

Tartu Ülikool
Ökoloogia ja Maateaduste Instituut
Geoloogia Osakond

Soojussüsteemi puurkaevu ja -augu mõju põhjavee ja pinnase
füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti
tingimustes

Argo Jõelet, Mikk Gaškov, Maile Polikarpus

Tartu 2012

Sisukord

| | |
|---|----|
| Sissejuhatus | 3 |
| Introduction..... | 4 |
| Soojussüsteemide tööpõhimõtte, levik Eestis ja energia kokkuhoid | 5 |
| Levik Eestis | 6 |
| Energia kokkuhoid | 7 |
| Soojussüsteemide poolt põhjustatud muutused | 9 |
| Füüsikalised ja keemilised muutused | 9 |
| Kivimi filtratsiooniomadused | 9 |
| Mineraalide lahustuvus | 11 |
| Õhutamine..... | 13 |
| Termiline mõju | 15 |
| Kinnised ja otseaurustiga soojussüsteemid | 16 |
| Avatud soojussüsteem | 21 |
| Soojussüsteemide rajamine ja kaasnevad ohud | 26 |
| Avatud soojussüsteemi puurkaevude rajamine | 26 |
| Vee juhtimine survele vee kihti | 26 |
| Kinnise soojussüsteemi puuraukude rajamine..... | 28 |
| Otseaurustiga soojussüsteemi puuraukude rajamine..... | 29 |
| Soojussüsteemides kasutatavad vedelikud ja nende keskkonnaohtlikkus | 29 |
| Soojussüsteemid ehitiste all | 30 |
| Soojussüsteemide kaugus teistest objektidest | 31 |
| Soojuspuurkaevude ja –aukude eluiga ja likvideerimine | 33 |
| Ettepanekud | 35 |
| Kokkuvõte..... | 37 |
| Summary | 38 |
| Tänuõnad | 39 |
| Kasutatud kirjandus..... | 39 |
| LISA 1. Lähteülesanne..... | 40 |
| LISA 2. Avatud soojussüsteemidest võetud veeproovide analüüsiaktid | 43 |

Sissejuhatus

Euroopa Liit on võtnud vastu ulatusliku kliima- ja energia paketi, mis on tuntud kui nn 20-20-20 direktiivid (2009/28/EÜ, 2009/29/EÜ, 2009/30/EÜ, 2009/31/EÜ, 406/2009/EÜ), mille eesmärgid on vähendada energiatarbimist 20%, vähendada kasvuhoonegaaside emissiooni võrreldes 1990. aasta näitajatega 20%, ja suurendada taastuvenergia osakaalu energiatarbimises 20%-ni. Aastaks 2050 peaks taastuvenergia kasutus olema 75%. Selle paketi üks tulemeid on, et alates 2020. aastast tohib ehitada ainult nullilähedase energiatarbimisega hooneid. Suure energiasäästu saavutamine ainuüksi parema soojustamisega on Eesti kliimas üsna keeruline.

Hoone energiatarbimist aitab kahandada taastuvenergia kasutusele võtmisega. Tuule- ja päikeseenergia otsene kasutamine on seotud keerukusega, sest neid ei ole alati võtta. Maasoojuspumpadel põhinevad lahendused on väheseid tõsiselt võetavaid kogu küttevajadust rahuldavaid variante. Tänu kivimite ja põhjavee suurele soojusmahtuvusele on pinnalähedastes kihtides akumulunud päikeseenergia talvel kasutatav.

Maasoojussüsteeme ei pea rajama puuraukude või –kaevude abil. Kui mujal maailmas on levinuimad puuraukudel põhinevad lahendused, siis Eesti praktika näitab, et meie kliimas toimivad väga hästi ka pinnasesse horisontaalselt paigaldatud soojuskontuurid. Maakontuuride kasutamist soodustab nende kordades odavam hind võrreldes soojuspuuraukudega, kuid rajamist piirab piisava pindalaga sobiliku maa olemasolu. Osaliselt on võimalik maad efektiivsemalt kasutada kompaktkollektorite abil, kuid suurema küttevajaduse korral on lahenduseks vertikaalsete soojussüsteemide kasutamine.

Igasugune puurimine kujutab endast potentsiaalset ohtu põhjaveele, mis on peamine joogivee allikas ja vajab seetõttu erilist kaitset. Vett ei tohi reostada ei soojussüsteemide rajamise ajal ega ka hilisema kasutamise kestel. Maasoojussüsteemid on mõeldud kestma aastakümneid ja peavad olema tehnilises mõttes vastupidavad ja soojuslikus mõttes jätkusuutlikud.

Käesolev aruanne vaatleb soojuspuurkaevude ja –aukudega seotud mõjusid põhjaveele ja soojusväljale vastavalt Keskkonnaministeeriumi püstitatud lähteülesandele (Lisa 1) ning on täienduseks varem tehtud tööle (Jõelet, 2007).

Introduction

The European Union has adopted a package of climate and energy-related directives, also known as 20-20-20 directives (2009/28/EU, 2009/29/EU, 2009/30/EU, 2009/31/EU, 406/2009/EU). The targets call for a 20 per cent reduction in greenhouse gas emissions by 2020 compared with 1990 levels, a 20 per cent cut in energy consumption through improved energy efficiency by 2020 and a 20 per cent increase in the use of renewable energy by 2020. Furthermore, the contribution of renewable energy should be 75 per cent by 2050. One of the results of these measures is that starting from 2020 new buildings have to have near zero energy consumption. This is a tough target in Estonian climate.

Near zero energy buildings can be achieved by using renewable energy. Wind and solar energy are somewhat difficult to be used directly, because they are not available when needed most. Ground source heat pumps are among few alternatives that can cover all the heating demand. They take advantage of solar energy that has accumulated in ground during summer and is available at winter time thanks to large heat capacity of rocks and groundwater.

Ground source heat pump systems do not have to be based on boreholes or wells. Although borehole heat exchangers are the most common solution, Estonian experience has proven that horizontal collectors work well in Nordic climate, too. They are a few times cheaper to build compared to borehole heat exchangers, but their use is limited in places with insufficient amount of suitable land. To some extent the shortage of land can be reduced by using compact collectors, but systems with large heat demand require going to the depth.

Every drilling is a potential hazard to groundwater, which is a major drinking water supply in Estonia and therefore needs especial protection. Water should not be polluted neither during construction nor exploitation of ground source heat pumps. Ground source heat pump systems are built for decades and they have to be sustainable in technical and thermal terms.

Current report analyses several aspects and influences related to drillings based open loop and closed loop systems.

Soojussüsteemide tööpõhimõte, levik Eestis ja energia kokkuhoid

Geotermaalset soojusressurssi jaotatakse kõrge- ja madalatemperatuuriliseks (vastavalt üle või alla 150°C) ning sügavaks ja madalaks (sügavusel üle või kuni 400 m). Kõrgetemperatuuriline varu võimaldab auruturbiinidega elektri tootmist. Kuigi tehnoloogiate arendamisega maailmas on elektri tootmiseks vajalik vee temperatuur langenud alla 90°C, on Eesti jaoks tegu kaugema tuleviku perspektiiviga, kuna kasutatav varu on mitmete kilomeetrite sügavusel ja praeguste tehnoloogiate juures majanduslikult mittetasuv.

Madalatemperatuurilised varud temperatuuriga >40 °C sobivad erinevateks otsekasutuse rakendusteks nagu näiteks põllumajandus ja kaugküte. Enamasti kasutatakse jaamade tõhususe tõstmiseks soojuspumpasid. Naabermaadest on sellised varud välja eraldatud Läti (Freimanis et al., 2002) ja Leedu (Radeckas et al., 2002) Ediacara ja Kambriumi terrigeensetes settekivimites. Klaipedas on valminud soojusjaam (kavandatud võimsus 41 MW), kus kasutatakse absorptsiooni soojuspumpadega 42 °C vett (Katinas and Markevicius, 2008). Katsetöid on läbi viidud ka Palanga piirkonnas, kus on võimalik kasutada 70 °C vett (Radeckas et al., 2002). Rootsis on soojusjaam Lundis (veetemperatuur 21 °C, koguvõimsus 47 MW, katab ~30% linna kaugkütte vajadusest) ja kavandamisel on Malmösse (20 MW geotermaalset). Taanis töötavad soojusjaamad Thistedis ja Amageris, kavandatakse Sønderborgi ja Viborgi. Kõik eelmainitud naabermaade geotermaalset energiat kasutavad soojusjaamad tuginevad settekivimites olevatel põhjaveekihtidel, kust on suhteliselt lihtne vett kätte saada. Eestis on temperatuur aluskorra pealispinna tasemel vahemikus 10 – 14 °C (Jõeleht, 2002) ning pealpool lasuvates settekivimites on temperatuur veelgi madalam. Olemasolevate andmete põhjal võib prognoosida, et üle 40 °C temperatuuriga kivimid asuvad sõltuvalt piirkonnast 2 – 3 km sügavusel, Kirde-Eestis võib olla isegi vähem kui 1,5 km sügavusel. Kristalse aluskorra kivimite filtratsiooniomadused on kehvad, kuid kuuma kuiva kivi (ingl. k. Hot Dry Rock) tehnoloogiaga on varud perspektiivikad.

Eestis puurkaevude ja -aukude abil kasutust leidev geotermaalne ressurss on madalatemperatuuriline (<10 °C) ja eeldab soojuspumba kasutamist. **Soojuspump** on seade, mille abil kantakse soojusenergiat madalama temperatuuriga keskkonnalt kõrgema temperatuuriga keskkonnale. Soojuspumba tehnoloogia levinuim kasutusviis on külmutus- ja jahutusseadmed, kuid juba aastakümneid kasutatakse soojuspumpasid ka kütteseadmetena. Kütteseadmena võetakse energiat kivimitest, pinnasest, põhjaveest või välisõhust ja kantakse see üle küttesüsteemile või tarbeveele.

Soojuspumba suletud torustikus on madala keemispunktiga külmaaine (termin pärineb jahutusseadmete tehnoloogiast), mis läbib neli komponenti: kompressor, kondensor, paisuventiil ja aurusti. Tüüpilises maasoojuspumbas tõstetakse kompressori abil gaasilise külmaaine rõhku (näiteks 10 – 20 bari võrra), mille tulemusena külmaaine temperatuur kerkib mitukümmend kraadi temperatuurini 35 – 70 °C. Kondensor on soojusvaheti, kus suurel kontaktpinnal kandub soojus kõrgema temperatuuriga soojuspumba külmaaine ringilt näiteks hoone küttesüsteemi ringile ning soojust loovutanud külmaaine kondenseerub (veeldub). Paisuventiili läbimise järel külmaaine rõhk langeb mõne barini, millega kaasneb ka temperatuuri langus tasemele umbes -5 °C. Aurusti on jällegi

soojusvaheti, kus maa seest „kokku kogutud“ soojus kandub üle külmaainele, mille tulemusena viimane aurustub.

Eelpool toodud näites on rõhud ja temperatuurid ligikaudsed sõltudes ennekõike soojuspumba tüübist, võimsusest ja küttevajadusest. Kõrge rõhu ja temperatuuri saavutamine kahandab tõhusust. Seetõttu on arendatud invertertehnoloogia, mis võimaldab vähendada kompressori võimsust väiksema küttevajaduse korral ja selle kaudu suurendada soojuspumba kasutegurit. Soojuspumba väljundvee temperatuur sõltub ka sellest, kas hoones on pörandaküte (temp. kuni 35 °C) või radiaatorid (temp. kuni 50 – 60 °C).

Maasoojussüsteemide liigitamine kinnisteks, avatuteks ja otseaurustiga süsteemideks põhineb aurusti tüübil ja maa seest soojuse kogumise viisil. **Kinnise soojussüsteemi** puhul on ühte või mitmesse puurauku paigaldatud soojuskontuur, milles ringlev vedelik kannab maasisest soojust soojusvahetisse, kus see põhjustab soojuspumba külmaaine aurustumist. Soojuskontuur on kinnine plasttorustik, milles ringlev vesilahus ei puutu kokku kivimite ja põhjaveega. Kontuur on sisuliselt survestamata ning paisupaagi eesmärk on vedeliku temperatuuri muutustega kaasneva soojuspaisumise mõju minimeerimiseks. Otseeks analoogiks soojuspuurauku paigaldatud kinnisele kontuurile on maapinna lähedale paigaldatud erinevate konfiguratsioonidega kontuurid (Eestis tavaliselt sirgelt 1,2 m sügavusel, või ka püstiste spiraalidena) ja avaveekogudesse paigaldatud soojuskontuurid.

Avatud soojussüsteemi puhul pumbatakse ühest puurkaevust põhjavett, mis soojusvaheti läbimise järel juhitakse jahedamana teise puurkaevu. Puurkaevude vahele jäävas lõigus on ring avatud ja osa ringlevast veest kandub regionaalse põhjavee liikumise käigus süsteemist kaugemale.

Otseaurustiga süsteemide puhul on pinnasesse või kivimisse paigaldatud torustik, milles olev külmaaine aurustub maast saadava soojuse mõjul. Otseaurustiga süsteemid on kinniste ja avatud süsteemidega võrreldes kõrgema kasuteguriga, kuna selles on ainult kaks tsirkuleerivat ringi (soojuspump, küttesüsteem) kolme tsirkuleeriva ringi (maakontuur, soojuspump, küttesüsteem) asemel ja pole vaja kulutada energiat kontuuris vedeliku tsirkuleerimiseks ega ka puurkaevust põhjavee pumpamiseks. Otseaurustiga süsteemid on tehniliselt nõudlikumad, sest aurustiks olev torustik peab olema surve all oleva gaasilise külmaaine jaoks hermeetiline. Senise praktika kohaselt on kasutatud vasktorusid, mis on kinnises süsteemis kasutatavate plasttorudega võrreldes jäigemad ja seetõttu võivad kergemini puruneda. Eestis rajatud süsteemide sügavus on vahemikus 10 – 20 m.

Otseaurustiga soojussüsteemid on mõnevõrra levinumad Põhja-Ameerikas, kuid Euroopas on see tehnoloogia vähe levinud. Alles viimasel ajal hakatakse nendele rohkem tähelepanu pöörama. Tehnoloogiate arendamise tulemusena on jõutud materjalide ja lahendusteni, mis võimaldavad aurusti torustiku panna ka sügavatesse puuraukudesse.

Levik Eestis

Puuraukudel või –kaevudel põhinevate soojussüsteemide leviku kohta Eestis täpsed andmed puuduvad. Eesti Looduse Infosüsteemi puurkaevude andmebaasis olevad varem sisestatud andmed ei peegelda tegelikku seisut, kuna puudub viide puurkaevu energeetilisele otstarbele või viide esineb

mittesüstemaatilise märkusena. Käesoleva töö autoritele on teada juhtumeid, kus mitu soojuspuurkaevu on katastrisse kantud ühena või andmed üldse puuduvad katastrist. Samuti on teada juhtumeid, kus soojuspuurkaevu otstarbeks on märgitud tarbepuurkaev (peab paika, kuna tarbevett võetakse samuti). Seega ametlikes andmebaasides mitmekümneni ulatuv soojuspuurkaevude ja -aukude arv on alahinnatud. „Mustalt“ puuritud puurkaevude arv on nõukogude ajal olnud suhteliselt suur ja tänapäevase olukorra kohta on vastakaid arvamusi, kuid töö autorite arvates on andmebaasis mittepeegelduvate avatud ja kinniste soojussüsteemide puurkaevude arv tühine. Kuna soojuspuuraukude rajamiseks on suhteliselt keeruline puurimisluba saada ja uusi puuritakse ainult mõni tükk aastas, siis tõenäoliselt jääb avatud ja kinnise soojussüsteemi puuraukude ja -kaevude koguarv alla 100.

Eestimaa Looduse Infosüsteemi veekasutuse andmebaasis on ainult kaks objekti kokku 18 puurauguga, mille puhul võib kahtlustada, et need on otseaurustiga soojussüsteemid. Väidetavalt selliseid süsteeme Eestis enam ei ehitata (firmad lõpetasid, kuna hind ei olnud konkurentsivõimeline ja tellimusi ei tulnud), aga varem rajatud objektide arv võib ulatuda kümnetesse.

Otseaurustiga soojussüsteemide vähesel kajastumisel puurkaevude andmebaasis on mitmeid põhjuseid. Puuraugud ei pruugi väikese sügavuse (10–20 m) tõttu ulatuda aluspõhjalisse põhjaveekihti ja sellest tulenevalt on neid püütud vaadelda tehnorajatistena, mille puhul pole vaja puurimisluba, vaid piisab kohaliku omavalitsuse nõusolekust. Siin on analoogia salvkaevude ja ehitiste vaiapostide rajamisega, mida puuritakse suurema tehnikaga ilma, et küsitaks puurimisluba veeseaduse alusel. Kindlasti mängib oma rolli puurimislubadega kaasnev bürokraatia ja ajakulu.

Energia kokkuvõid

Soojuspumba tõhususe iseloomustamiseks kasutatakse sageli mõistet soojustegur (ka soojuspumba kasutegur, ingl. k. COP – *coefficient of performance*). See on parameeter, mis väljendab soojuspumba poolt toodetud energia ja tootmiseks kulutatud energia suhet. Näiteks COP=4 tähendab, et soojuspump, mis töötab võimsusega 2 kW, toodab energiat võimsusel 8 kW. Soojustegur ei ole konstantne suurus, vaid sõltub oluliselt sisend- (maakontuur/põhjavesi) ja väljundtemperatuurist (põrandaküte/radiatorid/tarbevesi). Seetõttu tuleks erinevate soojuspumpade omavahelisel võrdlemisel pöörata tähelepanu sellele, et toodud COP väärtused oleks antud sama režiimi juures. Maasoojuspumpade COP režiimil 5/35°C (avatud süsteem ja põrandaküte) on tüüpiliselt 4,5–5, režiimil 0/50°C (kevad-talvel kinnine süsteem ja radiaatorküte) ligikaudu 2,7–3,3. Tarbevee tootmisel on COP tavaliselt veidi madalam, kuna väljundtemperatuur on 55–65°C, kuid sõltuvalt optimeerimisest soojuspumba sees võib COP varieeruda vahemikus 2,5–4,5.

Avatud soojussüsteemi puhul on COP kõrgem ja stabiilsem kui kinnise soojussüsteemi korral, kuna põhjavee temperatuur varieerub vähem. Kinnise soojussüsteemi puuraugud omakorda on õigesti dimensioneerituna stabiilsemad ja tõhusamad horisontaalselt paigaldatud kontuuriga maasoojussüsteemidest. Otseaurustiga süsteemid on üldiselt tõhusamad (COP 0,5 võrra suurem) kui kinnised süsteemid, kuna nendes puudub maakontuuri tsirkulatsioonipump.

Kuna soojustegur muutub hooaja jooksul, siis peegeldab küttelahenduse efektiivsust paremini hooaja keskmine soojustegur (*SPF – seasonal performance factor*), mis põrandakütte puhul on 3,5 – 4 ja radiaatorkütte korral 3 – 3,5.

SPF = 3 tähendab keskmist kasutegurit 300%. Võrdluseks tänapäevaste tahkeküttekatelde kasutegurid on 85 – 95%, gaaskondensaatkatelidel kuni 110%, aga näiteks kaminatel kõigest 50 – 70%. Soojuspumba kasutegur peegeldab otseselt kokkuhoitud energiat. Hooaja keskmine kasutegur 3 – 4 näitab, et 67 – 75% tuleb vähem elektrit kulutada.

Kivimite ja vee suur soojusmahtuvus lubavad maasoojussüsteemidega energiat akumuleerida. Arhitektuur ja ehitustavad suunduvad sinna, et üha rohkem ehitatakse hooneid, mis vajavad suvel jahutamist. Tekkiva jääsoojuse saab soojuspuuraukude abil ladustada maa sees, kus temperatuur on madalam kui hoones. Suure osa sellest soojusest saab transportida kasutades ainult tsirkulatsioonipumpasid, mis teeb soojusest vabanemise eriti soodsaks. Ühtlasi aitab suvel akumuleeritud soojus talvel võetut taastada.

Soojussüsteemide poolt põhjustatud muutused

Füüsikalised ja keemilised muutused

Soojussüsteemide kasutamise käigus muudetakse kivimite ja põhjavee temperatuuri, millega võivad kaasuda keemilised ja füüsikalised protsessid. Järgnevalt käsitletakse neid mõjusid kivimitele ja põhjaveele, mis tulenevad otseselt jahutamisest, külmutamisest või soojendamisest. Füüsikalise tegurina leiab käsitlemist mõju põhjavee liikumisele. Keemiliste mõjutustena vaadeldakse lahustuvuse ja õhutamise seotud aspekte.

