1. Ülevaade Eesti geotermilisest potentsiaalist

2. Ülevaade maasoojusenergia rakendamisvõimalustest ja vajalikest uuringutest

Koostaja:
Alvar Soesoo

Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut

Tallinn, 2012

SISUKORD

SISSEJUHATUS 3
1. EESTI MAAPÕUE GEOLOOGIAST 4
2. MÕNINGAD GEOTERMIKA PÕHIMÕISTED 5
2.1. Soojusvoo häired 8
3. TEMPERATUURID JA SOOJUSVOOG EESTI MAAPÕUES 12
4. GEOTERMILISE RESSURSSI KASUTAMINE MÕNINGATES NAABERMAADES 24
4.1. Rootsi 24
4.2. Soome 25
4.3. Taani 26
4.4. Läti 26
4.5. Leedu 28
5. MUUD KOGEMUSED GEOTERMILISE ENERGIA RAKENDAMISEL 31
5.1 Ülevaade Soultz-sous-Forêts' piirkonna geoloogiast ja geotermikast 34
6. EESTI OMAPÄRA JA VÕIMALIKUD LAHENDUSED 35
6.1 Vajadus süvageotermaalseteks uuringuteks 36
6.2 Uuritavad geoloogilised struktuurid 37
6.3 Võimalikud uuringuliste süvapuuraukude asukohad 38
KOKKUVÕTE 39
KASUTATUD KIRJANDUS 41

SISSEJUHATUS

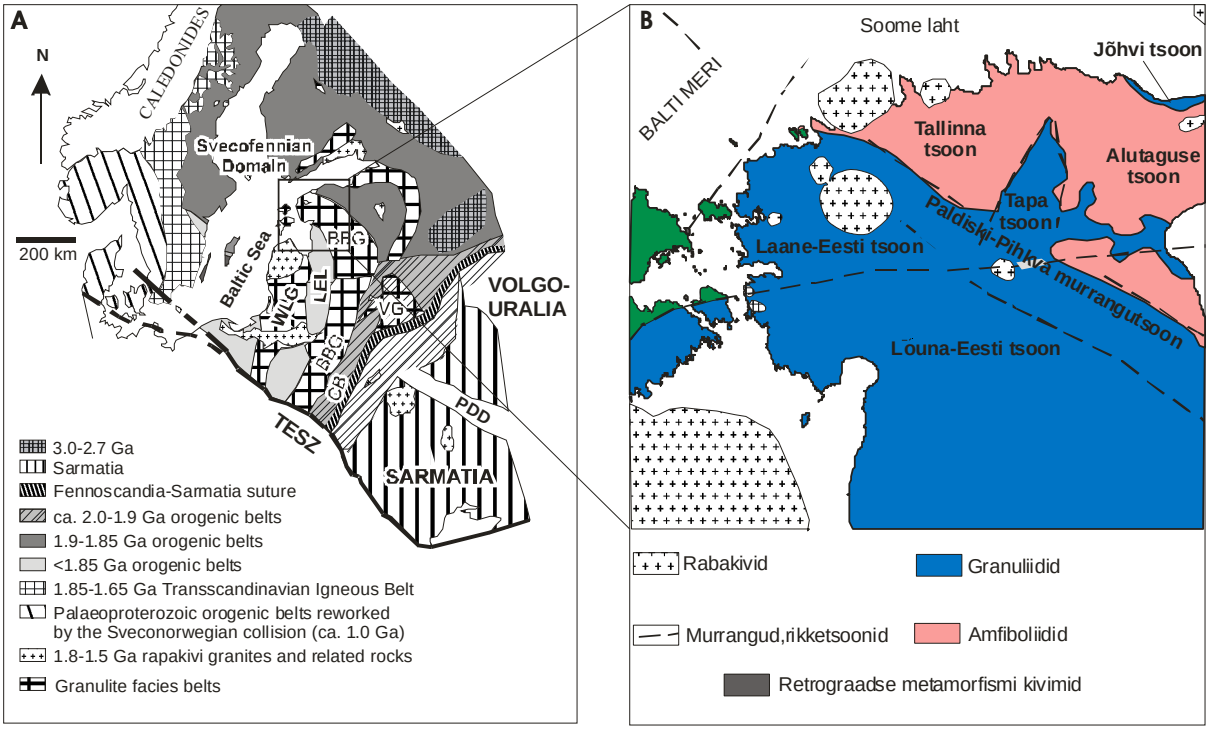
Käesoleva kokkuvõtte eesmärgiks on vastavalt SA KIK projektile Nr 1818 *„Laialdasemat maasoojusenergia rakendamist stimuleerivate majanduslike meetodite analüüs teiste riikide näitel ning saasteennetuslikku tegevust toetava tegevusstrateegia väljatöötamine Eestis"* anda ülevaade Eestis geoloogilisest ehitusest ja sellest tulenevast geotermaalpotentsiaalist, põhilistest geotermilistest mõistetest ning tehtud uuringutest geotermika ja sellega seonduvates valdkondades. Ülevaade antakse samuti Eesti võimalikule tulevikupotentsiaalile, sh võimalikele uuringukohtadele lähtuvalt süvapuurimisest.

