö, Helsingi.
43. Karro, E., Uppin, M. (2013). The occurrence and hydrochemistry of fluoride and boron in carbonate aquifer system, central and western Estonia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185: 3735–3748.
44. Kerme, Fung, Saghir. (2023). Performance Optimization of Double U-Tube Borehole Heat Exchanger for Thermal Energy Storage. *Wiley Online Library*.
45. Keskkonnaportaali. Vaadatud 30. septembril 2025, <https://keskkonnaportaali.ee>
46. Kildjer, P., Aaloe, A. ja Põldvere, A. (toim.). (2017). Puurija käsiraamat. Eesti Geoloogia Selts.
47. Maasoojus OÜ, Vaadatud 30. septembril 2025, www.maasoojus.ee
48. Madalmaade Kuningriik. Mijnbouwwet. Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden, 2003.
49. Madalmaade Kuningriik. Omgevingswet. Staatsblad van het Koninkrijk der Nederlanden, 2016.
50. Majuri, P. (2016). Ground source heat pumps and environmental policy—The Finnish practitioner's point of view. *Journal of Cleaner Production*, 139, 740-749.
51. Majuri, P. (2018). Technologies and environmental impacts of ground heat exchangers in Finland. *Geothermics*, 73, 124-132.
52. Majuri, P., Kumpula, A. and Vuorisalo, T. (2020). Geoenergy permit practices in Finnish municipalities – Challenges with good governance. *Energy Strategy Reviews*, 32, 1–12.
53. Majuri, P., Arola, T., Kumpula, A. and Vuorisalo, T. (2021). Geoenergy permits in Finnish regional administration – Contradictory practices and inadequate judicial regulation. *Renewable Energy*, 168, 151-159.
54. Marandi, A., Osjamets, M., Polikarpus, M., Pärn, J., Raidla, V., Tarros, S., Vallner, L. (2019). Põhjaveekogumite piiride kirjeldamine, koormusallikate hindamine ja hüdrogeoloogiliste kontseptuaalsete mudelite koostamine. Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere. Eesti geoloogiafond 9110.
55. Marandi, A., Karro, E., Osjamets, M., Polikarpus, M., & Hunt, M. (2020). Eesti põhjaveekogumite seisund perioodil 2014-2019. Eesti Geoloogiateenistus, Rakvere.
56. Maves AS (2012). Geotermilise energia kasutamise võimalused Tartus. Maves AS.
57. Mock, J., Tester, J., Wright P. (1997). GEOTHERMAL ENERGY FROM THE EARTH: Its Potential Impact as an Environmentally Sustainable Resource. *Annual Review of Energy and Environment* 1997. 22:305–56.

58. Nordell, B., Andersson, O., Rydell L, Liuzzo, Scorpo A. And Carlsson, B. (2016). Long-term Evaluation of Operation and Design of the Emmaboda BTES. Operation and Experiences 2010–2015. Water Resources Engineering. Luleå University of Technology, Research Report.
59. Nordic GeoEnergy – “Geothermal Energy Use in Nordic Urban Areas”, 2020.
60. Normbrunn - 16. Vägledning för att borra brunn. Sveriges geologiska undersökning, 2016.
61. Olgun, C.G., Ozudogru, T.Y., Abdelaziz, S.L. et al. (2015). Long-term performance of heat exchanger piles. *Acta Geotech.* 10, 553–569.
62. Olsson, J. (2023). VOLVOFABRIKEN SOM VÄXLAT TILL BORRHÅL. *Svensk Geoenergi* nr. 2 2023.
63. OÜ Inseneribüroo Steiger. (2023). Kvaternaari põhjavee geotermaalenergia potentsiaali eeluuring. Seletuskiri. Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, Tallinn.
64. Perens, R., Savitski, L., Savva, V., Jaštšuk, S., & Häelm, M. (2012). Põhjaveekogumite piiride kirjeldamine ja põhjaveekogumite hüdrogeoloogiliste kontseptuaalsete mudelite koostamine. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn. EGF 8450.
65. Perens, R. & Vallner, L. (1997). Water-bearing formation. *Kogumikus: Geology and Mineral Resources of Estonia (toimetajad) Raukas, A., Teedumäe, A.* Estonian Academy Publishers, Tallinn, 137–145.
66. Piipponen, K., Martinkauppi, A., Korhonen, K., Vallin, S., Arola, T., Bischoff, A. and Leppäharju, N. (2022). The deeper the better? A thermogeological analysis of medium-deep borehole heat exchangers in low-enthalpy crystalline rocks. *Geothermal Energy*, 10, 1-20.
67. Pockelé, L., Mezzasalma, G., Righini, D., Vercruysse, J., Cicolin, F., Cadelano, G., Galgaro, A., Dalla Santa, G., De Carli, M., Emmi, G., Mendrinos, D., Pasquali, R., & Bernardi, A. (2021). Innovative Coaxial Heat Exchangers for Shallow Geothermal. *World Geothermal Congress*.
68. Poratek. Vaadatud 30. septembril 2025, <https://poratek.fi/fi/poratek/>
69. Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law'). *Official Journal of the European Union*, L 243/1.
70. Rosberg, JE., Erlström, M. (2019). Evaluation of the Lund deep geothermal exploration project in the Romeleåsen Fault Zone, South Sweden: a case study. *Geotherm Energy* 7, 10.
71. Salhein, K., Kobus, C.J., & Zohdy, M. (2024). Heat Transfer Performance Factors in a Vertical Ground Heat Exchanger.