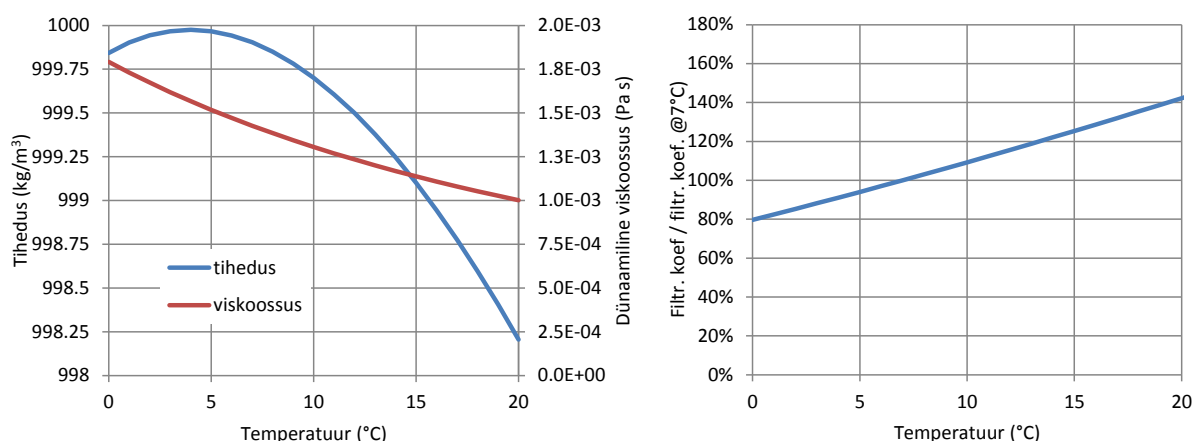
Kivimi filtratsiooniomadused

Filtratsiooni kirjeldamiseks kasutatakse tavaliselt filtratsioonikoefitsienti K (ingl.k. *hydraulic conductivity*), mis lisaks kivimi veeläbilaskvusele k (*permeability*) sõltub kivimis voolava fluidi (nt. vesi, NAPL, õhk) tihedusest ρ ja dünaamilisest viskoossusest μ :

$$K = k g \rho / \mu$$

kus g on raskuskiirendus. k ja g ei sõltu jahutamisest ega soojendamisest, kuid tihedus ja eriti just viskoossus on temperatuurist sõltuvad parameetrid (rõhu mõju sisuliselt puudub).

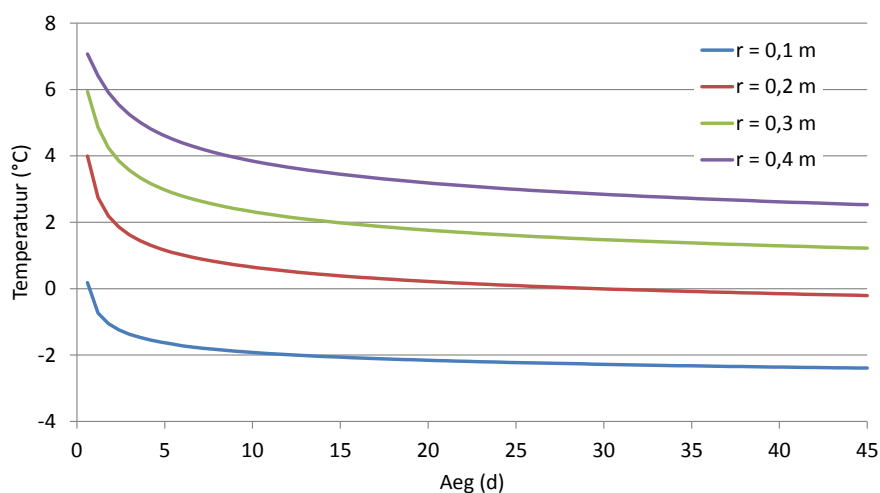
Joonis 1 näitab, et soojuspuuraukude ja -kaevude tavapärasel kasutamisel ehk jahutamise käigus kivimite filtratsioonikoefitsient kahaneb. Reaalselt on soojussüsteemiga võimalik lokaalselt põhjavee temperatuuri mõjutada $\pm 3...5$ kraadi võrra, millega kaasnevad 10...15% muutused on väiksemad kui veekihtide looduslik muutlikkus või filtratsioonikoefitsiendi määramise täpsus praktikas. Veekihi filtratsiooniomaduste säilimise seisukohast omab jahutamine ja soojendamine pigem teoreetilist kui et praktilist efekti.



Joonis 1. Vee tiheduse ja viskoossuse muutused (Wagner et al., 2000) ja nende kahe summaarne efekt filtratsioonikoefitsiendile võrrelduna normaaltingimustega (7°C).

Kui jahutamise või soojendamise tulemusena muutuvad ainult vee omadused, siis külmutamise tõttu võivad muutuda ka kivimi omadused. Läbikülmunud kivimis vesi ei liigu. Korduva külmumise tulemusena kivim puruneb ja tekkinud lõhelisus parandab filtratsioonivõimet. Külmumise mõju on siiski äärmiselt lokaalne kinniste ja otseaurustiga süsteemide soojuspuuraukude vahetus läheduses. Sarnaselt puurkaevust veevõtul tekkivale alanduslehttrile, mis on kõige järsem puuraugu ümbruses, tekib ka soojavõtul temperatuurianomaalia, mille gradient on suurim puuraugu läheduses. See tuleneb soojuse (või ka vee) radiaalsest kandumisest puuraugu suunas läbi üha kahaneva ristlõike, millega kaasneb temperatuuri (või survetaseme) gradiendi eksponentsiaalne kasv puuraugu suunas. Soojuse kandumine puuraugu poole on aeglane ja sarnaneb vee liikumisega halva veejuhtivusega kivimites – puurkaev võib pumpamise käigus kuivaks jääda, kuna ümbriskivimis olev vesi ei suuda piisavalt kiiresti puurkaevu voolata.

Soojusvälja modelleerimine näitab, et mõne sentimeetri ulatuses puuraugu seinast toimub külmumine mõne päeva jooksul, kuid selleks, et külmumine ulatuks 15 cm kaugusele puuraugu seinast, peaks puuraugus olema temperatuur $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ vähemalt ühe kuu kestel (Joonis 2). Nii pikaajaline sellises ulatuses temperatuuri alandamine võib esineda ainult väga valesti dimensioneeritud soojuspuuraukude korral. Vaatlused Eesti soojuspuuraukudes¹ näitavad, et temperatuur puuraugu ülaosas võib langeda kuni mõne kraadi jagu miinustesse ja esineb külmumist, kuid küttekooormuse vähenemisel toimub kiire sulamine ja temperatuurivälja taastumine tippkooormuse eelsele tasemele, viidates samuti sellele, et jahutamise mõju ei ulatu puuraugust kuigi kaugemale.



Joonis 2. Arvutatud temperatuurid soojuspuuraugu keskmest kaugustel 0,1 kuni 0,4 m (kaugus puuraugu seinast 0,05 kuni 0,35 cm). Mudel on telgsümmeetriline 2D. Soojuspuuraugus (mudelis $r = 0 - 5$ cm) hoitakse kogu perioodi jooksul temperatuuri -5°C , mis on reaalse soojussüsteemide jaoks ekstreemne juhtum. Modelleerimiseks kasutati tarkvara Processing Shemat (Clauser, 2003).

¹ Mitmed soojuspumpad näitavad maakontuurist tuleva vedeliku temperatuuri, kuid see ei sobi puuraugu ja ümbriskivimi temperatuuri adekvaatseks hindamiseks. Mujal tehtud termilise toimivustesti (*thermal response test*) tulemused näitavad, et puuraugu termiline takistus varieerub tehnilisest lahendusest sõltuvalt, kuid on suurusjärgus $0,1\text{ K} / (\text{W}/\text{m})$. Seda tuleb tõlgendada selliselt, et stabiilses režiimis soojust võttes näiteks kooormusega 50 W puuraugu iga meetri kohta, on kontuuris oleva soojakande vedeliku ja puuraugu seina moodustavate kivimite temperatuuride vahe 5 kraadi ($0,1 \times 50$).

Kivimi jahutamine alla vee külmumispunkti ei tähenda ilmingimata kivimi purunemist jää paisumise tulemusena. Kivimis peab enamik veest külmuma ning edasine jahutamine paneb jää paisuma. Katsed näitavad, et pooriruumi konfiguratsioonist ja terade pinnaefektidest tulenevalt on temperatuuril $-0,5 - -1$ °C setendis veel 10% külmumata vett, kusjuures savides on külmumata vett rohkem kui liivakates setendites (Osterkamp ja Burn, 2002). Soojuspuuraukudest kaugemal kui 5 – 10 cm toimub mõõdukas külmumine, millega ei kaasne ulatusliku lõhelisuse kujunemist.

Kindlasti omab külmumisega kaasnev lõhelisus ja sellest tulenev võimalik põhjavee vertikaalne liikumine olulist tähtsust soojuspuurangu sees ja seetõttu tuleb puurangu täitmisel kasutada spetsiaalseid segusid, mis säilitavad veekihte isoleerivad omadused ka korduvate külmumisulamistsükli järel. Vastavaid segusid töötatakse välja kogu aeg. Segude veepidavus ei ole probleemiks, arendustöö põhisuund on segude soojusjuhtivuse parandamisel.

Eelnevast arutelust nähtub, et soojuspuurauku täitva materjali külmumiskindlusele tuleb tähelepanu pöörata, aga kaugemal kui üks detsimeeter puurangu seinast on külmumisega kaasnevad efektid vähetõenäolised. Jääb küsimus kas vahepealeses vööndis aset leidvad muutused on olulise tähtsusega? Terrigeensetest setenditest peavad savid külmumisele hästi vastu ning säilitavad vett pidavat omadused ka korduval külmumisel. Mida jämedateralisem on kivim, seda kiiremini toimub ulatuslik külmumine ja seda alim on kivim külmakahjustustele. Samas on jämedateraline kivim nii või teisiti paremate filtratsiooniomadustega ning lisanduv poorsus/lõhelisus omab väikest efekti. Savikate vahekihtide esinemine läbilõikes pärsib põhjavee vertikaalset liikumist.

Erinevalt terrigeensetest kivimitest, mis külmumisel „pudisevad laiali“, on karbonaatkivimitel tendents lõheneda. Samas on põhjust eeldada, et lõhenemine toimub piki kivimis olevaid nõrgemaid vööndeid, milleks on savikad vahekihid ja kelmed, mis omakorda on subhorizontaalselt orienteeritud.

Käesoleva töö autoritele ei ole Eestist ega mujalt teada juhtumeid, kus soojuspuurauku ümbritsevas kivimis tekkinud lõhelisus oleks olnud reostuse vertikaalse kulgemise kanaliks.

Mineraalide lahustuvus

Põhjavee keemiline koostis püüab saavutada termodünaamilist tasakaalu ümbritseva kivimiga. See puudutab nii mineraalide lahustuvust kui ka välja settimist vastavalt ala- ja üleküllastunud lahusest. Tasakaal sõltub paljude parameetrite koostisest ning sealhulgas ka temperatuurist. Loomulikult on oluline mineraalide ja ioonide kättesaadavus. Näiteks suhteliselt kergemini lahustuvaid mineraale haliiti ja kipsi Eesti läbilõikes ei esine kivimit moodustavate mineraalidena ja seetõttu puudub neil roll põhjavee keemilise koostise mõjutajatena. Tasakaal toimib ka teistpidi – kui põhjavette sattub näiteks inimtegevuse tulemusena komponente üleküllastunud koguses, siis hakkavad tekkima uudismineraalid.

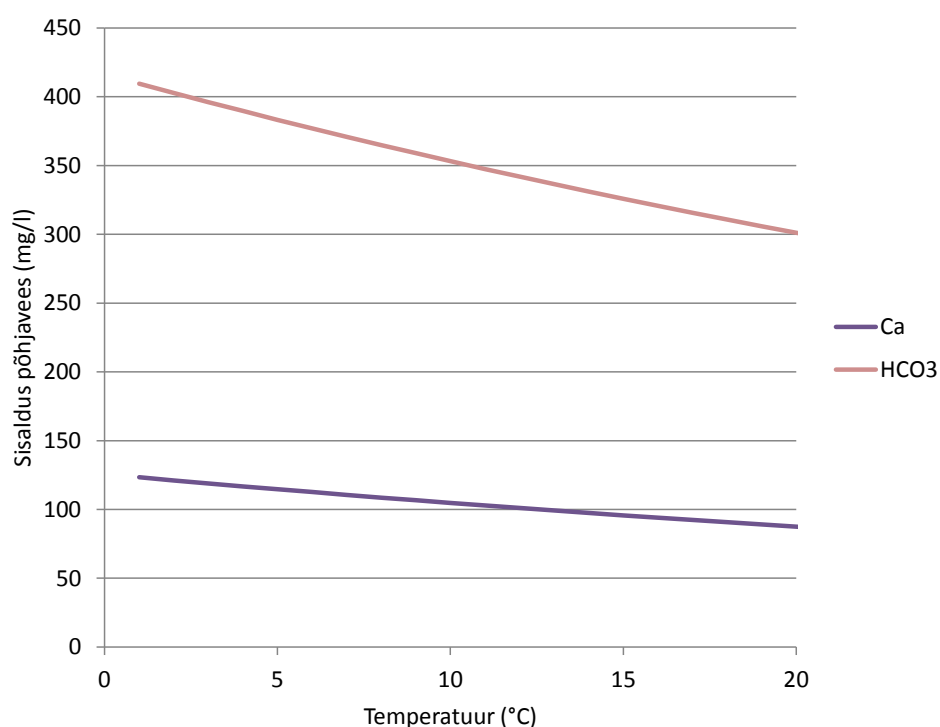
Enamiku kivimit moodustavate mineraalide lahustuvus on väike, kuid suureneb temperatuuri tõstmisel. Erandlikuks võib lugeda kaltsiiti (CaCO_3), mille lahustuvus kasvab temperatuuri alandamisel, kuna tema lahustumine on eksotermiline. Lahustumine on kompleksne ja sõltub erinevate põhjavee komponentide vahelkordadest, kivimi koostisest, põhjavee liikuvusest jne. Mineraalide lahustumine on ka kineetiline nähtus, mille toimumise kiirus sõltub

aktivatsioonienergiast. Enamasti on aeg ebapiisav, et saavutataks termodünaamiline tasakaal kivimi ja selles oleva vee vahel.

Tulenevalt seoste kompleksusest ja enamiku mineraalide vähesest lahustuvusest madalatel temperatuuridel ei ole käesolevas töös püütud arvutada põhjavee keemilise koostise muutusi reaalsetes situatsioonides. Näitlikustamiseks siiski temperatuurisõltuvust on toodud põhjavees kaltsiumi ja HCO_3 ionide tasakaaluliste sisalduste muutused kaltsiidi- CO_2 süsteemis (Joonis 3). Selle süsteemi eripäraks on see, et ta sõltub ennekõike kaltsiumi saadavusest, kuna CO_2 on osaliselt tasakaalus atmosfääriga. Arvutusteks kasutati tarkvara PHREEQC ja vee koostise aluseks võeti Paidest Peetri 4-1 võetud veeproovi analüüsi tulemused (Lisa 2).

Tasakaalulises olekus toimuvad kaltsium- ja hüdrokarbonaatiooni sisaldustes $\pm 10\%$ muutused tulenevalt soojussüsteemidega kaasneva võivatest temperatuurivariatsioonidest. Tasakaalu saavutamine eeldab piiratud veevahetust ja rohkelt aega. Kumbki tingimus pole soojussüsteemide puhul täidetud.

Nii nagu kevadine külm ja alaküllastunud lumesulavesi ei tekita märgatavaid lahustumisjälgi paekivile, nii samuti ei ole põhjust karta, et soojuspuurkaevu kaudu tagasi juhitud jahutatud, kuid küllastumislähedane põhjavesi hakkaks lahustama kaltsiiti või teisi mineraale ümbriskivimis sellisel määral, et see mõjutaks põhjavee keemilist koostist või kivimi filtratsiooniomadusi.



Joonis 3. Kaltsiumi- ja hüdrokarbonaatiooni tasakaaluliste sisalduste sõltuvus temperatuurist, kui kaltsiidi hulk on piiramatult.

Õhutamise

Avatud soojussüsteemis juhitakse soojusvaheti läbinud põhjavesi puurkaevu kaudu tagasi põhjaveekihti. Vesi juhitakse ühest puurkaevust teise suletud torustiku kaudu, aga veevõtu ja tagasivoolu puurkaevudes toimub suuremal või vähemal määral kokkupuutumine õhuga. Atmosfäärigaasidest on põhjavee keemilisele koostisele suurima mõjuga hapnik, kuna see muudab redokstasakaalu ja soodustab aeroobsete bakterite tegevust. Eesti aluspõhjas suhteliselt levinud mineraali püriidi oksüdeerimisel suureneb sulfaadi ja raua sisaldus põhjavees. Põhimõtteliseks analoogiks on Ida-Virumaa põlevkivi kaevandused, kuhu imbub rohkelt hapnikurikast sadevett, mis infiltreerumise käigus reageerib püriidiga ning kaevandusvees võib sulfaatiooni sisaldus ületada joogivees lubatud piirnormi 2–3 korda. Samas võib tugeval oksüdeerimisel olla ka positiivne mõju vähese püriidisisaldusega kivimites, kus põhjavees mobiilne Fe^{2+} muutub Fe^{3+} ja settib välja kahandades selle kaudu rauasisaldust põhjavees.

Avatud süsteemi puurkaevud võivad olla ka pinnareostuse sügavale kandumise kanaliks. Kontrollimaks püriidi oksüdeerimisega seotud sulfaatiooni sisalduse suurenemise hüpoteesi ja muu reostuse levikut võeti veeproovid kuuest kohast. Proovivõtu kohtade valikut piiras mõnevõrra puurkaevu omanikega kontakti saavutamine ning nendelt ligipääsu loa saamine. Samuti oli piiravaks veekraani olemasolu (soojussüsteemi toimimise seisukohalt mittevajalik) või võimalus paigaldada väljavõtte ajutiselt.

Veeproovide võtmine ajastati detsembrisse ehk aega, mil kütteperiood oli mõnda aega kestnud, eeldades, et võetud veeproovid esindavad töötava soojussüsteemi situatsiooni. Veeproovide võtmisel osalesid M. Polikarpus (proovivõtja atesteerimistunnistus 996/11) ja A. Jõelet. Veeproovide analüüsiaktid on toodud lisa 2. Tabelites 1–5 on tulemusi võrreldud Eesti Looduse Infosüsteemi VEKA andmebaasis leiduvate analüüsidega puurkaevudest, mis asuvad käesoleva töö raames proovitud puurkaevudest 1–1,5 km raadiuses ja mis avavad sama veekihti. Paide ja Kangru küla puurkaevude (vastavalt katastrinumbriga 21226 ja 20876) veeanalüüsi tulemusi oli võimalik võrrelda samadest puurkaevudest varem võetud proovide tulemustega, Paides oli võrdluseks olemas ka naaberkinnistule puuritud soojuskaevu (kat. 16470) veeanalüüsi tulemused.