Dokument sisaldab kahte projektis nimetatud valdkonda:
1. Ülevaade Eesti geotermilisest potentsiaalist.
2. Ülevaade maasoojusenergia rakendamisest ning Eesti tulevikupotentsiaalile hinnangu andmine.

Lisaks on osa valminud materjale integreeritud Eesti Geotermaalenergia Assotsiatsiooni ja projekti GeoPower kodulehtedel, vt.
http://geothermal.org.ee
http://www.geopower.ee/
http://www.geopower.ee/materjalid/naidislahendused/

1. EESTI MAAPÕUE GEOLOOGIAST

Eesti maakoore võib jagada kolme ossa. Kõige ülemise osa moodustavad Kvaretnaariajastu jää- ja jää-veelised setted – moreenid, liivad, savid ja kruus. Eesti aluspõhja moodustavad selle all lasuvad Paleozoikumi vanusega (540-360 miljonit aastat tagasi ladestunud) moondumata settekivimid, millede paksus on Põhja-Eestis 150 meetrit ning Lõuna-Eestis ulatub kuni 770 meetrini.

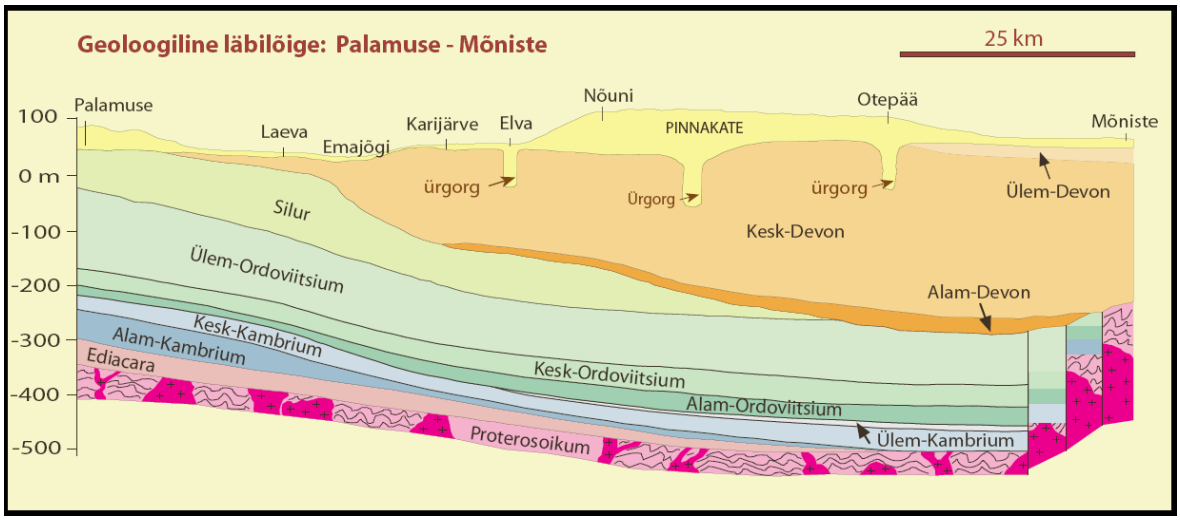


Joonis 1. Eesti maakoore geoloogiliste struktuuride asend Fennoskandia kilbi ja Ida-Euroopa platvormi suhtes. Eesti aluskorra põhilised kivimikompleksid on esitatud lihtsustatud kujul joonise osal B (koostanud A. Soesoo).

Mitmed põhjaveekihid on seotud nimetatud kivimitega. Aluspõhja all asub aluskord, mille moodustavad Proterozoikumi vanusega (2-1,5 miljardit aastat) kristalsed kivimid. Kristalne aluskord Eesti alal ei paljandu, selle ehitust saab uurida vaid puuraukude abil.

Eesti ala jääb tervenisti Ida-Euroopa platvormi Proterosoilise vanusega Svekofennia aluskorraplokile (joonis 1 ja 2). See plokk kujutab endast Vara-Proterosoikumis eksisteerinud ookeani sulgumisel tekkinud kurrutusala ja koosneb peamiselt tugevasti moondunud sette- ja vulkaanilistest kivimitest. Tekkinud gneisse ja migmatiite läbistavad 1,54-1,67 miljardi vanused rabakivi-intrusioonid ja muud graniidid. Svekofennia mäetekkele järgnes Eestis ligi 1,3 miljardi pikkune kulutusperiood, mille tulemusel aluskorra pealispinnale tekkis kuni 100 meetri paksune murenemiskoorik. Eesti

aluskorrakivimitele lähedase koostisega on ka valdavalt Soome ja Rootsi aluskorrast pärinevad arvukad rändrahnud, mille on Eestisse kandnud mandrijää.



Joonis 2. Eesti maakoore läbilõige Kesk- ja Lõuna-Eesti näitel. Maakoore ülemise osa moodustavad Kvaternaari setted, mille all lasuvad 540-360 miljonit aastat vanad Paleozoikumi settekivimid. Viimaste all lasuvad kristalsed kivimid, mis on ka suurima geotermilise ressursi tähtsusega praeguses kontekstis.