72. SEPA WAT-SG-75: Geothermal Energy Scottish Environment Protection Agency. (2022). WAT-SG-75: Sector specific guidance: Geothermal energy.
73. Stichting Infrastructuur Kwaliteitsborging Bodembeheer SIKB. Vaadatud 30. septembril 2025, <https://www.sikb.nl/index>
74. Soesoo, A., & Aaloe, A. (toim). (2010). Tallinna geoloogia / Geology of Tallinn (pp. 1–286). TTÜ Geoloogia Instituut.
75. Soojuspumba Liit. (2024). Normid ja soovituslikud paigaldusjuhised. Vaadatud 30. septembril 2025, <http://www.soojuspumbaliit.ee/Normid>
76. Soojuskeskus. Vaadatud 30. septembril 2025, 20 olulist asja, mida peaksid teadma maakütte süsteemidest. Vaadatud 30. septembril 2025, <https://www.soojuskeskus.ee/20-olulist-asja-mida-peaksid-teadma-maakutte-susteemide-kohta/>
77. Soome Vabariik. (2023). Rakennuslaki (751/2023).
78. Soome Vabariik. (2017). Vesilaki (587/2017).
79. Soome Vabariik. (2014). Ympäristönsuojelulaki (527/2014).
80. Suurbritannia ja Põhja-Iirimaa Ühendkuningriik. Coal Industry Act. (1994). UK Public General Acts 1994 c. 21.
81. Suurbritannia ja Põhja-Iirimaa Ühendkuningriik. Water Resources Act. (1991). UK Public General Acts 1991 c. 57.
82. Suuroja, K., All, T., Kalberg, R., Konsa, M., Mõtus, M.-A., Kirsimäe, K., Põldvere, A., Ainsaar, L., Bauert, H., & Kalm, V. (2012). Geoloogia. Eesti loodusvarad. Eesti Maaülikool.
83. Rootsi Kuningriik. Miljö- och hälsoskyddslagen (1998:899). Svensk författningssamling.
84. Rootsi Kuningriik. Miljöbalken (1998:808). Svensk författningssamling.
85. Quantitative Heat OY . Vaadatud 30. septembril 2025, www.qheat.com
86. Taani Kuningriik. Bekendtgørelse om jordvarmeanlæg. 27/02/2017 EK nr 240.
87. Tallinna Linnavalitsuse määrus "Tallinna kaevetööde eeskiri".
88. The Environmental Permitting (England and Wales) Regulations. (2016). UK Statutory Instruments 2016 No. 1154
89. United States Department of Energy, Geothermal Heat Pumps. Vaadatud 30. septembril 2025, <https://www.energy.gov/energysaver/geothermal-heat-pumps>

90. Vallner, L., Jõelet, A. & Gavrilova, O. (2015). Groundwater Energy Potential of Estonia and its Environmental Impact. *Procedia Earth and Planetary Science* 15: 403-409.
91. Vassiljev, J., Koit, O. & Jõelet, A. (2022). Estimation of the regional thermal effect of multiple borehole heat exchangers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 81(6), 1–15.
92. VDI 4640 Blatt 1-4. (2019). Thermal use of the underground. Verein Deutscher Ingenieure.
93. Water Abstraction and Impoundment (Licensing) Regulations (Northern Ireland) 2006 The National Archives. (2006). The Water Abstraction and Impoundment (Licensing) Regulations (Northern Ireland) 2006 (SR 2006/482).
94. Water Environment (Controlled Activities) (Scotland) Regulations 2011 The National Archives. (2011). The Water Environment (Controlled Activities) (Scotland) Regulations 2011 (SSI 2011/209).
95. Warmte Koude Opslag WKO - bodemenergietool. Vaadatud 30. septembril 2025, www.wkotool.nl