Tabel 1. Olulisemad keemilised komponendid Paide Peetri 4-1 (kat 21226) ja naaberkinnistu Peetri 2-5 (kat. 16470) soojuspuurkaevudest ning taustaväärtused ümbruskonna puurkaevude 14069, 14681, 14696, 16894, 20574, 21092, 21119, 21180, 21225, 21233, 22382 ja 21523 alusel.

| Paide | Peetri 4-1 | Peetri 4-1 | Peetri 2-5 | min. | maks. | med. |
|-------------|------------|------------|------------|--------|-------|-------|
| | 07.12.2011 | 02.08.2005 | 08.08.2002 | | | |
| pH | 7,4 | 7,6 | 7,1 | 6,82 | 7,9 | 7 |
| NH_4^+ | <0,03 | 0,35 | 0,05 | <0,07 | 0,73 | 0,19 |
| NO_3^- | 25 | 36,1 | 27,1 | <0,1 | 49,3 | 0,4 |
| NO_2^- | 0,020 | 0,092 | 0,076 | <0,003 | 0,1 | 0,008 |
| SO_4^{2-} | 48 | 94,4 | 64,2 | 2 | 85,2 | 50,2 |
| Cl^- | 66 | 47,5 | 41,4 | 19,1 | 94,3 | 35,5 |
| HCO_3^- | 408 | 451,5 | 414,8 | 329,5 | 518,5 | 427 |
| K | 16 | 16,7 | 15 | 1,8 | 15,7 | 3,3 |
| Ca | 120 | 133,1 | 111,8 | 73,4 | 133,1 | 112 |
| Mg | 24 | 34 | 31,2 | 13,6 | 57 | 30 |
| Na | 44 | 28 | 23,1 | 6 | 48,6 | 17,1 |
| Fe | <0,05 | 0,35 | 0,97 | <0,05 | 2,85 | 0,19 |

Soojussüsteemi puurkaevu ja -augu mõju põhjavee ja pinnase füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes

Tabel 2. Olulisemad keemilised komponendid Kangru küla Kannikese 8 (kat. 20876) soojuspuurkaevust ning taustaväärtused ümbruskonna puurkaevude 258, 262, 266, 271, 14748 ja 16633 alusel.

| Kangru | Kannikese 8 07.12.2011 | Kannikese 8 12.01.2005 | min. | maks. | med. |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| pH | 7,8 | 7,8 | 6,1 | 9,1 | 8,1 |
| NH ₄ ⁺ | 0,10 | 0,09 | <0,05 | 2,3 | 0,4 |
| NO ₃ ⁻ | <0,2 | 0,4 | <0,4 | 0,4 | 0,4 |
| NO ₂ ⁻ | <0,01 | 0,004 | 0,003 | 0,8 | 0,008 |
| SO ₄ ²⁻ | 47 | 97,9 | 2 | 30,9 | 10 |
| Cl ⁻ | 8,9 | 5,3 | 3,5 | 74,5 | 13,1 |
| HCO ₃ ⁻ | 234 | 244 | 30,5 | 372,1 | 73,2 |
| K | 1,8 | 2,4 | 2 | 10 | 3,6 |
| Ca | 77 | 88,4 | 7 | 115 | 20 |
| Mg | 9,2 | 11,9 | 3 | 19,4 | 5 |
| Na | 12 | 6,9 | 6,8 | 34 | 9,3 |
| Fe | 1,5 | 1,66 | 0,19 | 7,5 | 1,01 |

Tabel 3. Olulisemad keemilised komponendid Haapsalu Pääsukese 3 (kat. 21391) ja Pääsukese 5 (kat. 21387) soojuspuurkaevudest ning taustaväärtused ümbruskonna puurkaevude 1979, 4192, 4202, 4203, 4204, 13774, 14535, 15083, 28698 ja 30086 alusel.

| Haapsalu | Pääsukese 3 | Pääsukese 5 | min. | maks. | med. |
|-------------------------------|-------------|-------------|--------|-------|-------|
| pH | 7,7 | 7,5 | 6,85 | 7,5 | 7,04 |
| NH ₄ ⁺ | 0,53 | 0,49 | 0,06 | 0,51 | 0,45 |
| NO ₃ ⁻ | <0,2 | <0,2 | 0,1 | 13,5 | 0,4 |
| NO ₂ ⁻ | <0,01 | <0,01 | <0,003 | 0,084 | 0,011 |
| SO ₄ ²⁻ | 91 | 114 | 27,8 | 160,5 | 82,8 |
| Cl ⁻ | 96 | 106 | 17 | 1115 | 80 |
| HCO ₃ ⁻ | 366 | 355 | 189,2 | 466,4 | 357,0 |
| K | 8,9 | 8,8 | | | 17,5 |
| Ca | 120 | 120 | 78,1 | 130,3 | 96,1 |
| Mg | 20 | 20 | 12,2 | 74 | 28 |
| Na | 66 | 71 | | | 153,8 |
| Fe | 41 | 17 | 0,06 | 6,33 | 0,97 |

Tabel 4. Olulisemad keemilised komponendid Uuemõisa Tehnika 30 (kat. 16759) soojuspuurkaevust ning taustaväärtused ümbruskonna puurkaevude 1984, 4197, 4205, 9394, 13375, 14232, 15942, 16273, 18936, 24111, 24112 ja 28698 alusel.

| Uuemõisa | Tehnika 30 | min. | maks. | med. |
|-------------------------------|------------|--------|-------|-------|
| pH | 7,6 | 6,9 | 7,8 | 7,4 |
| NH ₄ ⁺ | 0,10 | <0,05 | 0,85 | 0,33 |
| NO ₃ ⁻ | <0,2 | <0,009 | 2,2 | 0,45 |
| NO ₂ ⁻ | <0,01 | <0,003 | 0,145 | 0,003 |
| SO ₄ ²⁻ | 111 | 70 | 375 | 88 |
| Cl ⁻ | 43 | 22 | 850 | 42,8 |
| HCO ₃ ⁻ | 520 | 347,8 | 640,7 | 494,1 |
| K | 11 | 7,6 | 10,8 | 7,95 |
| Ca | 74 | 50,1 | 124,6 | 80,2 |
| Mg | 53 | 38,6 | 91,2 | 46,2 |
| Na | 61 | 18 | 110 | 30,5 |
| Fe | 9,6 | 0,21 | 1,42 | 0,54 |

Tabel 5. Olulisemad keemilised komponendid Oisu küla Pikk 1 soojuspuurkaevust ning taustaväärtused ümbruskonna puurkaevude 14813, 17312, 17314, 21028 ja 21763 alusel.

| Oisu | Pikk 1 | min. | maks. | med. |
|-------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| pH | 7,6 | 7 | 7,3 | 7,2 |
| NH ₄ ⁺ | <0,03 | <0,05 | 0,46 | 0,13 |
| NO ₃ ⁻ | 14 | 0,4 | 4,4 | 0,6 |
| NO ₂ ⁻ | 0,016 | 0,003 | 0,005 | 0,004 |
| SO ₄ ²⁻ | 62 | 36,6 | 78,6 | 64 |
| Cl ⁻ | 10 | 13,8 | 33 | 20 |
| HCO ₃ ⁻ | 405 | 323,3 | 384,3 | 360 |
| K | 4,3 | 1,5 | 2,3 | 2 |
| Ca | 110 | 78,6 | 117,6 | 85,6 |
| Mg | 32 | 26,5 | 29,8 | 27,3 |
| Na | 4,3 | 3,3 | 8,3 | 5,3 |
| Fe | 0,086 | <0,05 | 0,27 | 0,06 |

Sulfaatiooni sisaldus võetud veeproovides ei ületa kusagil joogivees lubatud piirnormi (250 mg/l) varieerudes vahemikus 47 kuni 114 mg/l ning on kooskõlas ümbruskonna veeanalüüside mediaanväärtustega. Paide ja Kangru küla puurkaevudest varem võetud proovidega võrreldes võib täheldada sisalduse langust.

Raua sisaldus on kõrge Haapsalu ja Uuemõisa puurkaevudes (41, 17 ja 9,6 mg/l). Pääsukese tänava puurkaevude kõrge rauasisaldus võib osaliselt tuleneda sellest, et veeproovid võeti kastmisvee jaoks tehtud torustikust (pumbale lähemal kraani ei olnud ja ajutist väljavõtet ei saanud paigaldada), kus suurema osa ajast vesi seisab ja raud on saanud välja settida pikema aja jooksul. Veeproovi võtmiseks lasti veel voolata vähemalt 20 min, kuigi jälgitud parameetrid (temperatuur, pH, elektrijuhtivus) saavutasid stabiilsed näidud paari minutiga. Torustikus ajapikku settinud raua väljakandumine ei selgita kõrgete väärtuste esinemist täielikult vaid ainult osaliselt. Kõrgenenud rauasisaldus põhjavees on piirkonnas laiem probleem. Ümbruskonnas leidub teisigi puurkaeve, kus raua sisaldus ulatub mitme mg/l ning rauaärastus seadmed on üsnagi levinud.

Teiste komponentide osas on soojuspuurkaevude vesi koostiselt sarnane piirkonnas leviva sama veekihi põhjaveega. Veeanalüüsid ei näita värske reostuse esinemist. Võetud proovides on madal BHT (kuni 1,0 mg/l), KHT (1,3 kuni 9,6 mg/l) ning lämmastiku ühendite sisaldus. Paides on suhteliselt kõrge nitraatiooni sisaldus, millelega assotsieerub ka kõrgem üldorgaanilise süsiniku sisaldus (TOC). Ilmselt on seal tegu varem eksisteerinud reostusega, kuna nitraadi sisaldus oli kõrge juba puurimise ajal.

Termiline mõju

Vertikaalseid maasoojussüsteeme rajatakse aastakümneteks ning seetõttu peavad nad olema ka soojuslikus mõttes jätkusuutlikud. Energia tarbimine ja taastumine peavad olema tasakaalus ning soojuslikud efektid ei tohi akumulieruda. Soojuskande põhimõttelt on kinnised/otseaurustiga ja avatud soojussüsteemid erinevad.

Kinnised ja otseaurustiga soojussüsteemid

Kinniste ja otseaurustiga süsteemide puhul toimub soojuskanne valdavalt soojusjuhtivuse kaudu. Soojuse kandumiseks soojuskontuuri suunas tuleb alandada kontuuris ringleva külmakandvedeliku temperatuuri. Mida suurem on kontuuri ja ümbriskivimi temperatuuride vahe, seda rohkem kandub soojust kontuuri poole. Tulenevalt radiaalsest konfiguratsioonist on soojuspuuraugu lähedal temperatuuri gradient kõige suurem, sest sama soojushulk peab kanduma läbi üha kahaneva ristlõike.

Kinniste ja otseaurustiga süsteemide puhul saab rääkida lühi- ja pikaajalistest temperatuuriefektidest soojuspuuraugu ümbruses. Lühiajalised efektid tulenevad sellest, et tundide-päevade ajaskaalas on kättesaadav soojus, mis on detsimeetrite-meetri kaugusel soojuspuuraugust. Kaugemal asuval soojusel kulub päevi-nädalaid, et kohale jõuda. See, kui madalale temperatuur langeb tippvõimsusel töötava soojuspumba töö tulemusena, sõltub soojuskontuuri erivõimsusest (W/m – mitu vatti kontuuri jooksva meetri kohta võetakse energiat) ja kivimite soojusjuhtivustegurist, aga ka soojuskontuuri tüübist ja läbimõõdust (mida suurem küljepindala, seda väiksem külmakandvedeliku ja kivimite temperatuuride erinevus). Vältimaks temperatuuri langemist sellisele tasemele, kust soojuspumba COP hakkab oluliselt kahanema, kavandatakse soojuspuuraugu sügavus nii, et erivõimsus ei ületaks $50 W/m$ enamiku Eesti läbilõikes esinevate kivimite puhul ja kuni $30 W/m$ sinisavis².

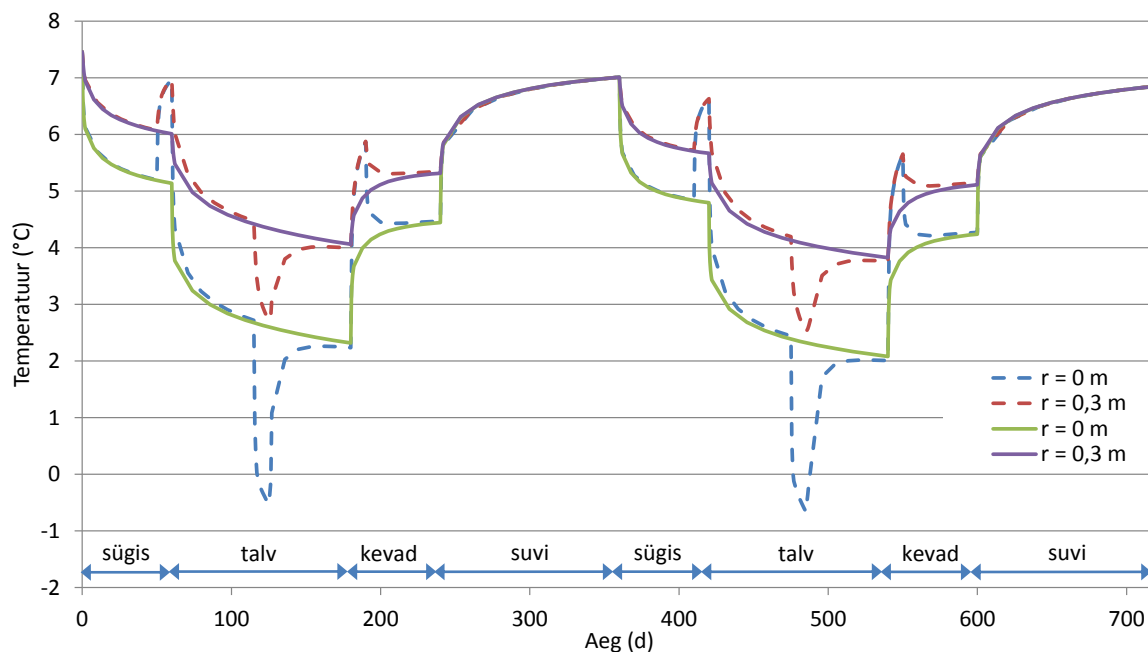
Soojuspump ei tööta kogu aeg täisvõimsusel ja puhkepauside ajal toimub soojusvälja taastumine. Pikaajaliste mõjude seisukohalt on oluline summaarne aasta jooksul tarbitud soojushulk. Küttevajadus sõltub peamiselt ehitisest endast (nt. eramu või büroohoone) ja tema soojustatusest, aga ka kohalikest kliimaatilistest tingimustest. Eestis lähtutakse energiatarbimise hindamisel väiksemate hoonete puhul kogemustest, suuremate objektide puhul kasutatakse kraadpäevade meetodikat (Loigu ja Kõiv, 2006). Eesti kliimas on kütteperioodi pikkus tavaliselt umbes 8 kuud, kuid küttekoormus jaotub ebaühtlaselt. Alla -10 °C päevi on keskmisel talvel 2–3 nädalat sõltuvalt asukohast.

Modelleerimine

Soojuspuuraukude töötamisega kaasnevate temperatuurivälja muutuste selgitamiseks loodi 3D mudelid kasutades tarkvaraprogrammi Processing SHEMAT (Clauser, 2003). Mudelite detailne kirjeldus koos kasutatud parameetritega on toodud M. Gaškovi magistritöös (Gaškov, 2011). Lühiajalist mõju vaadeldi töötüklite kaupa kahe aasta jooksul. Aasta koosnes neljast perioodist, mille pikkused ja küttekoormused tuletati kraadpäevade jaotusest (Loigu ja Kõiv, 2006). Esimene töötükk, mis vastab tinglikult oktoobrile ja novembrile, kestis 2 kuud, küttekoormus vastas aasta keskmisele. Teine tükk (4 kuud, kahekordne küttekoormus) vastab ajale detsember kuni märts, kolmas tükk (2 kuud, aasta keskmine võimsus) vastab aprillile-maile ning neljas tükk (4 kuud küttekoormus 0) vastab suvekuudele. Loodi ka teine mudel, mille summaarne aastane küttekoormus on eelmisega võrdne, kuid talvetsüklile oli lisatud 10-päevane periood, mil küttekoormus oli aasta keskmisega võrreldes neljakordne ning sama pikad koormusvabad perioodid olid lisatud sügisele ja kevadele.

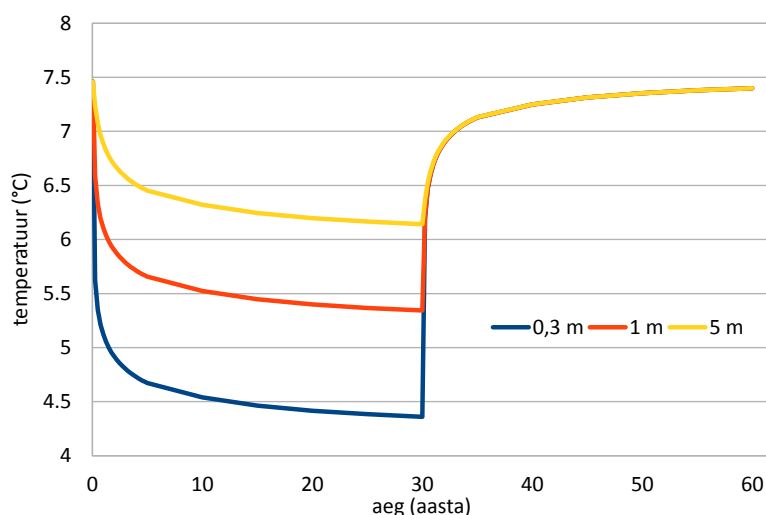
² Soojuskontuuri erivõimsus iseloomustab tippkoormusel ainult maa seest võetavat energiat. Näiteks kui soojuspumba väljundvõimsus on 6 kW ja $SPF=4$, siis soojuskontuuri erivõimsus on $6\text{ kW} \times (SPF - 1) / SPF = 4,5\text{ kW}$, 100 m soojuspuuraugu korral on erivõimsus $4500\text{ W} / 100\text{ m} = 45\text{ W/m}$.

Tulemused näitavad, et temperatuur puuraugus järgib küttekoormust ja saavutab pooltasakaalulise seisundi mõne päevaga nii koormuse kasvades kui ka kahanedes (Joonis 4). Tippkoormuse ajal langeb soojuspuuraugus temperatuur alla külmumispunkti, kuid see ei põhjusta ulatuslikku jahtumist. Kui summaarne küttekoormus on sama, siis „talve“ lõpuks on temperatuurid ühesugused.



Joonis 4. Arvutatud temperatuurikäik kaheaastase perioodi jooksul soojuspuuraugus ($r=0$ m) ja 30 cm kaugusel keskmest. Aasta on tinglikult jaotatud erineva soojuskoormusega perioodideks. Pidevjoonega on tähistatud temperatuurid, mille arvutamisel oli sügisel ja kevadel ööpäeva keskmine soojavõtt puuraugust 10 W/m, talvel 20 W/m ja suvel 0 W/m. Kriipsjoonega on tähistatud temperatuurid, mille arvutamisel on küttegraafikus 10-päevane periood koormusega 40 W/m talvel ning koormusvabad perioodid sügisel ja kevadel. Tulemused näitavad, et temperatuur puuraugus peegeldab eelnevate päevade-nädalate küttekoormust, tarbimise lakkamisel toimub kiire taastumine.

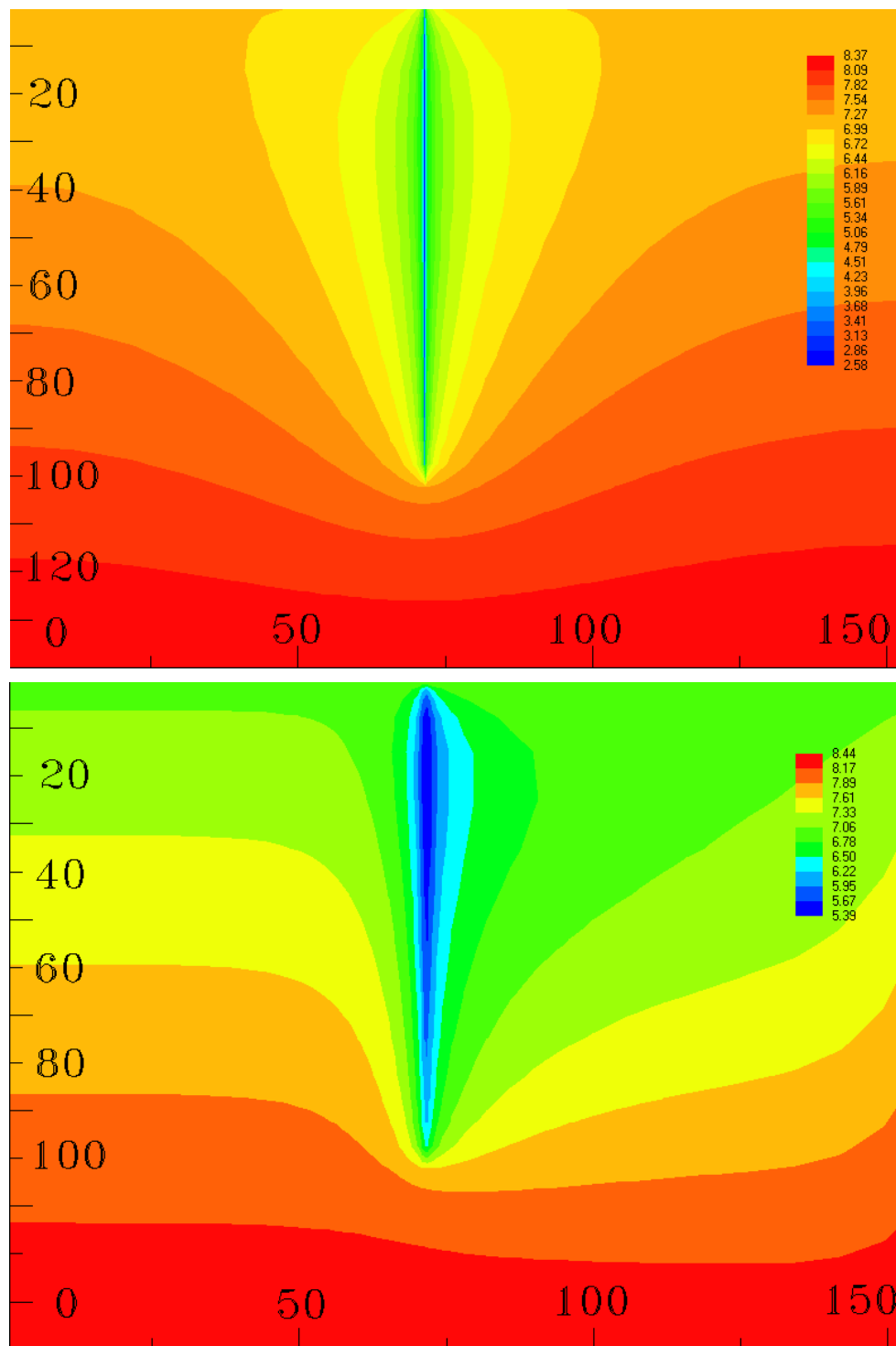
Pikaajalise mõju uurimiseks kasutati pidevat küttekoormust, mis vastas aasta keskmisele koormusele. Soojuspuuraugu tööle rakendamisel alaneb keskmine temperatuur esimese paari aasta jooksul mõne kraadi võrra, kuid neljandast-viiendast aastast alates temperatuuri alanemine aeglustub (Joonis 5). 30-ne aasta järel langeb temperatuur 0,3 m kaugusel 3,1 kraadi, 1 m kaugusel 2,1 kraadi ning 5 m kaugusel 1,3 kraadi. Temperatuurijooned on jätkuvalt alanevad, mis tähendab, et tasakaalu pole saavutatud. Soojatarbimise lõppemisel toimub kiire temperatuuri tõus ning ühtlustumine. Ühe aasta möödudes on temperatuurid võrdsed. Viie aastaga kaob 90 % eelnenud tarbimisperioodi jooksul tekitatud temperatuurianomaaliast.