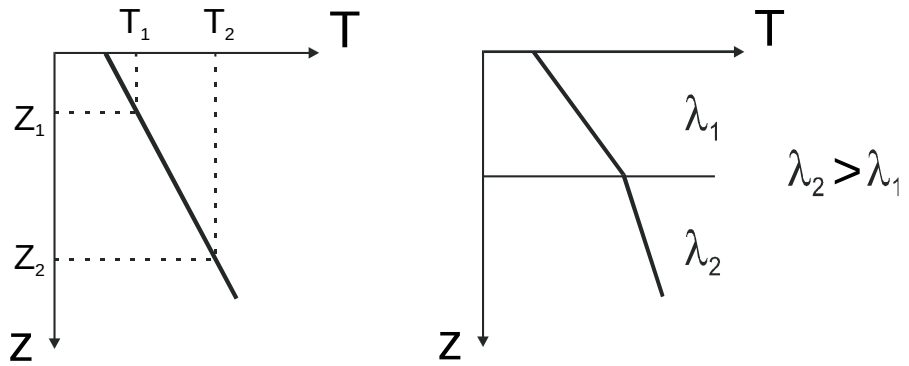
2. MÕNINGAD GEOTERMIKA PÕHIMÕISTED

Temperatuur on geotermika põhiparameetreid, mis kirjeldab maapõue soojuslikku seisundit. Tavaliselt mõõdetakse maasiseseid temperatuure puuraugus. Looduslikes tingimustes on kivimi ja tema poorides oleva vee temperatuurid võrdsed või väga lähedased.

Reeglina on ka puuraugus oleva vee temperatuur võrdne ümbritsevate kivimite omaga, kuid esineb juhtumeid, kus puurauk ühendab erineva survega veekihte ning siis võib vesi hakata mööda puurauku voolama. Sel juhul ei pruugi puuraugus mõõdetavad temperatuurid peegeldada tegelikke temperatuure sellel sügavusel.

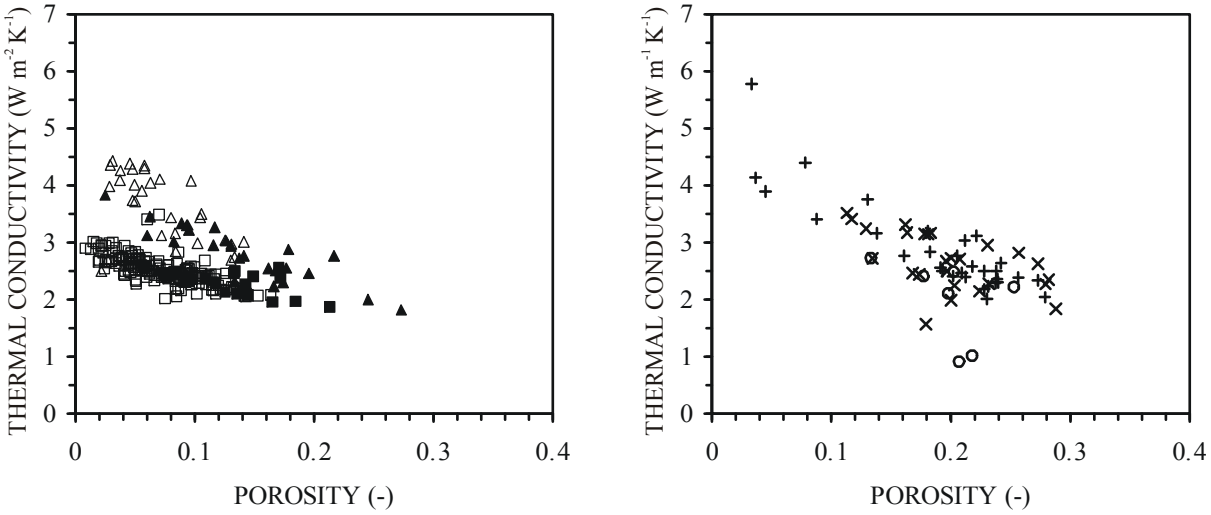
Enamasti kasvab temperatuur sügavuti ja selle kasvu kiirust kirjeldab **temperatuuri gradient** e. geotermiline gradient (Joonis 1.1). Kuna temperatuur kasvab suhteliselt aeglaselt, siis on praktikas temperatuuri gradiendi mõõtühikuks kraadi kilomeetri kohta (ehk millikelvinit meetri kohta, K/km = mK/m). Kontinentaalsel alal on keskmine geotermiline gradient 30 K/km, kuid mandrilaamade aktiivsetel äärealadel ja teistes vulkanismiga seotud piirkondades võib geotermiline gradient olla märgatavalt kõrgem. Vanadel kontinentaalsetel kilpidel, sealhulgas näiteks Eesti alal jääb geotermiline gradient

alla 30 kraadi kilomeetri kohta, näiteks Soome alal varieerub see 8 ja 20 K/km vahel. Samas varieerub geotermiline nii sügavuti kui ka piirkonniti. Sügavuti sõltub temperatuuri gradient peamiselt **kivimite soojusjuhtivusest** λ (joonis 3). Termilise tasakaalu korral (mille poole maa soojusväli pidevalt püüdleb) peab **soojusvoo tihedus** (temperatuuri gradiendi ja soojusjuhtivuse korrutis) olema konstantne. Seega, mida väiksem on kivimite soojusjuhtivus, seda suurem peab olema temperatuuri gradient, et sama soojushulk kanduks edasi.