Joonis 5. Keskmine temperatuur erineval kaugusel soojuspuuraugust 30 aastase soojatarbimise ja sellele järgneva taastumisperioodi jooksul.

Mitme soojuspuuraugust koosneva süsteemi rajamisel on oluline pöörata tähelepanu puuraukude asendile ja sellest tulenevatele võimalikele kõrvalmõjudele. Üksiku ja puuraukude paari korral käitub temperatuur suhteliselt sarnaselt. Suve lõpuks toimub peaaegu täielik taastumine mõlemal juhul. Neljast puuraugust koosneva ruudukujulise süsteemi korral langeb 1 m ja 5 m kaugusel puuraugust temperatuur kahe aastaga vastavalt u. 1 °C ja 0,5 °C rohkem kui üksiku puuraugu korral. Üksiku puuraugu korral levib soojus puuraugu poole igast suunast. Reas asetsevate puuraukude korral toimub see otsmiste puuraukude juures poolringi kujuliselt alalt ning puurauke ühendaval sirgel mõlemalt poolt. Ruudukujulise paigutuse korral jahutatakse koormuse rakendamisel ruudu sisse jääv ala maha ning väljastpoolt kandub soojust sinna vähe. Seega osaleb see ruumiosa soojuse tarbimises ainult vähendatud mahu. Ka suvine taastumine toimub seal kehvemini ja eeldab pigem täiendavate võtetega taastumise abistamist (päikesepaneelide või jahutusseadmete soojuse akumulimine). Sellest tulenevalt on reas paiknevad soojuspuuraugud efektiivsemad kui ruudukujuliselt. Efektiivsuse põhjuseks on see, et rivis olevad soojuspuuraugud võtavad soojuse suuremalt alalt, mis omakorda nõuab suurema ala olemasolu. (Gaškov, 2011)

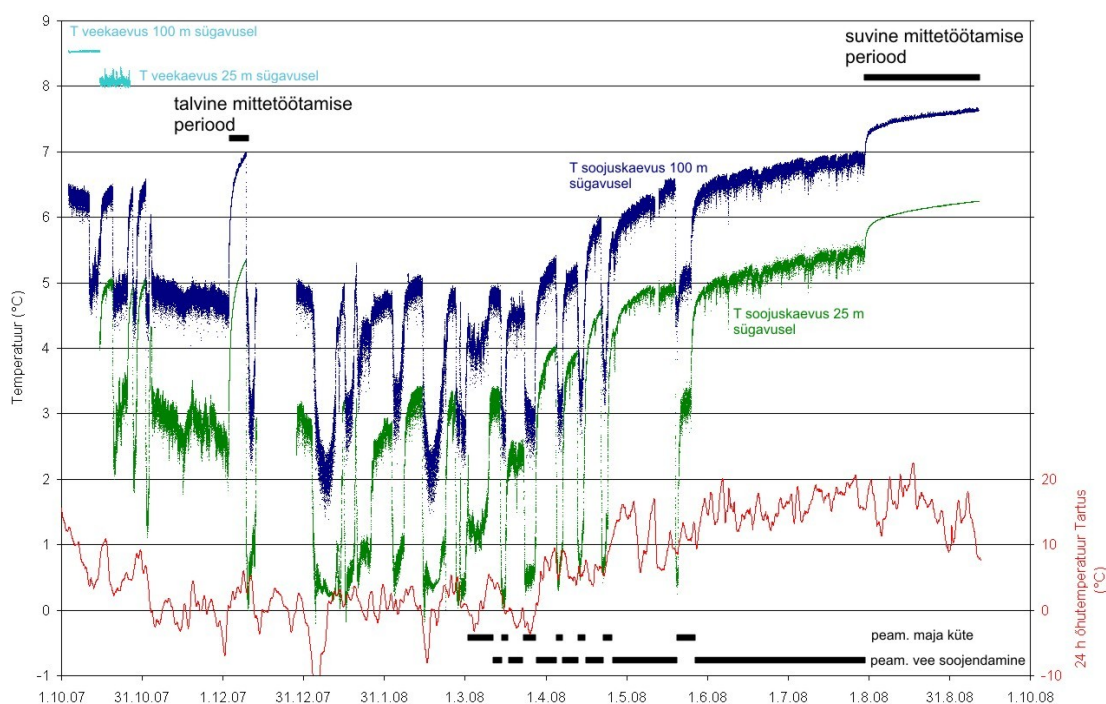
Põhjavee liikumine on üks teguritest, mis soodustab soojuspuuraukude kasutamist, kuna ühelt poolt ei lase tarbimise ajal temperatuuril langeda ja seega aitab süsteemil püsida efektiivsena, ning teiselt poolt aitab soojusväljal puhkeperioodi jooksul taastuda. Jahedam vesi kandub puuraugust eemale ning hajub ja soojeneb eemal üles (Joonis 6). Kiirema põhjavee liikumisega aladel on võimalik jätkusuutlikult tarvitada ka suuremaid võimsusi.



Joonis 6. Temperatuurivälja läbilõige soojuspuurangu ümbruses peale 30 aastast tööd mittevoolava (ülal) ja voolava (all) põhjavee korral. Vee liikumisega vasakult paremale kandub jahedam ala puuraugust allavoolu. Põhjavee survetaseme gradient 2 m/km, filtratsioonikoefitsient 2 m/d. Läbilõigete temperatuuri skaalad on erinevad.

Vaatlused

Kinnise soojussüsteemi temperatuurimonitooringu andmed aastatest 2007–2011 pärinevad Harjumaalt Haabneemest Vahtra 6 eramust. Soojussüsteem rajati aastal 1994 ning seega peegeldavad vaatlusandmed töötamise 14. – 17. kütthooaega. Pikaajalise monitooringu ajal asus temperatuuriloger 100 m sügavusel (puurkaevu sügavus 150 m), 2007 – 2008 hooajal on olnud teine loger samas puuraugus 25 m sügavusel ning lühiajaliselt on salvestatud temperatuure olmeveekaevus samadel sügavustel. Veetasemed olid 8 – 9 m sügavusel. Andmeid on salvestatud 5 – 10 min intervalliga. Vaatlusandmed on kooskõlas modelleerimistulemustega. Andmetes on näha soojuspumba töötamist mitmel režiimil (Joonis 7). Põhilise osa kütteperioodist on temperatuur 100 m sügavusel vahemikus 4–5 °C, 25 m sügavusel 2–3 °C³. See iseloomustab keskmise koormusega töötamist, kus kütteperioodid vahelduvad puhkeperioodidega. Talvel on ka suurema koormuse aegu, mil soojuspump töötab ainult lühikeste puhkepausidega mitmeid päevi ja siis langeb temperatuur 100 m sügavusel 1–3 kraadini, puuraugu ülaosas on samal ajal esinenud jäätumist. 30 m eemal asuvas puurkaevus tehtud mõõtmiste kohaselt on häirimatu temperatuur 100 m sügavusel 8,6 °C. 25 m sügavusel on temperatuur 8 °C, kuid seda on mõjutanud vee tarbimine (sügavalt pumba poole tõusev vesi soojendab puurkaevu ülaosa).

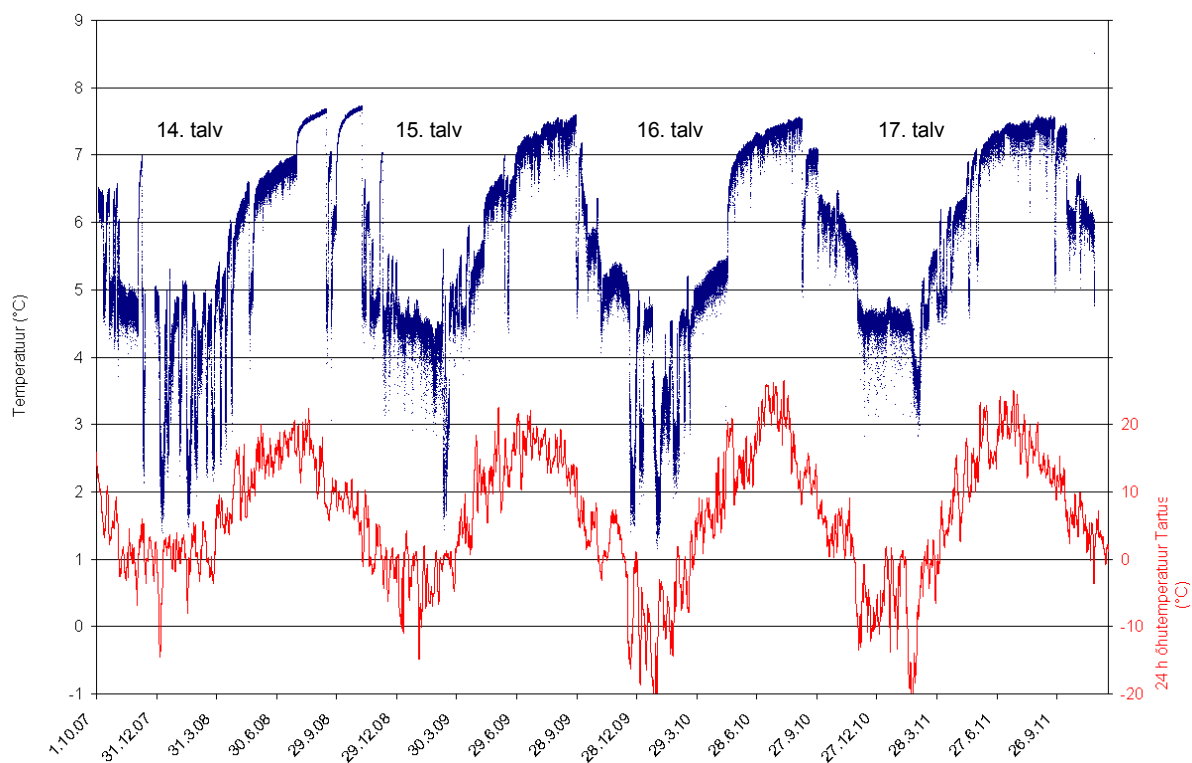


Joonis 7. Temperatuurid Haabneeme Vahtra 6 soojuskaevus ja olmevee puurkaevus erinevatel sügavustel. Temperatuurid soojuspuurkaevus peegeldavad kütterežiimi varieerumist. Võrdluseks on ööpäeva keskmised õhitemperatuuri andmed Tartust (<http://meteo.physic.ut.ee>).

Soojuspuurkaevus toimunud pikaajalised muutused ei ole suured (Joonis 8). Iga suve lõpuks tõuseb temperatuur 100 m sügavusel 7,5 °C-ni, mis on ligikaudu ühe kraadi võrra vähem kui olmevee

³ Puuraugu ülaosas sügavuseni 40 m esineb Kambriumi sinisavi, mille soojusjuhtivustegur $\lambda=1,3 \text{ W}/(\text{m K})$, sügavamal on Ediacara liivakivi ja aleuroliit, mille $\lambda =1,9 – 2,5 \text{ W}/(\text{m K})$ ja kus toimub põhjavee lateraalne voolamine.

puurkaevus samal sügavusel. Seejuures ei ole soojuspuurkaev suviti mitte täielikult puhkerežiimil, vaid energiat tarbitakse olmevee soojendamiseks.



Joonis 8. Monitooritud temperatuur Haabneeme soojuspuuraugus 100 m sügavusel. Õhutemperatuuri andmed <http://meteo.physic.ut.ee>.

Vaatlusi on tehtud ka Tallinnas Nurme 37 soojuspuurkaevus ja tulemused on toodud varasemas uuringus (Jõelett, 2007). Soojuspuurkaev rajati 1998. aastal ning 2007. aasta märtsist juulini tehtud vaatlused iseloomustavad üheksanda küttehoaja lõppu ja suvist taastumist. Temperatuur 80 m sügavusel (sinisavi tasemel, 20 m allpool veetasel) oli kevadel 1,5–2,5 °C ning kerkis juuli lõpuks 4,5–5,5 °C-ni. Eramu eripärana on küllaltki suur tarbevee soojendamise vajadus. Juunis oli periood, kus vee soojendamise maht oli väike ning selle tulemusena kerkis temperatuur 6 kraadini. Samale tasemele tõusis temperatuur ka kütteperioodi lõpus, kui automaatika rikke tõttu ei toimunud soojuse tarbimist kolme nädala jooksul. Üldine temperatuuri käik on sarnane Vahtra 6 soojuspuuraugu ülaosale, mis on samuti Kambriumi sinisavis.

Avatud soojussüsteem

Avatud süsteemis toimib valdavalt konvektiivne soojuskanne, kus soojus kandub edasi koos voolava põhjaveega. Konvektiivne soojusvahetus on väga efektiivne võrreldes soojusjuhtivusega. Tänu vee suurele soojusmahtuvusele (erisoojus umbes 4 korda suurem kui tüüpilisel kivimil) suudab vesi kaasas kanda suurt kogust energiat. Ülekande vahemaa kivimilt veele on lühike ning kivimi ja

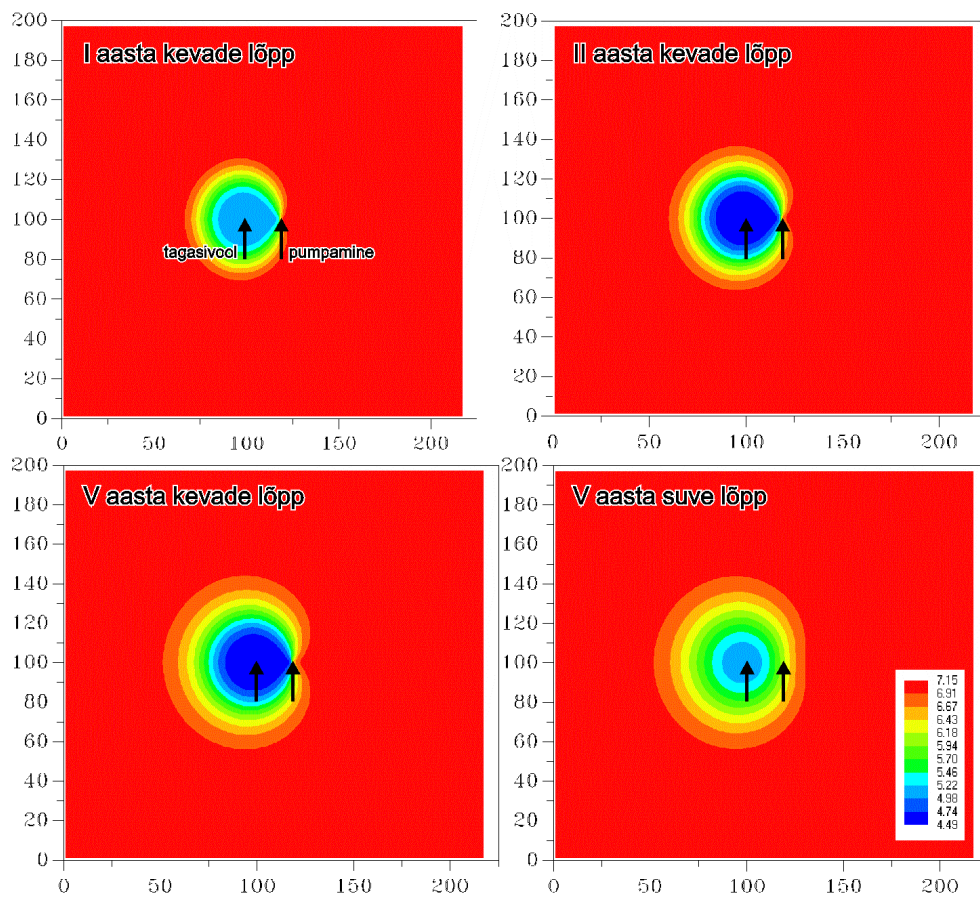
poorides oleva vee temperatuurid on sisuliselt pidevas tasakaalus. Kivimites voolav põhjavesi ühtlustab temperatuure vastavalt läbivoolu hulgale. Kuna põhjavee voolamine soojuspuurkaevude ümbruses toimub küllaltki laial alal, siis on temperatuuriväli suhteliselt silutud. Võetava energia hulk sõltub otseselt väljapumbatava vee mahust ja jahutamise määra.

Modelleerimine

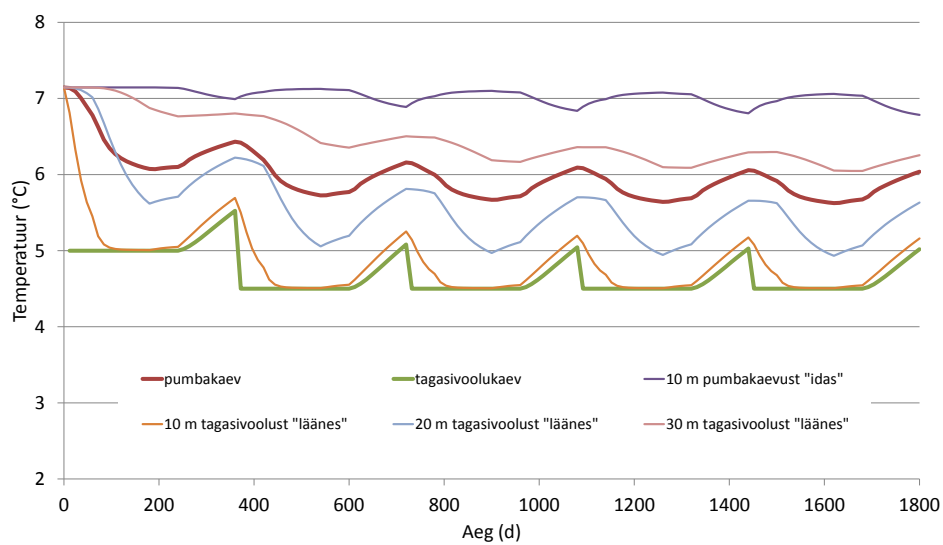
Avatud süsteemi soojuspuurkaevude töötamisega kaasnevate temperatuurivälja muutuste kirjeldamiseks loodi samuti 3D mudelid kasutades tarkvaraprogrammi Processing SHEMAT. Mudelisse sünditi ühe puurkaevuga jahutat vett (esimesel aastal 5 °C, järgnevatel 4,5 °C) aasta keskmise mahuga 0,5 l/s ja teise puurkaevuga eemaldati sama kogus vett mudelist. Puurkaevude vahekaugus on 20 m, pumpamine toimub kümne meetrises intervallis sügavusel 8 – 18 m. Sarnaselt kinnise süsteemi modelleerimisega jaotati aasta neljaks erineva pumpamismahuga perioodiks (vastavalt 0,5 – 1 – 0,5 – 0 l/s). Modelleeritud soojussüsteemi aastane küttehulk on ligikaudu 35 000 kWh ehk peaaegu kaks korda suurem kui tavalisel eramul.

Modelleerimise tulemused näitavad, et tagasivoolu puurkaevu ümber tekkiv jahutatud ala raadius on ligikaudu võrdne puurkaevude vahelise kaugusega (Joonis 9). Esimesel aastal on jahutatud ala väiksem kui kaevude vaheline kaugus ning kergelt välja venitatud pumbatava kaevu suunas (selline pilt on pikaajaliselt iseloomulik ka sellistele süsteemidele, kus pumpamismaht on väiksem või puurkaevude vahekaugus on suhteliselt suurem). Pumbatava vee temperatuur püsib jätkuvalt kõrgem kui tagasijuhitava vee temperatuur, kuna pumbatavasse kaevu voolab vett ka teistest suundadest peale tagasivoolukaevu suuna.

Jahutatud ala ulatus kujuneb suuremalt jaolt välja teise kütteperioodi lõpuks (Joonis 9, II aasta kevad), edasine laienemine toimub aeglaselt. Madalate temperatuuride ala püsib ligikaudu sama suur, mõnevõrra laieneb üleminekuliste temperatuuride vöönd. Suvel toimub soojusvälja taastumine ja ühtlustumine. Ühtlasel režiimil töötades ei ole toimu olulisi pikaajalisi temperatuurimuutusi (Joonis 10).



Joonis 9. Modelleeritud temperatuur avatud süsteemi soojuspuurkaevude ümbruses sügavusel, mis vastab puurkaevude keskkohale. Tagasivoolukaevu ja pumbatava kaevu asukohad on tähistatud nooltega.

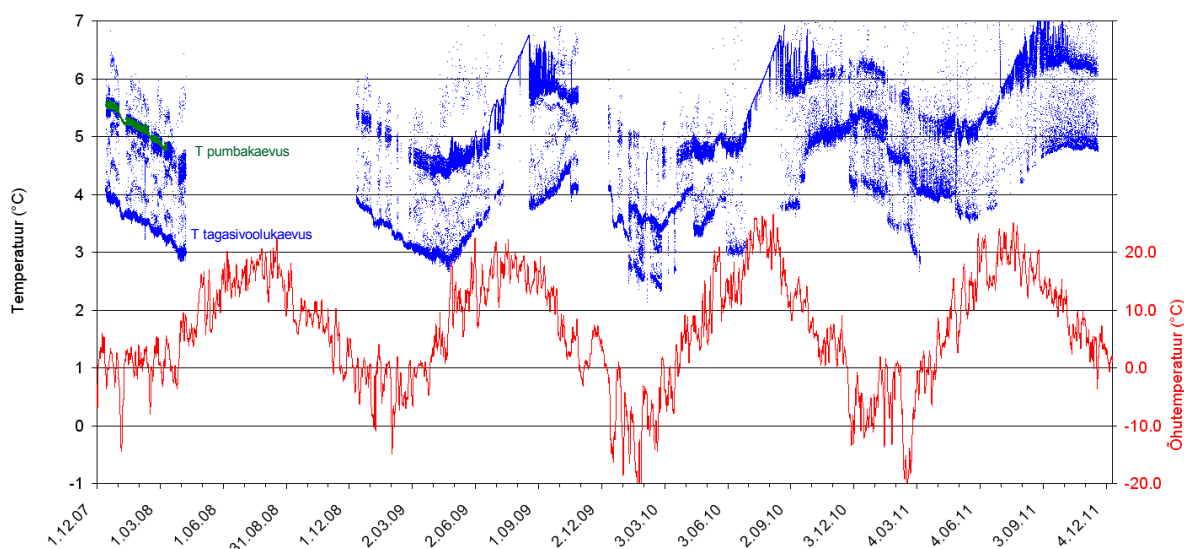


Joonis 10. Arvutatud temperatuurid erinevates mudeli punktides 5-aastase perioodi jooksul.

Vaatlused

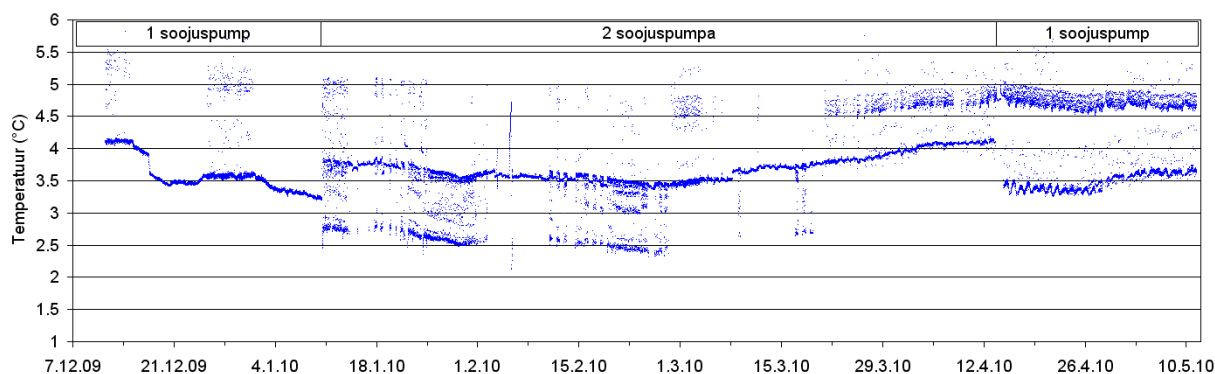
Avatud süsteemi käitumist vaadeldi Järvemaal Oisu külas Pikk 1 kinnistul aastatel 2007 – 2011. Soojussüsteem koosneb kahest 10 m sügavusele ulatuvast puurkaevust, millede vaheline kaugus on 18 m. Süsteem rajati 1990ndate lõpus. Aastal 2010 jaanuaris lisati olemasolevale 22 kW soojuspumbale täiendav 18 kW soojuspump. Vaatluste alguses paigaldati logerid pumbatavas puurkaevu ja tagasivoolupuurkaevu ja veenduti, et soojuspumba automaatika lülitab esmalt sisse veepumba ja alles paari minuti pärast lülitub sisse kompressor. Seetõttu jõuab tagasivoolukaevu vesi, mida pole jahutatud ja tagasivoolukaevus registreeritud temperatuur näitab ka pumbatava vee temperatuuri (Joonis 11).

Monitooringu tulemused näitavad avatud süsteemi vähest jahutamist. Kuigi tagasijuhitava vee temperatuur võib langeda alla 3 °C, on pumbatava põhjavee temperatuur ikka vähemalt 4,5 °C, mis tagab soojuspumba kõrge SPF väärtuse.



Joonis 11. Temperatuurid Oisu küla avatud soojussüsteemi pumbatavas kaevus (rohelisega) ja tagasivoolukaevus (sinisega).

Aastal 2010 jaanuaris uue soojuspumba lisamisel seadistati süsteem ümber selliselt, et tavaliselt kütab uuem 18 kW soojuspump ning kui selle võimsusest ei piisa, siis lülitub töösse ka vanem 22 kW soojuspump. Pumpamismaht jäi samaks ning kahe soojuspumba töötamise korral alandatakse tagasijuhitava vee temperatuuri rohkem (Joonis 12). On märkimisväärne, et suurema temperatuurialanduse tulemusena ei toimu olulist temperatuuri langust pumbatavas kaevus (püsib vahemikus 4,5 – 5,0 °C).



Joonis 12. Kahe soojuspumba üksikult ja koos töötamise mõju tagasijuhitava vee temperatuurile.

Varasemalt on tehtud vaatlusi Uuemõisas Tehnika 30 soojuskaevudes, mõõtmistulemused on esitatud varasemas aruandes (Jõelet, 2007). 2007 jaanuaris, märtsis ja mais mõõdeti temperatuuri sügavuti tagasivoolukaevus ning kahes vaatluskaevus, mis paiknesid soojussüsteemi kaevudega samal joonel tagasivoolukaevust vastavalt 11 ja 31 m kaugusel. Tagasijuhitava vee temperatuur oli jaanuaris umbes 2,5 °C, märtsis ja mais ligikaudu 5 °C. Lähemal asuvas vaatluskaevus oli jaanuaris ja märtsis näha soojussüsteemi mõju (temperatuur veekihi sügavusel 4 – 5 °C), kuid maiks oli mõju kadunud. Kuigi süsteemi võib lugeda suureks (soojuspumba väljundvõimsus 42 kW), ei täheldatud kaugemal asuvas vaatluskaevus mingeid konvektiivse soojuskande mõjutusi (jälgitav on aastaste maapinnatemperatuuri muutuste kandumine sügavuti).

Nii Oisu kui ka Uuemõisa andmed näitavad, et suured ligikaudu 40 kW võimsusega süsteemid töötavad ilma tõrgeteta, kui pumpamismahud on valitud korrektselt.

Soojussüsteemide rajamine ja kaasnevad ohud

Avatud soojussüsteemi puurkaevude rajamine

Avatud süsteemi soojuspuurkaevude rajamine (puurimine, manteldamine, filtri paigaldamine, mantlitaguse isoleerimine) ei erine veehaarde puurkaevude rajamisest. Rajamine on reguleeritud veeseadusega (kehtiv redaktsioon RT I, 21.12.2011, 19) ja keskkonnaministri määrusega nr. 37, 29.07.2010 (RT I, 15.09.2011, 5).

Soojuspuurkaevu vesi tuleb tagasi juhtida samasse veekihti, et vältida veekihtide segunemist ja veehulga vähenemist. Tagasijuhitava vee õhutamist saab oluliselt vähendada, kui tagasivoolutoru ots ulatub allapoole staatilist veetaset ja puurkaevu suue on veekihtlalt suletud. Viimane abinõu aitab ära hoida võimaliku ülevoolu esinemise.

Avatud süsteemi soojuspuurkaevudega kaasneb reostusohu ka nõuetekohase teostamise korral. Nende rajamise seaduslik kord nõuab puurkaevude suudmete sulgemist, kuid päriselt ei saa välistada, et puurkaevu sattub reostunud aineid, mis saavad puurkaevu pidi vabalt voolata avatud veekihti. Sarnaselt seirekaevudega ei toimu soojuspuurkaevudest summaarselt põhjavee (ja reostuse) väljapumpamist. Seetõttu on mõistlik rajada soojuspuurkaevu pinnakattesse või maapinnalt esimesse aluspõhjalisse veekihti. Sügavate veekihtide kasutamisega ei kaasne tavaliselt olulist soojuslikku lisaefekti, kuna temperatuurid mõnesaja meetri sügavusel on ainult mõne kraadi jagu kõrgemad kui maapinna lähedal. Sügavate veekihtide kasutusele võtmine soojuspuurkaevudega vajab kaalumist juhul, kui maapinnalähedane veekiht on intensiivses kasutuses joogivee saamiseks ja kui sügavam veekiht oma soolsuse või muude omaduste poolest ei sobi joogiveeks.

Avatud soojussüsteemi rajamist ei tohiks lubada kinnitatud varuga veekihti. Erandiks võiksid olla veekihi väljavoolu alad.

Vee juhtimine survealises veekihti

Omaette käsitlemist vajab lähteülesandes sõnastatud küsimus „kas survealises põhjavett on võimalik tagasi juhtida?“. Eestis kasutusel oleva terminoloogia kohaselt loetakse survealises põhjavett, mis asub vettpidavate kihtide vahel ning põhjavee survealises on kõrgemal veekihi pealispinnast. Enamik Eestis veekihte on survealised. Maapinnalähedase vabapinnalise veekihi all levib mitmeid veepidemetega eraldatud kihte, mis on täielikult küllastunud. Surveline veekiht ei tähenda, et sinna rajatud puurkaevu vesi voolaks üle toruotsa välja. Näiteks Tallinnas Kambrium-Vendi veekihti rajatud puurkaevus on veetaseme maapinnalt mitmekümne meetri sügavusel ja samas ka mitukümmend meetrit veekihi pealispinnast üleval pool.

Põhjavee liikumine veekihi veevõtul ja tagasijuhtimisel on samasugune. Põhjavee väljapumpamisel alandatakse puurkaevus põhjavee taset, mis tekitab veekihi survegradiendi ja paneb põhjavee puurkaevu suunas liikuma. Sarnaselt pumpamisel tekkiva alanduslehttriga tekib tagasijuhtimisel lehtrikujuline veetaseme tõus, mis paneb vee puurkaevust eemale voolama. Konkreetse veekoguse välja pumpamisel tekkiv veetaseme alandus on sama suur kui selle koguse samasse puurkaevu tagasi juhtimisel tekkiv tõus. Kasutades eelpool toodud Tallinnasse rajatud puurkaevu näidet, siis võib väita,

et kui ühest puurkaevust võetakse vett tekitades 2 meetrine alandus võrreldes staatilise veetasemega, siis samasuguse konstruktsiooniga teise puurkaevu kaudu selle vee tagasi juhtimisel tekitatakse veetaseme tõus 2 meetrit üle staatilise taseme, mis jääb ikkagi mitmekümne meetri sügavusele. Seega põhjaveekihi surve ei ole probleemide aluseks.

Põhjavee tagasijuhtimine on probleemne tingimustes, kus puurkaevud on rajatud madala veejuhtivusega veekihti ja staatiline veetase on maapinna lähedal. Kui mitmemeterne veetaseme alandus on pumpamisel aktsepteeritav, siis sama suur veetaseme tõus võib muuta puurkaevu ülevoolavaks. Lisaks on tavaline, et aja jooksul puurkaevude erideebit kahaneb ehk alandus sama pumpamismahu juures suureneb filtri liiva ja rauaühenditega ummistumise tõttu. Tagasivoolukaevus võib lisanduda veel ummistumine saviosakestega, mis kanduvad koos põhjaveega pumbatavast kaevust.

Probleeme on võimalik eelnevalt ennetada ja hiljem leevendada. Ennetavad lahendused on seotud puurkaevu konstruktsiooniga. Võtted on põhimõtteliselt samad, mida rakendatakse puurkaevudes suurte alanduste vältimiseks ehk tuleks suurendada puurkaevu avatud intervalli pikkust sama veekihi piires (teise veekihti minek ei ole lubatav) ja/või suurendada diameetrit. Sügavamale või jämedamalt puurimine muudavad puurkaevu kallimaks, kuid sõltuvalt kohalikest oludest võib osutuda vajalikuks.

Kindlasti on üheks alternatiiviks tagasivoolukaevu veekindel sulgemine. Eestis on kohustus hoida puurkaevude suudmed suletuna, kuid sageli ei tehta seda vettpidavalt. Teisalt avatud soojussüsteemide ülevoolavates puurkaevudes tõstetakse veetaset maksimaalselt mõne meetri jagu üle suudme (<0,5 bar). Seda on oluliselt vähem kui rõhk veetrassides ja seega tehniliselt pole probleem. Töö autoritel on olnud võimalus veenduda, et Haapsalus Pääsukese tänaval rajatud puurkaevud on suletud veekindlalt. 2007ndal aastal teostatud uuringute käigus avati mõõtmiste ajaks tagasivoolukaev, mille suudmel oli kummitihendi ja poltidega suletav kaas. Kaevus tehtud mõõtmiste ajal lülitus küttesüsteem tööle ja mõne aja möödudes tõusis veetase vaikselt üle toru otsa. Puurkaevu asukohas on maapind ainult ligikaudu 3 m üle merepinna ning mõõtmiste eel oli veetase 1,5 m sügavusel. Mõõtmiste lõppedes paigaldati kaas ning vett enam ei lekkinud. Selle ja naaberkinnistul oleva tagasivoolu puurkaevu ümbruses ei olnud näha mingeid jälgi varasemast vee lekkimisest ei 2007ndal aastal ega ka 2011ndal aastal.

Hilisema leevendamise võtteks on puhastuspumpamise regulaarne teostamine. Ka siin võib tuua näite Läänemaalt. Uuemõisas Tehnika 30 asuva avatud soojussüsteemi tagasivoolukaev oli küll korgiga suletud, kuid esimesel küttehooajal esines kohati vee ülevoolamist korgi keerme vahelt. Suviti on teostatud puurkaevu puhastamist kompressori abil ning järgnevatel talvedel pole enam ülevoolamist esinenud. Väärub märkimist, et Uuemõisas rajatud süsteem on suure võimsusega (soojuspumba väljundvõimsus 42 kW) ning pumpamismahud ületavad tüüpilise eramu vajadust 2 – 4 korda.

Probleemid tekkivad ka siis, kui puuritakse surveist veekihti, mille veetase on looduslikult üle maapinna. Probleemid seisnevad mantelduse/täitmise teostamises ja juba teostatud puurkaevust ülevoolava veega toimetulekus. Kuigi ülevoolavate puurkaevude manteldamine ja täitmine (likvideerimine) on tehniliselt keerukam, on Eesti puurijatel vastavad kogemused olemas. Olukorrad lahendatakse vastavalt kohalikele tingimustele. Enamasti eeldab see veetaseme alandamist

pumbates sama või läheduses asuvat samasse veekihti rajatud puurkaevu. Ülevoolu hilisemaks takistamiseks suletakse puurkaevud veekihtlalt.

Kinnise soojussüsteemi puuraukude rajamine

Kinnise soojussüsteemi rajamisel on mitmeid võimalusi. Kehtiva korra (RT I, 15.09.2011, 5) kohaselt tuleb soojuspuurauk pärast soojuskontuuri paigaldamist kogu puuraugu ulatuses täita veekihte isoleeriva ja keskkonnale ohutu materjaliga. Kehtiv kord ei reguleeri mantelitorude kasutamist soojuspuuraukudes. Juhul, kui geoloogiline läbilõike võimaldab puurimist ühesuguse diameetriga, siis käesoleva töö autorite arvates on erinevaid veekihte võimalik paremini isoleerida teineteisest juhul, kui manteltorusid ei paigaldata püsivalt. Tööde käik võiks olla järgnev. Sõltuvalt puurimiseks kasutatavast tehnikast ja geoloogilisest läbilõikest puuritakse puurauk kavandatud sügavuseni ühesuguse diameetriga (pudenevate kivimite püsivust saab parandada kasutades näiteks polümeeridel põhinevaid puurlahuseid) ja paigaldatakse ajutiselt mantelтору/konduktor. Järgmisena paigaldatakse soojuskontuur (U- või topelt-U-torustik veega täidetuna ja/või põhjaraskusega, et parandada uppuvust) ja koos kontuuriga ka lisatoru, mis samuti ulatub puuraugu põhjani ja mille kaudu hakatakse puurauku täitma. Täitmine toimub seni, kuni täitematerjal on tõusnud maapinnani. Seejärel tõstetakse välja ajutiselt paigaldatud mantelтору ja lisatakse järkjärgult täitematerjali (täide vajub sügavamale mantelтору ja torutaguse ruumi arvelt).

Mantelтору eemaldamisel vajub täitematerjal oma raskuse tulemusena vastu puuraugu seina täites puurimisel tekkinud lõhed, kuid ei tungi ulatuslikult veekihtidesse. Veehaarde puurkaevude rajamisel on kohati probleemiks mantelitorude taguse isolatsiooni teostamine, kuna ettepuuritud augu ja mantelтору vaheline ruum on kitsas. Mitmekümne meetri sügavuse puuraugu korral on kogu puuraugu ulatuses mantelitorude tsentreerimine võimatu ning betoon ei tungi igale poole ühtlaselt vahele jättes kehvemini täidetuks kohad, kus toru toetub vastu seina. Sellistele kohtadele võivad jääda pilud, mida mööda saab vesi vertikaalselt voolata ühest veekihist teise. Lisaks võib lõhelistes kivimites mantelтору taha pressitav segu tungida kaugele veekihti. Seda eriti juhul, kui läheduses on suure tootlikkusega veehaare.

Juhul, kui geoloogilise läbilõike või puurimistehnika tõttu tuleb soojuspuuraugu ülaosa eraldi manteldada, siis tuleb seda teha sarnaselt veehaarde puurkaevude rajamisega (mantlitagune täitmine alt üles), kuid puuraugu sügavama osa täitmise võiks ikkagi teostada ilma manteltorudeta.

Kõik soojuskontuuri maa-alused liited peavad olema teostatud keevisliitega (eelistatult tehasepaigaldusega tagasipööre soojuskontuuri alaosas). Soojuskontuurina ja soojuspuuraugu täitena tohiks kasutada vaid selliseid materjale, millel on vastavusertifikaat, vastavusdeklaratsioon või vastavusmärk.

Ilma manteltorudeta teostatud soojuspuurauk ei peaks kohustuslikult ulatuma maapinnani, kuna (i) maapinnal on suurem oht vigastada soojuskontuuri, (ii) soojuspuuraugu ja soojuspumba vahel veetakse soojuskontuur nagoonii maa alt, ja (iii) soojuskontuuri maapinnale toomisel tekkivad energiakaod.