Joonis 3. Geotermiline gradient näitab temperatuuri kasvu kiirust sügavuti ja seda arvutatakse $(T_2-T_1)/(Z_2-Z_1)$ (vasakul). Joonise parempoolne osa näitab, et madala soojusjuhtivusega kivimites on temperatuuri gradient suurem kui kõrge soojusjuhtivusega kivimites (A. Jõeleht).

Kivimite võimet soojust edasi kanda mõjutab enim mineraloogiline koostis, aga settekivimite puhul ka poorsus (mida suurem poorsus, seda halvem soojusjuhtivus). Lisaks mõjutavad ka poorides oleva vedeliku/gaasi soojusjuhtivust (õhk on kehvem soojusjuht kui vesi), temperatuur (soojuspaisumine halvendab) ja rõhk (parandab). Tulenevalt kõigist neist mõjuritest võib sama kivimtüübi soojusjuhtivus varieeruda küllaltki suurtes piirides (joonis 4).



Joonis 4. Eesti karbonaatkivimite (vasakul) ja terrigeensete kivimite (paremal) soojusjuhtivus (Jõeleht and Kukkonen, 2002). Soojusjuhtivus sõltub peamiselt mineraloogilisest koostisest ja poorsusest. Tingmärgid: ▲ ,▲ – lubjakivi; △ ,△ – dolomiit; □ – liivakivi; ■ – aleuroliit; ■ – savikivim.

Soojusjuhtivus väljendab konduktiivset soojuskannet, mis toimub aine sisese soojusvõnkumise tulemusena. Lisaks konduktiivsele võib soojus kanduda edasi ka kiirguslikult (muutub oluliseks alles temperatuuridel üle 1000°C) ja konvektiivselt, mille puhul soojus kandub edasi koos ainese enesega (näiteks voolav põhjavesi või fluidid). Põhjavee voolamisega seotud soojuskandest tuleb juttu allpool.

Soojusvoo tihedus väljendab soojushulka, mis läbib pindalaühiku ühikulise aja jooksul ning arvutatakse temperatuuri gradiendi ja soojusjuhtivuse korrutisena. Enamasti on soojusvoog maksimaalne vertikaalsuunas (risti maapinnaga), kuid teatud juhtudel ei pruugi see alati nii olla.

Soojusvoo tiheduse mõõtühikuks on vatt ruutmeetri kohta - W/m^2, praktikas millivatt ruutmeetri kohta - mW/m^2 . Kontinentaalsete alade globaalne keskmine on 65 mW/m^2, mis on üle tuhande korra väiksem Päikeselt tulevast soojuskiirgusest (mis on Eestis umbes 200 W/m^2 aasta keskmisena). Eesti kuulub „suhteliselt külmade“ maade hulka, kus maasisene soojusvoog on enamasti vahemikus 30—40 mW/m^2, mineviku kliimamuutuste, eriti jää-ajast tingitud jahtumise, suhtes parandatud väärtused on pisut kõrgemad ja jäävad vahemikku 40—50 mW/m^2.

Soojusvoo tiheduse määrangud on sageli seotud küllatki suurte vigadega. Need vead tulenevad nii mõõtmisvigadest kui ka kivimite muutlikkusest nii vertikaal- kui ka horisontaallõikes. Soojusvoo tiheduse variatsioonidega ±5—10 mW/m^2 tuleb sageli leppida ka väga detailsetel töödel, kus temperatuuri mõõdetakse 0,001 K lahutusega ja kus soojusjuhtivust mõõdetakse mitmes proovis meetri kohta. Aktsepteeritavaks tuleks lugeda mõõtmisi, kus temperatuuri mõõdetakse kuni 10-meetrise sammu ja 0,01 K lahutusega ning soojusjuhtivuse mõõtmisi on teostatud samas puuraugus mitmeid.

Kontinentaalse maakoorega aladel (nagu seda on ka Eesti) kasvab soojusvoog alt üles maapinna suunas, kuna sügavusest tulevale soojusele lisandub kivimites olevate radioaktiivsete elementide lagunemisest (**radiogeenne soojustootlikkus**) lisanduv soojus. Sadadesse meetritesse ulatuvate puuraukude puhul on lisanduva soojuse hulk tühine võrreldes soojusvoo tiheduse määramisveaga ning tavaliselt käsitletakse soojusvoogu vertikaalsuunas konstantsena. Kilomeetritesse ulatuvate puuraukude puhul tuleb arvestada, et sügavamal on soojusvoo tihedus väiksem ja sellest tulenevalt võib eeldada ka väiksemat geotermilist gradienti.