Otseaurustiga soojussüsteemi puuraukude rajamine

Otseaurustiga soojussüsteemidega seotud riskid põhjaveele on sarnased kinniste süsteemidega. Torustiku paigaldamiseks rajatav puurauk tuleb täita veekihte isoleeriva materjaliga, et vältida erinevate veekihtide ühendamist ning reostuse kandumist sügavuti. Kui aurusti torustikus kasutatakse keskkonnale ohutut külmaainet, siis puudub seadmest tulenev reostamise oht. Tehnoloogiast tulenevalt peab aurusti torustik olema nagunii korralike ühendustega (peab kinni pidama gaasilist külmaainet). Kui aurusti amortiseerub, siis tuleb torustik likvideerida täites selle ainega, mis takistab vedelike liikumist.

Otseaurustiga soojussüsteemide rajamise kogemusi on Euroopas vähe. Kuigi on ette näha, et tehnoloogiate arenedes tulevad peagi turule tehnilised lahendused, mis võimaldavad soojuste ammutamist sügavamate puuraukudega (praegu kuni 20 m), tuleks eelistada avatud ja kinniseid soojussüsteeme, mille rajamise tehnoloogia on pikaajaliselt läbi testitud. Otseaurustiga soojussüsteemi rajaja peab tõestama, et kasutatavad materjalid (torud, puuraugutäide, külmaaine) on keskkonnale ohutud ja antud eesmärgiks mõeldud (nõutav vastavussertifikaatide olemasolu).

Soojussüsteemides kasutatavad vedelikud ja nende keskkonnaohtlikkus

Kinniste soojussüsteemide kontuurides on vesilahused, mille lisanditena kasutatakse denatureeritud etanooli, etüleenglükooli või propüleenglükooli. Eesti Soojuspumba Liidu liikmete seas tehtud päringute kohaselt on valdavaks piirituse kasutamine, glükooli kasutatakse harva. Enamasti on lisandi kontsentratsioon 30%, millega alandatakse vesilahuse külmumistemperatuuri -15 °C.

Piirituse denatureerimine on kooskõlas Euroopa Komisjoni määrusega nr. 3199/93 (EÜT L 288, 23.11.1993) ja vastavalt alkoholi-, tubaka-, kütuse- ja elektriaktsiisi seadusele (RT I 2007, 45, 319) peab denatureeritud piiritus sisaldama 100 liitri 100 protsendilise etanooli kohta vähemalt (i) metüületüülketooni 2 liitrit ja metüülisobutüülketooni 3 liitrit või (ii) atsetooni 2 liitrit ja metüülisobutüülketooni 3 liitrit või (iii) atsetooni 3 liitrit ja denatooniumbensoaati 2 grammi. Denatureerimise eesmärk on muuta piiritus joogikõlbmatuks. Ülatoodud lisandid kutsuvad puhta denatureeritud piirituse tarvitamisel esile iiveldust ja oksendamist, kuid ei ole tervisele ohtlik.

Propüleenglükool on mittetoksiline aine, mis laguneb õhu ja soojuste toimele piimhappeks. Propüleenglükooli kasutatakse toidutööstuse jahutusseadmetes.

Etüleenglükool on lõhnatu magusa maitsega mürgine vedelik. Ta on keskmise toksilisusega (inimesele vähim surmav doos on 786 mg kehakaalu kg kohta). Kuigi etüleenglükool on üldisemalt jahutusseadmetes kasutatavatest külmakandvedelikest üks levinumaid, tuleks tema kasutamine soojuspuuraukudes keelata.

Soojuspumbas kasutatava külmaaine sattumine põhjavette on kinniste soojussüsteemide puhul välistatud. Samas avatud ja otseaurustiga süsteemide puhul on olemas võimalus, et külmaaine puutub kokku pinnase või põhjaveega. Kasutatavad ained on välistemperatuuridel ja õhurõhu juures gaasilised ja lekete korral lenduvad ning seetõttu ei kujuta nad ohtu veekeskkonnale. Eestis

kasutatakse enamasti segusid R407C ja R407A, mis kuuluvad fluorosüsivesinike (HFC) hulka ning on küllaltki levinud mitmesugustes jahutusseadmetes. HFC-d pole ei plahvatusohtlikud ega mürgised, seega võib neid kasutada inimeste poolt hõivatud ruumides väljaõppimata inimeste poolt, ilma et keegi viga saaks (www.klab.ee/Osoonibyuroo/OKAAlternat.pdf). Külmaainete kasutamist reguleerib Välisõhu kaitse seadus (RT I, 21.12.2011, 13) ning käitleja pädevusnõuded on sätestatud keskkonnaministri määrusega nr. 16, 11.03.2005 (RTL 2005, 32, 446).

Soojussüsteemid ehitiste all

Soojussüsteemide rajamisel ehitiste all tuleb vaadelda, kas see on ohutu keskkonnale (põhjaveele), ohutu hoonele, ohutu soojussüsteemile endale ning kas seejuures on tagatud süsteemi soojuslik pikaajalisus.

Nii avatud, kinniste kui ka otseaurustiga soojussüsteemide peale rajatavatest ehitistest enamikuga ei kaasne täiendavat ohtu keskkonnale. Vastupidi, pumbamajad ehitataksegi puurkaevudele saavutamaks täiendavat kaitset väliste ohutegurite (ilmastik, pinnareostus, mehhanismid, vandaalism jne.) vastu. Keskkonna aspektist ohtlikeks ehitisteks tuleb lugeda sellised, kus hoitakse reoootlike aineid või kus tekib kõrge kontsentratsiooniga vedelike (kütusehoidlad, väetisehoidlad, kemikaalihoidlad, sõnnikuhoidlad, laudad, jne.). Eramud, büroohooned jne. ei kujuta endast keskkonnoahtu, kui järgitakse puurkaevudele sätestatud nõudeid (mantelitorude põhikolonn vähemalt 30 cm üle põranda, põrandalt pärineva vee sissevool puurkaevu välistatud).

Kuna suuremate hoonete vajumine võib toimuda pikema aja jooksul ja neist sõltumatult võivad läbilõike sügavamas osas toimuda vertikaalliikumised vastavalt surve muutustele veekihis, siis vastastikkuste mõjude vähendamiseks on mõistlik soojuspuuraugu/–kaevu ruumi põrand eraldada ehitise vundamendist. Samas maailmas on üha rohkem populaarsust kogunud energiavaiade (*energy piles*) rajamine suuremate ehitiste alla. Kui ehitise kandekonstruktsioon eeldab vaiadele ehitamist, siis paigaldatakse puuritud⁴ aukudesse raudarmatuur, mille külge kinnitatakse kontuur. Energiavaiad on sisuliselt kinnise süsteemi soojuspuuraugud selle eripäraga, et kuna neil on ka ehitise kandefunktsioon, siis nende täitmisel kasutatakse betooni. Batoon ei ole pikaajaliselt korduvale külmumisele vastupidav ja seetõttu ei tohi kontuuri temperatuuri alandada alla 0°C.

Avatud soojussüsteemid ei kujuta endast ohtu ehitistele, kuna vee voolamine pinnases ei põhjusta pinnase kandevõime kadumist (ei ole teada ka juhtumeid, kus tarbepuurkaev oleks põhjustanud kahjustusi lähedalasuvate ehitise alustele).

Ainult ehitise alt energiat võttes hoonealune ruumiosa jahtub liialt. Tänapäevased (rohkete klaaspindadega) hooned vajavad suvist jahutamist ja talvist kütmist, kuid Eesti kliimast tulenevalt ületab küttevajadus jahutamisevajadust ning ainult maasoojuse kasutamise korral tekib puudujääk. Samas suvel energiavaiade kaudu akumuleeritud soojus on odavam (elekter kulub ainult tsirkulatsioonipumpadele ja automaatikale, soojuspump ei pea töötama) kui muud primaarenergia allikad ning aitab oluliselt vähendada täiendava kütte vajadust talvel. Küttevõime parandamiseks on võimalik süsteemiga ühendada päikesepatareid, mis samuti aitavad suvist päikesekiirgust koguda.

⁴ Puurimine toimub ehitusloa alusel, mitte puuraugu rajamise loa alusel.

Seega ehitisealuse soojussüsteemi pikaalisust saab tagada, kui maasoojusega ei kaeta kogu energiavajadust või kui rakendatakse täiendavaid võtteid soojusvälja taastamiseks.

Soojussüsteemide kaugus teistest objektidest

Haehnlein et al. (2010) on koostanud rahvusvahelise ülevaate madala geotermaalse energia (<400 m) kasutamise õiguslikust regulatsioonist erinevates riikides. Laiali saadetud küsimustikule saadi tagasisidet 46 riigist sealhulgas 26 Euroopa riigist (Austria, Belgia, Bosnia ja Hertsovgoviina, Bulgaaria, Holland, Iirimaa, Island, Kreeka, Leedu, Liechtenstein, Läti, Norra, Poola, Portugal, Prantsusmaa, Rootsi, Rumeenia, Saksamaa, Slovakkia, Sloveenia, Soome, Suurbritannia, Šveits, Taani, Tšehhi, Ungari). Ülevaates tõdetakse, et tavaliselt puudub spetsiaalne soojuspuuraukude rajamist reguleeriv seadusakt (reguleeritakse teiste aktide kaudu), kuid rajamist piiravaid tingimusi esineb ainult üksikutes riikides. Ka väljakujunenud turgudega maadel (nt. Saksamaa) on piirangud soovituslikud (juhendid) ja pole seaduse mõttes siduvad.

Piirangute eesmärk on tagada soojussüsteemi pikaajaline toimimine vältides seejuures muutusi põhjavee ökoloogilises seisundis ja veekihtide segunemist, puurimisaegse või ka hilisema reostuse levimist, aga ka mõjusid veehaaretele ja teistele soojussüsteemidele. On märkimisväärne, et sarnastes geoloogilistes ja kliimatilistes tingimustes asuvate naabermaade piirangud võivad palju erineda tulenevalt kasutamisel kujunenud praktikast. Mõningates riikides eristatakse avatud ja suletud süsteemidele esitatavaid piiranguid.

Enam levinud distantsilised piirangud kinniste süsteemide puhul on minimaalne kaugus kinnistu piirist (Austrias 2,5 m, Liechtensteinis 3 m, Rootsis 10 m, Saksamaal 5 m, Soomes 10 m, Šveitsis 3 – 4 m, Tšehhis 5 m; Tšehhis seadusega kohustatult, Šveitsis sõltub kantonist, mujal soovituslik) ja kaugus teisest kinnise süsteemi soojuspuuraugust (Liechtensteinis 6 m, Rootsis 20 m, Saksamaal 10 m, Soomes 20 m, Šveitsis 5 – 8 m; Šveitsis sõltub kantonist, mujal soovituslik). Soomes on määratletud ka kaugus hoonetest (3 m).

Avatud süsteemide puhul on piiranguid üksikutes riikides (Tšehhis 5 m kinnistu piirist, Kreekas 5 m hoonetest, Rootsis 10 m kinnistu piirist, 20 m järgmisest soojuspuurkaevust).

Minimaalne kaugus veehaarde puurkaevudest on määratletud ainult Rootsis (soovituslikult 30 m nii avatud kui kinniste süsteemide puhul), Soomes (soovituslikult 40 m kinniste puhul) ja Taanis (kohustuslikult 300 m kinniste puhul). Andmed Taani kohta on üllatavad, kuna suurema reostuse levitamise potentsiaaliga avatud süsteemide kaugust veehaarde puurkaevudest ei ole piiratud.

Põhjavee temperatuuri alandamist ei peeta üldiselt riskiks, küll aga seatakse piiranguid temperatuuri tõstmisele, kuna sellega võib kaasneda bakteriaalse elutegevuse intensiivistumine, või lubatud temperatuuri erinevustele looduslikust. Kinnise süsteemi soojuskontuuri külmakande vedeliku maksimaalne temperatuur ei tohi ületada 35 °C Austrias ja 25 °C Taanis. Austrias peab külmakande vedeliku temperatuur olema kuni ±15 K looduslikust, Saksamaal kuni ±11 K nädala keskmise koormuse ja kuni ±17 K tippkoormuse korral.

Avatud süsteemides ei tohi tagasijuhitava põhjavee temperatuur ületada 20 °C Austrias ja Saksamaal või 25 °C Hollandis, Suurbritannias ja Taanis. Tagasijuhitava vee temperatuur peab olema vähemalt 2 °C Taanis või 5 °C Austrias, Hollandis ja Saksamaal. Lubatud suurim temperatuuri muutus on -3/+1,5 K Liechtensteinis, ±3 K Šveitsis, ±6 K Austrias ja Saksamaal, ±10 K Suurbritannias ja ±11 K Prantsusmaal.

Rahvusvahelise praktika rakendamine Eestis väärrib kaalumist. Ülalmainitud piirangud on kehtestatud vähestes riikides. Seda tuleks siiski vaadelda kui soojussüsteemidega seoses kehtestatud täiendavaid piiranguid, mis rakenduvad lisaks muudele, näiteks veehaarde puurkaevudega seotud piirangutele. Kui puurkaevude rajamisega seonduvad piirangud on piisavalt ranged, siis puudub vajadus täiendavate piirangute järele.

Soojussüsteemide hooldusalade ulatuse määratlemisel tuleks lähtuda olemasolevate veehaarete kaitsest, rajatava soojuspuurangu/-kaevu kaitsest ja piisava soojusressursi olemasolust.

Avatud süsteemi puurkaev on potentsiaalne pinnareostuse põhjaveekihti kandumise otsetee ohustades sellega avatava veekihi kvaliteeti. Seetõttu võiks avatud süsteemi soojuspuurkaevude rajamine olla lubatud ainult maapinnalt esimesse aluspõhjalisse veekihti.

Soojuspuurkaevu vesi tuleb tagasi juhtida samasse veekihti, et vältida veekihtide segunemist ja veehulga vähenemist. Ühtlasi ei teki ulatuslikku alandusletrit ja seetõttu võiks avatud süsteemi soojuspuurkaevu hooldusala olla 10 m. Soojuspuurkaevude hooldusalad võivad kattuda veehaarde puurkaevu hooldusalaga või sanitaarkaitsealaga moodustades ühise kitsendusvööndi.

Kinnise süsteemi soojuspuurkaev, mis täidetakse veekihte isoleeriva materjaliga ei vaja hooldusala. Põhjavee reostamise oht tekib ainult siis, kui on eiratud paigaldusnorme. Kui otseaurustiga soojussüsteemi puurauk rajatakse sarnaselt kinnise süsteemi puurangule (pärast torustiku paigaldamist täidetakse veekihte isoleeriva materjaliga), siis tuleks seda käsitleda sarnaselt kinniste süsteemidega (hooldusala ei ole vaja kehtestada).

Olemasolevate veehaarete kaitseks on puurkaevule määratud hooldusala või sanitaarkaitseala, kus ehitustegevus sealhulgas vertikaalsete soojussüsteemide rajamine ei ole lubatud. 10 m hooldusalaga puurkaevud on enamasti erakaevud, milledele seadusega täiendavate piiranguvööndite kehtestamine piirab ennekõike kaevuomaniku võimalust rajada kinnise süsteemi soojuspuurauke. Sanitaarkaitseala ulatus määratakse puurkaevu kasutusele võtmisel (on hiljem muudetav) ning määramisel võetakse arvesse kavandatavat tarbimist ja veekihi kaitstust. Tavaliselt on sanitaarkaitseala ulatus 30 m või rohkem puurkaevudel, mille projektikohane tootlikkus on >10 m³/d. Selline kaugus on kooskõlas Soome ja Rootsi soovustega kinnise süsteemi soojuspuuraukude ja veehaarde kaevude vahelise kaugusena.

Kinnise süsteemi soojuspuurangu kaugus veehaardest ööpäevase tootlikkusega üle 500 m³ võiks olla vähemalt 200 m.

Kinnise süsteemi soojuspuurauk peaks olema vähemalt 30 m kaugusel suure tootlikkusega veehaarde puurkaevust, millega avatud sügavamalt veekihti katab vähemalt 30 m paksune veepide, mille vertikaalne filtratsioonikoefitsient on väiksem kui 10⁻⁴ m/d.

Avatud süsteemi soojuspuurkaevude kaugus teistest puurkaevudest peab samuti lähtuma olemasolevale puurkaevule kehtestatud hooldusala või sanitaarkaitseala ulatusest. Sarnaselt kinnistele süsteemidele on seadusega täiendavate piirangute kehtestamine ennekõike puurkaevu omaniku võimaluste piiramine, mille tulemusena ei saa rajada tarbevee puurkaevule lisaks teist puurkaevu jahutatud põhjavee tagasijuhtimiseks. Kui kõrvale jätta detailplaneeringuga kehtestatud ühisveevärgi alad, siis mujal ei peaks piirama avatud süsteemi soojuskaevudest tarbevee võtmist, sest vett kasutav omanik on parim vee kvaliteedi valvaja.

Soojuspuuraukude jätkusuutlikuks kasutamiseks peab neile jätkuma energiat ilma, et ohustataks naaberkinnistu ressursi. Kinnise soojussüsteemi puurauk peaks asuma vähemalt 5 m kinnistu piirist. Tavatingimustes (ainult soojust võttes) on soovitatav, et soojuspuuraukude vahemaa oleks vähemalt 10 m. On pigem erandlik, et ruumi puudusel tuleks naabrite soojuspuuraukud paigutada vastakuti üle kinnistu piiri selliselt, et piirist 5 m kaugusel olevate puuraukude vahemaa on 10 m. Hiljem rajatavat puurauku piki kinnistute piiri nihutades on võimalik saavutada vahemaa, kus vastastikmõju on tühine.

Ühe kinnistu piires rajatavate puuraukude omavaheline kaugus peaks samuti olema vähemalt 5 m. Sellega tagatakse, et puuraukude rajamisel ei ohustata juba teostatud soojuspuurauke. 5 m puuraukude vahekaugusena ei ole piisav ainult soojuse võtmisel, kuid kuna soojuspuuraukud leiavad üha enam kasutamist hoonete suvisel jahutamisel (soojuse akumuleerimiseks maapõues) või tagastatakse talvel ära võetud soojuse hulk muul moel (näiteks päikesepatareid), siis ei ole põhjust seaduse tasemel piiranguid seada. Soovituslikult võiks ainult kütteks tarvitavate soojuspuuraukude omavaheline kaugus olla vähemalt 10 m.

Soojuspuurkaevude ja -aukude eluiga ja likvideerimine

Maasoojussüsteeme loetakse pikaalisteks ja vähe hooldust vajavateks, kuna neis on vähe liikuvaid osi ja needki on varjualustes tingimustes. Rootsisis hinnatakse puuraukude tehnilise seisundi garanteeritud elueaks vähemalt 30 – 50 aastat ja soojuspumpade elueaks 15 – 20 aastat. See leiab kinnitust ka Rootsi praktikas, kus soojuspuuraukudel põhinevate süsteemide ehitamine algas juba 1970ndatel ning nüüdseks mitukümmend aastat toiminud küttesüsteemide renoveerimisel vahetatakse välja soojuspumpasid uuema põlvkonna tõhusamate mudelite vastu, kuid puuraukudes olevaid kontuure ei vahetata. Kuna Eestis kasutatakse puurkaevude rajamisel samu sertifitseeritud materjale mis Rootsis ja mujal Euroopas, siis ei ole põhjust eeldada, et Eesti puurkaevude eluiga oleks lühem.

Ka majanduslikud tegurid räägivad soojussüsteemide pikaajalise kasutamise poolt. Puuraukude ja -kaevude rajamise kulu on suhteliselt suur, aga hilisem kasutamine on vähemalt 3 korda odavam kui näiteks elektri-, gaasi- või õliküte. Seega puudub omanikel otsene huvi puurauke likvideerida. Sarnaselt tarbevee puurkaevudega tuleks seaduses ette näha võimalus soojuspuuraukude ja -kaevude konserveerimiseks.

Soojussüsteemi amortiseerumisel tuleb see likvideerida. Avatud soojussüsteemi puurkaevud on olemuselt tavalised puurkaevud ning mingeid erisusi veehaarde puurkaevudega võrreldes ei ole ja nende likvideerimine käib vastavalt kehtivatele korrale. Ka soojuspuurkaevude konserveerimine toimub sarnaselt veehaarde puurkaevude konserveerimisega.

Kehtiva korra kohaselt (keskkonnaministri määrus nr. 37, RT I 2010, 54, 352) tuleb kinnise soojussüsteemi puuraugud soojuskontuuri paigaldamise järel kogu ulatuses täita, soojuspuuraugu amortiseerumisel või otstarbe kaotamisel tuleb soojuskontuurist (U-torustikust) vedelik välja pumbata. Konserveerimisel tuleks eelnevalt tühjendatud kontuuri otsad sulgeda, likvideerimisel tuleks kontuur täita materjaliga, mis ei lase vedelikel torustiku pidi voolata.