Peamised elemendid, mis kivimites radioktiivse lagunemise tõttu soojust tekitavad, on uraan (U), toorium (Th) ja kaalium (K). U ja Th esinevad kivimites suhteliselt väikestes kogustes ja nende sisaldused on mõõdetavad ppm-des (miljondik osa kivimi massist: 1 ppm = 1 g/tonnis), samas kui kaalium on kivimites suhteliselt tavaline element, mille kogust mõõdetakse protsentides (graniitsetes kivimites võib K sisaldus ulatuda 3-8 % kivimi massist). Teisest küljest toimub U ja Th lagunemine tütarelementideks, mis omakorda lagunevad radioaktiivselt tekitades samuti soojust ja ühe uraani või tooriumi aatomi lagunemisel tekib oluliselt rohkem soojust võrreldes kaaliumiga, millel on vaid üks tütarelement. Üldjuhul on siiski nende kolme elemendi osalus soojuse tekitamisel ligikaudselt võrdse kaaluga.

Radioaktiivsete elementide poolt genereeritud soojust tekib suhteliselt väikestes kogustes ehk enamasti 0.5—2 mikrovatti 1 kuupmeetri kivimi kohta ($\mu W/m^3$). Hoolimata soojustootlikkuse väikestest väärtustest on sellel parameetril suur tähtsus, kuna suurem osa

maapinnale jõudvast soojusest on tekitatud radioaktiivsete elementide lagunemise tagajärjel. Radioaktiivsed elemendid on kontsentreerunud peamiselt maakoore ülaossa (ülemised 0—15 km). Lihtsustatuna võib tuua näite, et kivimites, mille radiogeenne soojustootlikkus on 2 $\mu W/m^3$, lisandub iga kilomeetriga alt tulevale soojusvoole 2 mW/m^2.

Radioaktiivsete elementide jaotus kivimites sõltub nende algsest koostisest ja hilisemast arengust, kuid esineb mõningaid üldisi seaduspärasusi. Granitoidse (happelise) koostisega magma- ja moondekivimitel on reeglina suurem soojustootlikkus kui basaltse (aluselise) koostisega kivimitel. Kui savid välja jätta, siis settekivimitel on suhteliselt madal soojustootlikkus. Savidel on võime absorbeerida uraani ja tooriumit saviliblede pinnale ja seega suurendada soojustootlikkust. On üldine seaduspärasus, et kõrge moonde (kivimi sattumine kõrge rõhu ja temperatuuri tingimustesse) läbiteinud kivimid on radioaktiivsete elementide osas vaesustunud, kuna viimased kantakse moonde käigus kivimist välja. Suurima soojustootlikkusega kivimiteks võiks pidada granitoide ja savikivimeid (ning nende madala moondeastme produkte), kus soojustootlikkus võib ulatuda 2—5 $\mu W/m^3$, mõningatel juhtudel aga rohkemgi.

2.1. Soojusvoo häired

Maasisene soojusväli püüab saavutada termilist tasakaalu, milleks lihtsustatud tähenduses on olukord, kus sügavusest tulev soojusvoog kasvab maapinna suunas vaid radiogeense soojustootlikkuse võrra. Praktikas peaks see tähendama isegi mõnekilomeetrises sügavusintervallis enam-vähem konstantset soojusvoo tihedust, mille määramiseks võiks piisata lühikeses intervallis temperatuuri gradiendi ja soojusjuhtivuse mõõtmisest. Tegelikkuses on soojuslik tasakaal rikutud. On üldine reegel, et mida maapinna poole, seda rohkem on tegureid, mis soojusvoogu mõjutavad ning seda suuremad on ka hälbed. Kaks peamist soojusvoo tihedust mõjutavat tegurit on voolav põhjavesi ja minevikus toimunud kliimamuutused.

Põhjavee voolamine

Kivimitel on küll suur soojusmahtuvus (õigemini erisoojus), kuid veel on see suurem. Ühe kuupmeetri vee soojendamiseks 1 kraadi võrra kulub 1,5—2 korda rohkem soojust kui tüüpilise kivimi puhul. Põhjavee voolamisel toimub pidevalt vee temperatuuri ühtlustumine kivimi temperatuuriga, mis tähendab süsteemi soojendamist või jahutamist. Kuna vee liikumine toimub kivimis eneses, kus soojusülekande vahemaad on millimeetri- kuni meetriskaalas ning kuna reeglina ei ole põhjavee liikumiskiirus kuigi suur, võib vaadelda vee ja kivimi temperatuure ühtsena.

Vee liikumiskiiruse all ei mõisteta geotermikas (nagu ka hüdrogeoloogias) mitte vee tegelikku liikumiskiirust, vaid Darcy kiirus, s.o. vee hulka, mis voolab läbi ristlõike pinna ajaühikus ($m^3/(m^2\ s) = m/s$). Mida väiksem on kivimi poorsus, seda suurem peab olema vee tegelik kiirus, et sama suur veehulk jõuaks läbi ühikulise ristlõike voolata.

Voolav vesi kannab energiat kaasas (konvektiivne soojuskanne) ning põhjustab temperatuuri (ja soojusvoo tiheduse) anomaaliaid. Põhjavee toitealal võetakse vee soojenemiseks kivimitest energiat ja kantakse seda väljavoolu ala suunas. Seega kaasnevad

alati põhjavee tsirkulatsiooniga nii negatiivsed (põhjavee toitumisalal) kui ka positiivsed (väljavoolu alal) soojusvoo anomaaliad. Toitumise ja väljavoolu vahelisel alal ei pruugi soojusvoo anomaaliaid esineda, kuna horisontaalse voolamise korral asendub kivimi poorides olev vesi sama sooja veega.

Kuigi voolav vesi kannab soojust, ei pruugi kaasnevad anomaaliad olla mõõdetava suurusega. Selleks, et vee voolamisega kaasneks ka olulisi soojusvoo häireid, peab vertikaalsuunaline Darcy kiirus olema suurem kui umbes 10^{-7} m/s ehk teisisõnu kivimit peab aastas läbima vähemalt tema mahuga võrdne hulk vett. Eestis on tavaliselt põhjavee liikumiskiirus ebapiisav, et konvektsioon kontrolliks soojuskannet.

Vee liikumisel saab rääkida vabast ja sunnitud konvektsioonist. Esimesel juhul on vee liikumapanevaks jõuks temperatuuri erinevustega kaasnevad tiheduse erinevused. Tänapäeval Eesti põhjavees seda ei toimu, kuna temperatuuri gradient ja kivimite veeläbilaskvus ei ole piisavad.

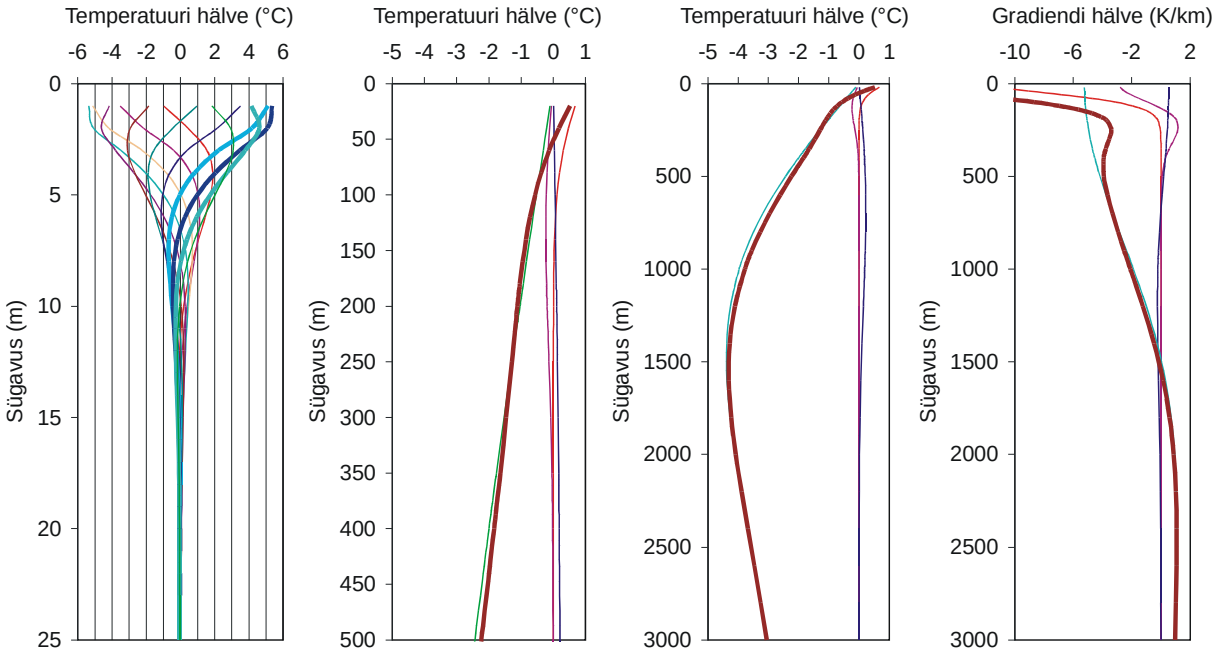
Sunnitud konvektsiooni korral hakkab vesi liikuma surve erinevuste tõttu, nagu näiteks mäe otsas on põhjavee tase kõrgemal kui orus. Piiravateks asjaoludeks on tavaliselt väike survegradient (veetaseme erinevuste ja vahemaa suhe) ja kivimite kehv veeläbilaskvus.

Põhjavee voolamisega seotud soojusvälja anomaaliaid esineb Eestis harva ja need paiknevad enamasti ülemise 100—200 m piires. Suhteliselt lauge reljeefiga Eestis puudub sageli vett liikumapanev jõud. Ühest küljest mõjub põhjavee toitumisele pärssivalt kehva veeläbilaskvusega pinnakate (moreen, savid) ja teisest küljest ei lase aluspõhjas esinevate vettjuhtivate ja vettpidavate kihtide vaheldumine tekkida kuigi sügavaid veevoolu süsteeme. Põhjavee voolamisega seotud soojusvoo anomaaliatega tasub arvestada pigem Lõuna-Eesti nendes kohtades, kus liivakive katab suhteliselt õhuke pinnakate. Põhja-Eesti lubjakivide alal toimub põhjavee vool peamiselt pinnalähedastes kihtides, kus suuri temperatuuri erinevusi ei teki, kuid lõhelisusvööndites võib esineda ka sügavamale ulatuvat vee liikumist.