Ettepanekud

Kinnise süsteemi soojuspuurangu rajamist puudutavad soovitused:

- Kinnise süsteemi soojuskontuuride liited, mis jäävad puurauku või pinnasesse, tuleks teostada keevsüstitena (eelistada spetsiaalseid torusid, millel alumise otsa tagasipööre on paigaldatud tehases).
- Soojuskontuuridele tuleks paigaldamise järel teha survetest (rõhu suuruse ja testi kestuse määramisel lähtuda Eesti Soojuspumba Liidu soovitustest).
- Soojuskontuurides tohib kasutada ohutuid külmakande vedelike (etanooli vesilahus, propüleenglükooli vesilahus, vmt.). Mitte lubada etüleenglükooli kasutamist soojuspuuraukude kontuurides.
- Kinnise süsteemi puurauk, mis on soojuskontuuri paigaldamise järel täidetud veekihte isoleeriva materjaliga, ei vaja hooldusala. Vähimat kaugust ehitistest ei pea piirama ning võib lubada nende rajamist hoonete alla kandekonstruktsiooni osana (soojusvai).
- Soojuspuurangu kaugus kinnistu piirist peaks olema vähemalt 5 m.
- Kaugus veehaarde puurkaevust on määratud puurkaevu hooldusala või sanitaarkaitsealaga. Täiendavaid piiranguid ei ole vaja kehtestada.
- Kinnise süsteemi soojuspuurauk peaks olema vähemalt 30 m kaugusel suure tootlikkusega veehaarde puurkaevust, millega avatud sügavamalt veekihti katab vähemalt 30 m paksune veepide, mille vertikaalne filtratsioonikoefitsient on väiksem kui 10^{-4} m/d.
- Veehaardest ööpäevase tootlikkusega üle 500 m^3 võiks olla vähim kaugus samasse veekihti ulatava kinnise süsteemi soojuspuurangu 200 m.
- Soojuspuurangu konserveerimisel tuleb eelnevalt tühjendatud soojuskontuuri otsad sulgeda.
- Kui soojuskontuur on amortiseerunud, siis tuleb ta likvideerida täites kontuuri materjaliga, mis ei lase vedelikel torustiku pidi voolata.
- Konserveeritud soojuskontuuri uuesti kasutusele võtmisel tuleb läbi viia survetest.
- Suurte $>50 \text{ kW}$ väljundvõimsusega puuraukude/puurkaevudel põhinevate soojussüsteemide kavandamisel tuleks koostada soojusvälja mudel.
- Rajamisel tuleks pidada tööde päevikut ja koostama katsete (rõhu) protokollid.

Avatud süsteemi soojuspuurkaevu rajamist puudutavad soovitused:

- Avatud süsteemide rajamist võib lubada mitte sügavamale kui maapinnalt esimesse aluspõhjalisse veekihti.
- Avatud süsteemiga võetud põhjavesi tuleb tagasi juhtida samasse veekihti, et vältida põhjavee hulga vähenemist ja veekihtide segunemist.
- Ülevoolu vältimiseks tuleb tagasivoolukaev veekindlalt sulgeda. Õhutamise vähendamiseks peab tagasivoolutoru ots ulatuma allapoole staatilist veetaset.
- Alal, kus põhjaveekihi varud on kinnitatud, ei tohiks üldjuhul lubada avatud süsteemi soojuspuurkaevude rajamist samasse veekihti, kuid erandeid võiks teha veekihi väljavoolualal.

- Kui alal ei ole detailplaneeringuga kehtestatud ühisveevärgi kohustus, siis ei tohiks piirata avatud süsteemi soojuspuurkaevude kasutamist olmevee võtmiseks, kuna see parandab veekvaliteedi järelvalvet.
- Soojuspuurkaevu hooldusala ulatus 10 m (võib kattuda teiste puurkaevude hooldusaladega).
- Avatud süsteemi väljaehitamisel tuleks luua veeproovi võtmise võimalus.
- Suurte >50 kW väljundvõimsusega puuraukude/puurkaevudel põhinevate soojussüsteemide kavandamisel tuleks koostada soojusvälja mudel.

Otseaurustiga süsteemi soojuspuuraugu rajamist puudutavad soovitused:

- Kuna alternatiivid on olemas, siis otseaurustiga soojussüsteemide rajamine Eestis ei ole soovitatav kuniks need süsteemid levivad laiemalt ja omandatakse rahvusvaheliselt kogemusi.
- Kui otseaurusti pannakse puurauku, siis tuleb käituda analoogiliselt kinniste süsteemidega.

Muud soovitused

- Eesti Looduse Infosüsteemi puuaukude andmebaas vajab täiendamist soojussüsteemidele spetsiifiliste parameetritega. VEKAs tuleks eristada soojuspuurkaev (avatud süsteem) ja soojuspuurauk (kinnine süsteem). Soojuspuuraukude kirjeldamiseks tuleks lisada lahtrid „soojuskontuuri pikkus“, „soojuskontuuri läbimõõt“, „soojuskontuuri tüüp“ (U, topelt-U, kontsentiline, muu). Väärib kaalumist, kas lisada nii soojussüsteemide kui ka veehaarde puurkaevude osas info kasutatud materjalide tüüpide kohta.
- Eestis valitseb ametnike usaldamatus puurijate töö nõuetekohase teostamise suhtes (nii soojus- kui ka olmevee puurkaevude teostamisel). Autorid ei soovi võtta seisukohta, kas usaldamatus on põhjendatud või mitte, kuid üks võimalus usalduse tekkeks on tehtava töö pildistamine ja fotode esitamine puurkaevu andmete keskkonnaregistrisse esitamisel. Fotodelt peaks olema üheselt tuvastatav tööde tegemise asukoht ja piltidel peaks olema jäädvustatud vähemalt puurimise protsess, manteltorude taguse isolatsiooni teostamine, soojuspuuraukude puhul kontuuri paigaldamine ja täitmine. Pildistamise kohustus toimib mõningates Saksamaa Liidumaades.

Kokkuvõte

Aruandes antakse ülevaade puuraukudel ja –kaevudel põhinevate maasoojussüsteemide levikust Eestis ning vaadeldakse nende süsteemide mõjusid kivimitele ja põhjaveele.

Jahutamisel ja soojendamisel puudub oluline mõju vee kihi filtratsiooniomadustele ning põhjavee keemilisele koostisele. Külmutamine ulatub kinnise süsteemi soojuspuuraugust maksimaalselt mõne detsimeetri kaugusele ja omab tähtsust puuraugu täitematerjali valikul, eriti tema külmakindluse osas. Avatud soojussüsteemi puurkaevudest võetud kuus proovi ei kinnitanud hüpoteesi, et õhutamisega võib kaasnedagi ulatuslikult kivimites esineva püriidi oksüdeerimist ja põhjavee sulfaatseks muutumist. Samuti ei tuvastatud pinnareostuse valgumist puurkaevude kaudu põhjavette.

Töös on toodud kinniste ja avatud süsteemide soojuslike mõjude ulatuse modelleerimise tulemused ning neid on võrreldud vaatlusandmetega. Kinniste süsteemide puuraukudes toimuvad päevade ja nädalate ajaskaalas mitmekraadised temperatuuri variatsioonid tulenevalt küttekoormuse muutustest. Variatsioone põhjustab asjaolu, et soojuskanne soojusjuhtivuse ei ole väga efektiivne ning energia ei jõua selle aja jooksul soojuskontuurini kaugemalt kui 1 meeter. Esimese kahe aastaga saavutatakse suurim muutus soojusväljas. Kinnise ja otseaurustiga soojussüsteemi mõju jääb valdavalt 5 m raadiusesse soojuspuuraugust. Ainult soojuse võtmisel on üksik sügav soojuspuurauk efektiivsem kui ravis olevad puuraugud, mis omakorda on tõhusam konfiguratsioon kui ruudustikuna asetsevad puuraugud. Samas ruudustik on efektiivsem maakasutusvorm ja hea alternatiiv kui suvel tagastatakse soojust täiendavalt. Avatud süsteemid on tõhusad, kuna voolav vesi kannab efektiivselt soojust kaasas ning pumbatava kaevu poole voolab vett ka nendest suundadest, mis ei ole jahutamise poolt mõjutatud.

Töös tehakse mitmesuguseid ettepanekuid seoses soojussüsteemide rajamisega. Need puudutavad puuraukude ja –kaevude teostusviise, viimistlemise võimalusi ning konserveerimise ja likvideerimise variante. Kinnistes süsteemides kasutatavatest vedelikest on ohutud etanool ja propüleenglükool, kuid etüleenglükooli kasutamine soojuskontuurides tuleks keelustada.

Soojussüsteemide kaugus olemasolevatest puurkaevudest juba reguleeritud puurkaevude sanitaarkaitsevööndite ja hooldusalade ulatusega. Avatud süsteemi soojuspuurkaeve tuleks käsitleda sarnaselt veevõtu puurkaevudele. Kinnise süsteemi soojuspuuraugud ei vaja hooldusala. Hooned ei ole ohuks soojussüsteemidele ja kaugust nendest ei peaks piiritlema. Ressursi jätkuvuse seisukohast peaks soojuspuuraugud olema vähemalt 5 m kinnistu piirist.

Summary

A present report gives an overview of drillings based ground source heat pump systems in Estonia and discusses their influence to rocks and groundwater.

Cooling and heating have little influence on hydraulic properties of aquifers and groundwater composition. Freezing is important within decimetres from the borehole heat exchanger and therefore filling material needs to be frost resistant. Water samples taken from wells of open loop systems did not affirm the hypothesis that circulating water causes oxidation of pyrite and thus increases sulphate content in groundwater. In addition, samples did not indicate intrusion of fresh pollution by surface waters.

Report presents thermal modelling results of open and closed loop systems and compares results to the monitoring data. Temperature variations of several degrees may occur in closed loop borehole heat exchangers due to inefficiency of conductive heat transfer, which limits the effective radius of available heat to less than 1 meter. The largest changes in temperatures occur during the first two years. Closed loop and direct evaporation systems affect mainly rocks within 5 m radius. In case only heat is extracted, single borehole heat exchangers are more efficient than boreholes in row that in turn are more efficient than boreholes in grid. However, grids can be a good choice if additional measures (such as storing waste heat in summer) are taken for recovery. Open loop systems are maintain relatively high temperatures throughout heating season because water flows toward pumping well also from directions that are not influenced by recharged cooler water.

Report contains several proposals on how to build and finish geothermal boreholes. Ethanol and propylene glycol solutions are safe to use in closed loops, but the usage of ethylene glycol should be prohibited.

The distance from existing groundwater wells is already regulated by their protection zones. Wells of open loop system should be treated as regular groundwater wells and they need protection zone whereas closed loop borehole heat exchanger do not need. Buildings should not be treated as threat to borehole heat exchangers. The distance from next property line should be at least 5 m.

Tänusõnad

Töö autorid on tänulikud prof. Kalle Kirsimäele ja PhD Andres Marandile, kes aitasid kaasa põhjavee keemilises koostises toimuvate muutuste selgitamisel.

Kasutatud kirjandus

- Clauser, C. (ed), 2003. Numerical Simulation of Reactive Flow in hot Aquifers using SHEMAT/Processing Schemat. Springer Verlag, Heidelberg-Berlin.
- Freimanis, A., Eihmanis, E., Morozova, M, Drikis, V., Prols, J., Zazimko, A. and Sokurenko, L., 2002. Latvia. In: Hurter, S.; Haenel, R. (Eds.). Atlas of geothermal resources in Europe. Luxembourg: Commission of the European Communities.
- Gaškov, M., 2011. Temperatuurivälja muutused soojuspuuraukude kasutamisel. Magistritöö, Tartu Ülikool, Geoloogia Osakond, 28 lk.
- Loigu, E. ja Kõiv, T.-A., 2006. Eesti kraadpäevad, TTÜ Keskkonnatehnika Instituut, 69 lk.
- Haehlein, S., Bayer, P. and Blum, P., 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2611–2625.
- Jõelegt, A., 2002. Estonia. In: Hurter, S.; Haenel, R. (Eds.). Atlas of geothermal resources in Europe. Luxembourg: Commission of the European Communities.
- Jõelegt, A., 2007. Soojuspuuraukude mõju keskkonnale. Aruanne, Tartu Ülikool, 39 lk.
- Katinas, V. and Markevicius, A., 2006. Promotional policy and perspectives of usage renewable energy in Lithuania. *Energy Policy*, 34, 771–780.
- Radeckas, B., Vačeliūnas, J., Krasnevič, B. and Rastenienė, V., 2002. Lithuania. In: Hurter, S.; Haenel, R. (Eds.). Atlas of geothermal resources in Europe. Luxembourg: Commission of the European Communities.
- Osterkamp, T.E., and Burn, C.R., 2002, Permafrost, in Holton, J.R., Pyle, J., and Curry, J.A., eds., *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*: New York, Academic Press, p. 1717–1729.
- Wagner, W., Cooper, J. R., Dittmann, A., Kijima, J., Kretzschmar, H.-J., Kruse, A., Mareš, R., Oguchi, K., Sato, H., Stöcker, I., Šifner, O., Takaishi, Y., Tanishita, I., Trübenbach, J., and Willkommen, Th., 2000. The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, *J. Eng. Gas Turbines & Power*, 122, 150–182.

LISA 1. Lähteülesanne

Soojussüsteemi puurkaevu ja -augu mõju põhjavee ja pinnase füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes

LÄHTEÜLESANNE

1. Taust

2007. aastal koostas Tartu Ülikooli geoloogia osakond Keskkonnaministeeriumi tellimuse alusel töö „Soojuspuuraukude mõju keskkonnale“. Töös on antud üldine soojussüsteemi tööpõhimõtte kirjeldus ja toodud näiteid Euroopa õigusest, millega reguleeritakse soojussüsteemide rajamist ja kasutamist. Samuti on töös käsitletud soojuse puuraukudest ammutamist suletud või avatud süsteemiga Eestis ning antud soovitusi Eesti seadusandluse muutmiseks.

16. juuni 2010. a jõustunud veeseaduse ja kemikaaliseaduse muutmise seadusega kehtestati muu hulgas Eestis esmakordselt ka soojussüsteemi puurkaevude ja -aukude rajamise kord. Kuid soojussüsteemi puurkaevude ja -aukude alase õiguse terviklikkuse tagamiseks tuleb veel välja töötada näiteks soojussüsteemi rajatise ümbritsevate hooldusalade ulatuste süsteem ja kehtestada vastav õigusraamistik.

Tervikliku soojussüsteemi puurkaevude ja -aukude rajamise ja kasutamise regulatsiooni loomiseks tuleb välja selgitada, millist mõju avaldavad Eesti geoloogilistes tingimustes soojussüsteemi puurkaevud ja -augud pinnase füüsikalistele omadustele ja põhjavee kvaliteedile ning kvantiteedile. Samuti ootavad vastuseid mitmed soojussüsteemide alased küsimused, milliste osas puudub täna hüdroteoloogide seas ühtne arusaam.

2. Eesmärk

Töö eesmärk on kirjeldada erinevaid Eestis kasutatavaid soojussüsteemi soojuspuurkaeve ja -auke ning anda hinnang nende soojussüsteemide mõjust pinnase füüsikalistele omadustele, põhjavee keemilisele koostisele ja kogusele Eesti geoloogilistes tingimustes ning teha ettepanekud soojussüsteemi puurkaevude ja -aukude edasise kasutamise kohta Eestis.

3. Tegevused lähteülesande lahendamiseks

Töö lahendamiseks peab Töövõtja:

- 3.1. Lugema läbi kõik töö teostamiseks vajalikud ja muud asjakohased materjalid.
- 3.2. Kirjeldama Eestis pakutavate soojussüsteemi puurkaevude ja -aukude ehitust ning tutvustama nende tööpõhimõtteid. Eraldi tuleb välja tuua kinnise soojussüsteemi puuraukud (kontuur vertikaalselt), avatud soojussüsteemi puurkaevud ning otseaurustiga soojussüsteemi puuraukud.
- 3.3. Andma ülevaate erinevate soojussüsteemide levikust Eestis. Andma hinnangu, milline on arvatav energia kokkuhoid soojussüsteemi puurkaevude ja -aukude kasutamisel Eestis.

- 3.4. Andma ülevaate kinnise soojussüsteemi vertikaalsete puuraukude kontuurides kasutatavatest vedelikest, nende keemilisest koostisest (võrrelda kehtivate kasutatavate vedelike koostist keskkonnaministri kehtestatud piirväärtustega ohtlikele ainetele), keskkonnaohtlikkusest ja kogusest.
- 3.5. Kirjeldama, millised muutused võivad toimuda põhjavee keemilises koostises avatud soojussüsteemi puurkaevu puhul ning võtma kontrollivaid veeproove.
- 3.6 Kirjeldama erinevate soojussüsteemide võimalikke ohte pinnasele ja põhjaveele ning tutvustama ohtude maandamise võimalusi (suudmete viimistlemise võimalused, manteldamine, puuraukude seest täitmine, veevõtu keelamine samast kaevust).
- 3.7. Kirjeldama, millised keemilised ja füüsikalised protsessid toimuvad erinevate soojussüsteemide puurkaevude ja -aukude mõjuraadiuses tulenevalt jahutamisest, külmutamisest või soojendamisest ja kuidas see mõjutab põhjavett ja kivimite filtratsiooniomadusi.
- 3.8. Kirjeldama vaatlusandmete alusel erinevate soojussüsteemide puurkaevude ja -aukude lühi- ja pikaajalist termilist mõju, mõjuraadiuse ulatust erineva geoloogilise ehituse korral ja millest mõjuraadiuse ulatus sõltub.
- 3.9. Selgitama, milliseid ohte võib põhjustada erinevate soojussüsteemide puurkaevude ja -aukude rajamine kinnitatud põhjaveearuga põhjaveekihti.
- 3.10. Andma hinnangu, kui kaugemale veehaardest tohib rajada erinevate soojussüsteemide puurkaevu või -augu üksik- ja ühisveevärgi korral. Andma hinnangu, kas kinnise soojussüsteemi puurauke tohib rajada ehitise alla.
- 3.11. Kirjeldama võimalikke ohte erinevate soojussüsteemi puurkaevude ja -aukude rajamisel ehitiste alla.
- 3.12. Andma hinnangu erinevate soojussüsteemide puurkaevude ja -aukude elueale ning tegema ettepanekud soojussüsteemi puurkaevude ja -aukude likvideerimiseks ja tooma välja likvideerimise erisused võrreldes veehaarde puurkaevu likvideerimisega.
- 3.13. Tegema ettepaneku, milliseid põhjaveekihte tohib avatud soojussüsteemi puurkaevuga avada ning selgitama, kas survele põhjavee korral on võimalik soojusvaheti läbinud põhjavett tagasi põhjaveekihti juhtida.
- 3.14. Andma hinnangu, millised on otseaurustiga soojussüsteemi puuraugu keskkonnariskid ning põhjendama enda arvamust.
- 3.15. Tegema ettepanekud soojussüsteemide puurkaevude ja -aukude hooldusala ulatuse kohta lähtuvalt soojussüsteemist põhjustatavast keskkonnariskist pinnasele ja põhjaveele ning soojussüsteemi rajatiste kaitse eesmärgist ning kirjeldama hooldusala määratlemise meetodikat.

4. Töö teostamiseks vajalikud materjalid

- 4.1. Veeseadus.
- 4.2. Keskkonnaministri 29. juuli 2010. aasta määrus nr 37 „Nõuded puurkaevu ja puuraugu projekti ja konstruktsiooni ning likvideerimise ja rekonstrueerimise projekti kohta, puurkaevu ja puuraugu projekteerimise, rajamise, kasutusele võtmise, likvideerimise ja konserveerimise kord ning puurkaevu või puuraugu asukoha kooskõlastamise, rajamise ja kasutusele võtmise taotluste, puurimispäeviku, puurkaevu ja puuraugu andmete keskkonnaregistrisse kandmiseks esitamise ning puurkaevu ja puuraugu likvideerimise akti vormid“.
- 4.3. Keskkonnaministri 16. detsembri 1996. a määrus nr 61 „Veehaarde sanitaarkaitseala moodustamise ja projekteerimise korra kehtestamine“.
- 4.4. Keskkonnaministri 27. juuli 2010. a määrus nr 32 „Veekeskkonnale ohtlike ainete ja ainerühmade nimistud 1 ja 2 ning prioriteetsete ainete, prioriteetsete ohtlike ainete ja nende ainete rühmade nimekirjad“.

4.5. Keskkonnaministri 11. augusti 2010. a määrus nr 39 „Ohtlike ainete põhjavee kvaliteedi piirväärtused“.

4.6. Ehitusseadus.

5. Töö tulemused

Töövõtja poolt esitatavad tulemused Tööandjale:

5.1. Vahearuanne, kus on esitatud vahearuannde esitamise tähtajaks tehtud tööd, isiku nägemus tegevuste kohta töö lähteülesande lahendamiseks ja töö sisukord, mis vastab punktile 3.