Kliima muutused

Maasisesed temperatuurid on otseses sõltuvuses maapinna temperatuurist. Kui temperatuur maapinnal muutub, siis hakkab muutuma ka temperatuur maa sees, et saavutada soojuslikku tasakaalu (konstantset soojusvoogu). Soojusliku tasakaalu saavutamine on küllaltki aeganõudev protsess kivimite suure soojusmahtuvuse tõttu. Kliima ja maapinnatemperatuur muutuvad palju kiiremini võrreldes mõõdetavas sügavuses olevate kivimite temperatuuriga.

Maapinna temperatuuri muutuseid on nii perioodilist kui ka juhuslikku laadi. Perioodiliste muutuste (päevased ja aastased) poolt põhjustatud „sooja- ja külmalained“ liiguvad üha sügavamale kaotades oma amplituudi, kuna soojuse ülejääk/puudujääk hajub üle üha suureneva sügavusvahemiku. Need „lained“ jõuavad üksteisele järele hakates kompenseerima teineteise mõju ja juba suhteliselt väikestel sügavustel kaovad temperatuuri anomaaliad. Joonisel 5 on toodud arvutuslikud temperatuuriprofiilid eeldades ±10°C (tüüpiline temperatuuri käik Eestis) amplituudiga aastaseid muutusi. Juba 10-15 meetri sügavusel on 10-kraadine signaal kahanenud vaevu mõõdetavaks. Temperatuurikõveral on paremal juhul ära tuntavad 1-1,5 aasta mõju (nt. suvi-talv-eelmine suvi), kuid varasemad aastad ei paista reeglina välja. Välimõõtmistel on harva näha aastaste tsüklite mõju, kuna tihtipeale on puuraukude maapinnalähedane osa ilma veeta.



Joonis 5. Maapinnatemperatuuri muutuste arvutuslik mõju maasisestele temperatuuridele ja temperatuuri gradiendile. Aastane temperatuurikäik avaldub peamiselt ülemisel kahekümnel meetril (vasakul), pikemaajalised temperatuuri muutused kanduvad sügavamale (parempoolsed osad). Tänapäevane kliima soojenemine (punane joon) ja Väike Jääaeg (lilla) avalduvad peamiselt ülemisel paarilsajal meetril. Holotseeni Kliima Optimum (5000—8000 at, sinine) omab väikest mõju, kuid mandrijäätumise perioodi (10000—100000 at, helesinine) mõju on suur. Erinevate perioodide mõjud liituvad (jäme pruun joon). Temperatuuri gradiendi hälbe saab mööndustega ümber arvutada soojusvoo tiheduse häireks korrutadades gradiendi hälvet tüüpilise soojusjuhtivusega (2,5—3 W/m/K; A. Jõeleht järgi).

Seega omavad suureamplituudilised aastased temperatuurimuutused mõju ülemisel 20—30 meetril, sügavamal omab tähtsust aasta keskmiste temperatuuride pikaajaline trend, mis on pigem juhuslikku laadi. **Mida kaugemale ajas tagasi minna, seda pikemaajalisem ja suuremaamplituudilisem pidi olema sündmus, et ta avalduks maasisestel temperatuuridel.** Vanemad sündmused avalduvad sügavamal, kuid vanus ja sügavus pole omavahel lineaarselt sõltuvad. Viimase saja aasta jooksul toimunud maapinna temperatuuri tõus (~1°C/100 aasta kohta) peegeldub 100 m sügavuseni, „Väikse Jääaja“ nime all tuntud külma perioodi (400—150 at 1—2°C praegusest jahedam) põhjustatud temperatuuri miinimum on ligikaudu 100—200 m sügavusel ja 5000-8000 at olnud sooja perioodi (Holotseeni Kliima Optimum) põhjustatud temperatuuri maksimum on jõudnud umbes 500 m sügavusele. Sadu kuni kümneid tuhandeid aastaid tagasi toimunud mandrijäätumiste tõttu on Eestis tõenäoliselt 1—1,5 km sügavusel temperatuur 3—4°C madalam. Erinevate perioodide mõjud liituvad.

On oluline mõista, et globaalsed kliimamuutused pole ainus maapinna temperatuuri mõjutav faktor. Sõltuvalt maakasutusest (mets, heinamaa, põld, linn) on toimunud lokaalseid temperatuurimuutusi (±1°C), mis on samas suurusjärgus klimaatilistega, kuid mis on palju raskemini arvesse võetavad. Niisamuti tasub meeles pidada, et Lääne- ja Loode-Eesti on viimase 10000 aasta jooksul mere alt kerkinud, merepõhja temperatuurid aga sõltuvad sügavusest. On uurimusi, mis näitavad, et põhjavesi võib kanda oma toitumisalal klimaatilist signaali sügavamale ning väljavoolualal tuua maapinnale lähemale.