5.2. Lõpparuanne, kus on toodud kõik punktis 3. nimetatud tegevused ja kus kirjeldatud erinevaid Eestis kasutatavaid soojussüsteemi soojuspuurkaeve ja -auke, antud hinnang nende soojussüsteemide mõjust pinnase füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele ja kogusele Eesti geoloogilistes tingimustes ning tehtud ettepanekud soojussüsteemi puurkaevude ja -aukude edasise kasutamise kohta Eestis.

Töö tuleb esitada kolmes eksemplaris paber kandjal ja CD-l eesti keeles. Töö sissejuhatus ja kokkuvõtte peavad olema nii eesti kui inglise keeles. Esitatud töö peab olema MS Office formaadis (.doc, .xls).

6. Tööde tähtajad

Töö vahearuannde esitamise tähtaeg on 15. november 2011. a.

Töö lõpparuande esitamise tähtaeg on 1. veebruar 2012. a.

7. Tööde periood

Tööde teostamise aeg 1. oktoober 2011. a kuni 1. veebruar 2012. a.

8. Hinnapakkumise kehtivus

Hinnapakkumine peab olema jõus kuni 1. veebruar 2012. a.

9. Hinnapakkumise sisu ja esitamine

Hinnapakkumine peab sisaldama:

9.1. Pakkuja rekvisiite.

9.2. Töö teostaja nime ja CV-d.

9.3. Tõendit töö teostaja geoloogia ja hüdrogeoloogia alase töökogemuse kohta.

9.4. Töö teostaja asjakohaste teadusartiklite loetelu.

9.5. Töö teostajate asjakohaste tehtud tööde loetelu.

9.6. Töö teostamise ajakava lahti kirjutatuna lähteülesande jaoks vajalike tegevuste kaupa.

9.7. Pakkumise kehtivust.

9.8. Töö hinda lähtuvalt lähteülesandest. Töö hind peab olema eurodes ilma käibemaksuta ning koos käibemaksuga lahti kirjutatuna lähteülesande jaoks vajalike tegevuste kaupa.

9.9. Pakkumine esitatakse elektroonilisel teel digiallkirjastatuna.

LISA 2. Avatud soojussüsteemidest võetud veeproovide analüüsiaktid

OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskus | Tartu filiaal
Registrikood 10057662 | KMKR EE100067066
Vaksali 17A, 50410 Tartu
tel 7307279 | faks 7307279 | tartu@klab.ee | www.klab.ee
a/a 10102031621003 SEB , kood 401



ANALÜÜSIAKT TA11003397 - Põhjavesi

Tellijaja: TÜ Geoloogia osakond
Ravila 14 A, Tartu

Proovivõtjad: Polikarpus, Maile; Jõelett, Argo

Proovivõtuaeg: 07.12.2011

Laborisse tulek: 08.12.2011 10:15

Analüüsi lõpp: 16.12.2011 12:02

Proovivõtuukoht: Haapsalu, Läänemaa Sambla poe puurkaev

Proovi nr.: P-823

| Näitaja | Katsemetod | Tulemus | Ühik |
|---|--------------------|---------|-------|
| pH | ISO 10523 | 7,6 | |
| Lõhnaläve indeks | EVS-EN 1622* | lõhnata | TON |
| Värvus | EVS-EN ISO 7887* | 25 | ° |
| Hägusus | EVS EN ISO 7027 | 11 | NHÜ |
| Biokeemiline hapnikutarve (BHT ₅) | EVS-EN 1899-2 | < 1 | mg/l |
| Keemiline hapnikutarve (KHT _{Mn}) | SFS 3036 | 2,0 | mg/l |
| Fluoriid (F ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 0,69 | mg/l |
| Elektrijuhtivus | EVS-EN 27888 | 1060 | µS/cm |
| Ammoonium (NH ₄ ⁺) | EVS-EN ISO 11732 | 0,10 | mg/l |
| Nitraat (NO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | < 0,2 | mg/l |
| Nitrit (NO ₂ ⁻) | EVS-EN ISO 13395 | < 0,01 | mg/l |
| Sulfaat (SO ₄ ²⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 111 | mg/l |
| Kloriid (Cl ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 43 | mg/l |
| Hüdrokarbonaat (HCO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 9963-1 | 520 | mg/l |
| Kaalium (K) | Mv_20* | 11 | mg/l |
| Kaltsium (Ca) | EVS-EN ISO 11885 | 74 | mg/l |
| Magneesium (Mg) | EVS-EN ISO 11885 | 53 | mg/l |
| Mangaan (Mn) | EVS-EN ISO 11885 | < 0,02 | mg/l |
| Naatrium (Na) | Mv_20* | 61 | mg/l |
| Raud (Fe) | EVS-EN ISO 11885 | 9,6 | mg/l |
| Üldorgaaniline süsinik (TOC) | EVS-EN 1484 | 3,3 | mg/l |

* akrediteerimata meetod

Kommentaar:

Kinnitas: kvaliteedispetsialist Mae Uri / *maeuri* 16.12.2011

Analüüsi tulemused on kehtivad ainult akti toodud proovi kohta.
Dokumendi osaline paljundamine ilma Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ loata keelatud.
Referentlabor reoveesete analüüsimiseks (EV keskkonnaministri käskkirj nr 941).

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg.nr.L008

OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskus | Tartu filiaal
Registrikood 10057662 | KMKR EE100067066
Vaksali 17A, 50410 Tartu
tel 7307279 | faks 7307279 | tartu@klab.ee | www.klab.ee
a/a 10102031621003 SEB , kood 401



ANALÜÜSIAKT TA11003398 - Põhjavesi

Tellijaja: TÜ Geoloogia osakond
Ravila 14 A, Tartu

Proovivõtjad: Polikarpus, Maile; Jõeleht, Argo

Proovivõtuaeg: 07.12.2011

Laborisse tulek: 08.12.2011 10:15

Analüüsi lõpp: 16.12.2011 12:25

Proovivõtukoht: Haapsalu, Läänemaa Pääsukese 5 puurkaev

Proovi nr.: 2006

| Näitaja | Katsemeetod | Tulemus | Ühik |
|---|--------------------|---------|-------|
| pH | ISO 10523 | 7,5 | |
| Lõhnaläve indeks | EVS-EN 1622* | 1,3 | TON |
| Värvus | EVS-EN ISO 7887* | 80 | ° |
| Hägusus | EVS EN ISO 7027 | 32 | NHÜ |
| Biokeemiline hapnikutarve (BHT ₅) | EVS-EN 1899-2 | 1,0 | mg/l |
| Keemiline hapnikutarve (KHT _{Mn}) | SFS 3036 | 9,6 | mg/l |
| Fluoriid (F ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 0,52 | mg/l |
| Elektrijuhtivus | EVS-EN 27888 | 1120 | µS/cm |
| Ammoonium (NH ₄ ⁺) | EVS-EN ISO 11732 | 0,49 | mg/l |
| Nitraat (NO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | < 0,2 | mg/l |
| Nitrit (NO ₂ ⁻) | EVS-EN ISO 13395 | < 0,01 | mg/l |
| Sulfaat (SO ₄ ²⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 114 | mg/l |
| Kloriid (Cl ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 106 | mg/l |
| Hüdrokarbonaat (HCO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 9963-1 | 355 | mg/l |
| Kaalium (K) | Mv_20* | 8,8 | mg/l |
| Kaltsium (Ca) | EVS-EN ISO 11885 | 120 | mg/l |
| Magneesium (Mg) | EVS-EN ISO 11885 | 20 | mg/l |
| Mangaan (Mn) | EVS-EN ISO 11885 | 0,068 | mg/l |
| Naatrium (Na) | Mv_20* | 71 | mg/l |
| Raud (Fe) | EVS-EN ISO 11885 | 17 | mg/l |
| Üldorgaaniline süsinik (TOC) | EVS-EN 1484 | 6,4 | mg/l |

* akrediteerimata meetod

Kommentaari:

Kinnitas:

kvaliteedispetsialist Mae Uri /

16.12.2011

Analüüsi tulemused on kehtivad ainult aktiil toodud proovi kohta.
Dokumendi osaline paljundamine ilma Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ loata keelatud
Referentlabor reoveesette analüüsimiseks (EV keskkonnaministri käskkirj nr.941).

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg.nr.L008

Soojussüsteemi puurkaevu ja -augu mõju põhjavee ja pinnase füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes

OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskus | Tartu filiaal
Registrikood 10057662 | KMKR EE100067066
Vaksali 17A, 50410 Tartu
tel 7307279 | faks 7307279 | tartu@klab.ee | www.klab.ee
a/a 10102031621003 SEB , kood 401



ANALÜÜSIAKT TA11003399 - Põhjavesi

Tellijä: TÜ Geoloogia osakond
Ravila 14 A, Tartu

Proovivõtjad: Polikarpus, Maile; Jõelett, Argo

Proovivõtuaeg: 07.12.2011

Laborisse tulek: 08.12.2011 10:15

Analüüsi lõpp: 16.12.2011 12:27

Proovivõtukoh: Haapsalu, Läänemaa Pääsukese 3 puurkaev

Proovi nr.: 2015

| Näitaja | Katsemeetod | Tulemus | Ühik |
|---|--------------------|---------|-------|
| pH | ISO 10523 | 7,7 | |
| Lõhnaläve indeks | EVS-EN 1622* | lõhnata | TON |
| Värvus | EVS-EN ISO 7887* | 140 | ° |
| Hägusus | EVS EN ISO 7027 | 55 | NHÜ |
| Biokeemiline hapnikutarve (BHT ₅) | EVS-EN 1899-2 | < 1 | mg/l |
| Keemiline hapnikutarve (KHT _{Mn}) | SFS 3036 | 7,7 | mg/l |
| Fluoriid (F ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 0,54 | mg/l |
| Elektrijuhtivus | EVS-EN 27888 | 872 | µS/cm |
| Ammoonium (NH ₄ ⁺) | EVS-EN ISO 11732 | 0,53 | mg/l |
| Nitraat (NO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | < 0,2 | mg/l |
| Nitrit (NO ₂ ⁻) | EVS-EN ISO 13395 | < 0,01 | mg/l |
| Sulfaat (SO ₄ ²⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 91 | mg/l |
| Kloriid (Cl ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 96 | mg/l |
| Hüdrokarbonaat (HCO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 9963-1 | 366 | mg/l |
| Kaalium (K) | Mv_20* | 8,9 | mg/l |
| Kaltsium (Ca) | EVS-EN ISO 11885 | 120 | mg/l |
| Magneesium (Mg) | EVS-EN ISO 11885 | 20 | mg/l |
| Mangaan (Mn) | EVS-EN ISO 11885 | 0,073 | mg/l |
| Naatrium (Na) | Mv_20* | 66 | mg/l |
| Raud (Fe) | EVS-EN ISO 11885 | 41 | mg/l |
| Üldorgaaniline süsinik (TOC) | EVS-EN 1484 | 6,2 | mg/l |

* akrediteerimata meetod

Kommenta:

Kinnitas:

kvaliteedispetialist Mae Uri /

16.12.2011

Analüüsi tulemused on kehtivad ainult aktiil toodud proovi kohta.
Dokumendi osaline paljundamine ilma Eesti Keskkonnauuringute Keskus OU loata keelatud.
Referentlabor reoveesette analüüsimiseks (EV keskkonnaministri kaskkiri nr.941)

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg.nr.L008

Soojussüsteemi puurkaevu ja -augu mõju põhjavee ja pinnase füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes

OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskus | Tartu filiaal
Registrikood 10057662 | KMKR EE100067066
Vaksali 17A, 50410 Tartu
tel 7307279 | faks 7307279 | tartu@klab.ee | www.klab.ee
a/a 10102031621003 SEB , kood 401



ANALÜÜSIAKT TA11003400 - Põhjavesi

Tellijaja: TÜ Geoloogia osakond
Ravila 14 A, Tartu

Proovivõtjad: Polikarpus, Maile; Jõeleht, Argo

Proovivõtuaeg: 07.12.2011

Laborisse tulek: 08.12.2011 10:15

Analüüsi lõpp: 16.12.2011 12:36

Proovivõtukoht: Kiili vald, Harjumaa Kannikese 8 , puurkaev

Proovi nr.: P-804

| Näitaja | Katsemeetod | Tulemus | Ühik |
|---|--------------------|---------|-------|
| pH | ISO 10523 | 7,8 | |
| Lõhnaläve indeks | EVS-EN 1622* | 1,0 | TON |
| Värvus | EVS-EN ISO 7887* | 50 | ° |
| Hägusus | EVS EN ISO 7027 | 7,7 | NHÜ |
| Biokeemiline hapnikutarve (BHT ₅) | EVS-EN 1899-2 | < 1 | mg/l |
| Keemiline hapnikutarve (KHT _{Mn}) | SFS 3036 | 1,3 | mg/l |
| Fluoriid (F ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 0,16 | mg/l |
| Elektrijuhtivus | EVS-EN 27888 | 481 | µS/cm |
| Ammoonium (NH ₄ ⁺) | EVS-EN ISO 11732 | 0,18 | mg/l |
| Nitraat (NO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | < 0,2 | mg/l |
| Nitrit (NO ₂ ⁻) | EVS-EN ISO 13395 | < 0,01 | mg/l |
| Sulfaat (SO ₄ ²⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 47 | mg/l |
| Kloriid (Cl ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 8,9 | mg/l |
| Hüdrokarbonaat (HCO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 9963-1 | 234 | mg/l |
| Kaalium (K) | Mv_20* | 1,8 | mg/l |
| Kaltsium (Ca) | EVS-EN ISO 11885 | 77 | mg/l |
| Magneesium (Mg) | EVS-EN ISO 11885 | 9,2 | mg/l |
| Mangaan (Mn) | EVS-EN ISO 11885 | 0,20 | mg/l |
| Naatrium (Na) | Mv_20* | 12 | mg/l |
| Raud (Fe) | EVS-EN ISO 11885 | 1,5 | mg/l |
| Üldorgaaniline süsinik (TOC) | EVS-EN 1484 | 2,2 | mg/l |

* akrediteerimata meetod

Kommentaari:

Kinnitas:

kvaliteedispetsialist Mae Uri /

16.12.2011

Analüüsi tulemused on kehtivad ainult aktiivsed toodud proovi kohta.
Dokumendi osaline paljundamine ilma Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ loata keelatud

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg nr L008

Referentlabor reoveesete analüüsimiseks (EV keskkonnaministri käskkirj nr.941).

Soojussüsteemi puurkaevu ja -augu mõju põhjavee ja pinnase füüsikalistele omadustele ning põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes

OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskus | Tartu filiaal
Registrikood 10057662 | KMKR EE100067066
Vaksali 17A, 50410 Tartu
tel 7307279 | faks 7307279 | tartu@klab.ee | www.klab.ee
a/a 10102031621003 SEB , kood 401



ANALÜÜSIAKT TA11003401 - Põhjavesi

Tellijä: TÜ Geoloogia osakond
Ravila 14 A, Tartu

Proovivõtjad: Polikarpus, Maile; Jõelett, Argo

Proovivõtuaeg: 07.12.2011

Laborisse tulek: 08.12.2011 10:15

Analüüsi lõpp: 16.12.2011 12:40

Proovivõtukoht: Järvamaa Peetri 4-1, puurkaev, Paide

Proovi nr.: P-742

| Näitaja | Katsemeetod | Tulemus | Ühik |
|---|--------------------|---------|-------|
| pH | ISO 10523 | 7,4 | |
| Lõhnaläve indeks | EVS-EN 1622* | lõhnata | TON |
| Värvus | EVS-EN ISO 7887* | 30 | ° |
| Hägusus | EVS EN ISO 7027 | < 0,5 | NHÜ |
| Biokeemiline hapnikutarve (BHT ₅) | EVS-EN 1899-2 | < 1 | mg/l |
| Keemiline hapnikutarve (KHT _{Mn}) | SFS 3036 | 3,4 | mg/l |
| Fluoriid (F ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | < 0,1 | mg/l |
| Elektrijuhtivus | EVS-EN 27888 | 961 | µS/cm |
| Ammoonium (NH ₄ ⁺) | EVS-EN ISO 11732 | < 0,03 | mg/l |
| Nitraad (NO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 25 | mg/l |
| Nitrit (NO ₂ ⁻) | EVS-EN ISO 13395 | 0,020 | mg/l |
| Sulfaat (SO ₄ ²⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 48 | mg/l |
| Kloriid (Cl ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 66 | mg/l |
| Hüdrokarbonaat (HCO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 9963-1 | 408 | mg/l |
| Kaalium (K) | Mv_20* | 16 | mg/l |
| Kaltsium (Ca) | EVS-EN ISO 11885 | 120 | mg/l |
| Magneesium (Mg) | EVS-EN ISO 11885 | 24 | mg/l |
| Mangaan (Mn) | EVS-EN ISO 11885 | < 0,02 | mg/l |
| Naatrium (Na) | Mv_20* | 44 | mg/l |
| Raud (Fe) | EVS-EN ISO 11885 | < 0,05 | mg/l |
| Üldorgaaniline süsinik (TOC) | EVS-EN 1484 | 37 | mg/l |

* akrediteerimata meetod

Kommentaari:

Kinnitas: kvaliteedispetsialist Mae Uri /

16.12.2011

Analüüsi tulemused on kehtivad ainult aktiil toodud proovi kohta.
Dokumendi osaline paljundamine ilma Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ loata keelatud
Referentlabor reoveesette analüüsiks (EV keskkonnaministri käskkirj nr.941).

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg.nr.L008

OÜ Eesti Keskkonnauuringute Keskus | Tartu filiaal
Registrikood 10057662 | KMKR EE100067066
Vaksali 17A, 50410 Tartu
tel 7307279 | faks 7307279 | tartu@klab.ee | www.klab.ee
a/a 10102031621003 SEB, kood 401



ANALÜÜSIAKT TA11003402 - Põhjavesi

Tellijä: TÜ Geoloogia osakond
Ravila 14 A, Tartu

Proovivõtjad: Polikarpus, Maile; Jõelet, Argo

Proovivõtuaeg: 07.12.2011

Laborisse tulek: 08.12.2011 10:15

Analüüsi lõpp: 16.12.2011 12:43

Proovivõtukoh: Järvamaa Pikk 1, puurkaev, Oisu

Proovi nr.: P-758

| Näitaja | Katsemeetod | Tulemus | Ühik |
|---|--------------------|---------|-------|
| pH | ISO 10523 | 7,6 | |
| Lõhnaläve indeks | EVS-EN 1622* | 1,7 | TON |
| Värvus | EVS-EN ISO 7887* | 25 | ° |
| Hägusus | EVS EN ISO 7027 | 1,1 | NHÜ |
| Biokeemiline hapnikutarve (BHT ₅) | EVS-EN 1899-2 | < 1 | mg/l |
| Keemiline hapnikutarve (KHT _{Mn}) | SFS 3036 | 2,3 | mg/l |
| Fluoriid (F ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 0,10 | mg/l |
| Elektrijuhtivus | EVS-EN 27888 | 747 | µS/cm |
| Ammoonium (NH ₄ ⁺) | EVS-EN ISO 11732 | < 0,03 | mg/l |
| Nitraad (NO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 14 | mg/l |
| Nitrit (NO ₂ ⁻) | EVS-EN ISO 13395 | 0,016 | mg/l |
| Sulfaat (SO ₄ ²⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 62 | mg/l |
| Kloriid (Cl ⁻) | EVS-EN ISO 10304-1 | 10 | mg/l |
| Hüdrokarbonaat (HCO ₃ ⁻) | EVS-EN ISO 9963-1 | 405 | mg/l |
| Kaalium (K) | Mv_20* | 4,3 | mg/l |
| Kaltsium (Ca) | EVS-EN ISO 11885 | 110 | mg/l |
| Magneesium (Mg) | EVS-EN ISO 11885 | 32 | mg/l |
| Mangaan (Mn) | EVS-EN ISO 11885 | < 0,02 | mg/l |
| Naatrium (Na) | Mv_20* | 4,3 | mg/l |
| Raud (Fe) | EVS-EN ISO 11885 | 0,086 | mg/l |
| Üldorgaaniline süsinik (TOC) | EVS-EN 1484 | 3,4 | mg/l |

* akrediteerimata meetod

Kommentaär:

Kinnitas: kvaliteedispetzialist Mae Uri /  16.12.2011

Analüüsi tulemused on kehtivad ainult aktiil toodud proovi kohta.
Dokumendi osaline paljundamine ilma Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ loata keelatud
Referentlabor reoveesette analüüsimiseks (EV keskkonnaministri käskkirj nr.941).

EAK poolt akrediteeritud katselabor reg.nr.L008