Kliimamuutuste mõju maasisesele temperatuurile tundub olevat suhteliselt väike (kuni mõni kraad), kuid ta mõjutab küllaltki oluliselt temperatuuri gradienti ja sealt kaudu ka soojusvoo tiheduse määranguid. Soojenev kliima põhjustab temperatuuri gradiendi vähenemist. Kui soojenemisel eelnes ka jahenemine (nt. mandrijäätumise perioodil), siis avaldub see läbilõike ülaosas väiksema gradiendi (tegelikult soojusvoo) ja sügavamas osas suurenenud gradiendi (soojusvoo) kaudu. Arvestades kivimite tüüpilist soojusjuhtivust, võib hinnanguliselt öelda, et jäätumiste tõttu on Eestis ülemise 500 m ulatuses soojusvoo tihedus vähenenud 10—20 mW/m^2. Kõigi kliimamuutuste koosmõju tõttu võib kohati täheldada ülemise 100—150 m piires isegi temperatuuri gradiente 0—5 K/km.

3. TEMPERATUURID JA SOOJUSVOOG EESTI MAAPÕUES

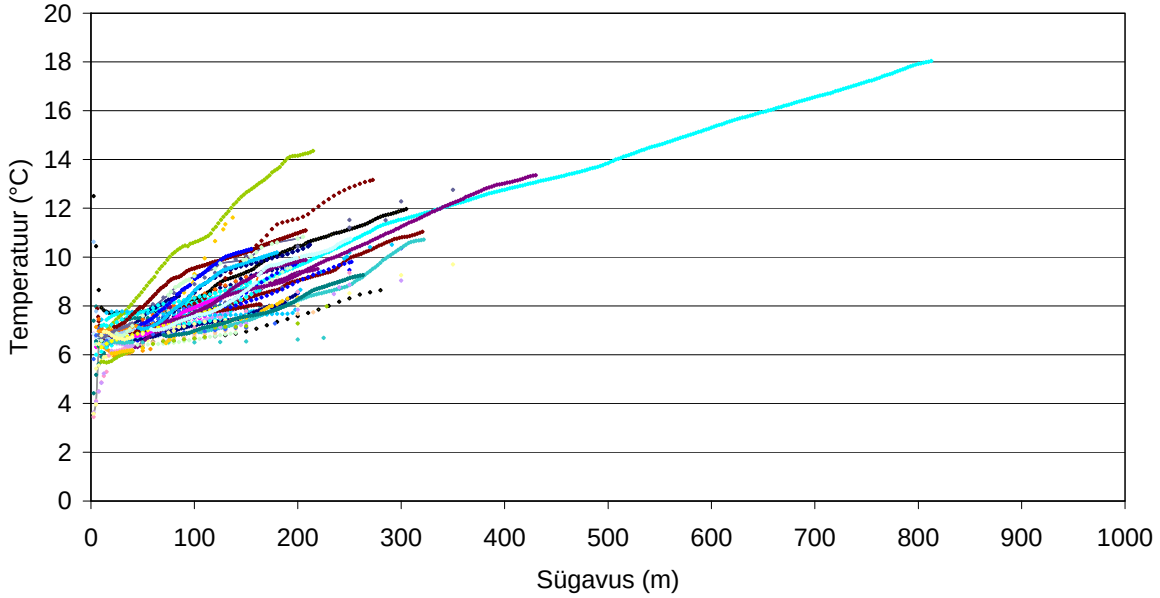
Kuigi pisteliselt oli temperatuure puuraukudes mõõdetud varemgi, said suuremad ja süstemaatilised temperatuurimõõtmised Eesti puuraukudes alguse 1970ndate keskel. Mõõtmisi teostasid ENSV Geoloogia Valitsus (nüüdne Eesti Geoloogiakeskus) ja TA Geoloogia Instituut (nüüdne TTÜ GI) ning mõõtmiste peamiseks eesmärgiks oli Eesti põhjavee toitumise ja kujunemise uurimine, aga ka veetemperatuuride üldisem uuring. Erinevalt varasematest mõõtmistest, mis olid teostatud peamiselt maksimumtermomeetritega, hakati kasutama termistoril põhineva sondiga aparatuuri, mis võimaldas suhteliselt suurt lahutust nii temperatuuri (±0,02°C) kui ka sügavuse osas. Metoodika nägi ette ülemise 50 m piires mõõtmisi 2,5 m intervalliga, kuni 150 m sügavuseni iga 10 m tagant ning sügavamal 50 m vahega. Aegade jooksul on metoodika mõnevõrra muutunud, kuid peamiseks eesmärgiks jäi korduvmõõtmiste abil kaardistada „neutraalse kihi paksust“, s.o. aastaste tsüklite mõju sügavust. Eeldatakse, et põhjavee toitumisalal kannab infiltreeruv vesi aastaseid temperatuuri muutusi sügavamale. See on tõepoolest nii, kuid lisaks vee „mõjule“ tuleks arvestada soojushajuvuse (ingl. k. thermal diffusivity) erinevustega, millele kahjuks pole üldse tähelepanu pööratud.

Detailsemate geotermiliste uuringute jaoks on sügavamal kasutatud mõõteintervall (50 m) liiga pikk. Sel viisil saadud üsna hõreda andmevõrgu puhul on raske ära tunda puuraugust tulenevaid efekte, nagu näiteks vee voolamine piki puurauku. Kuna sageli hõlmab nii pikk intervall kivimiliselt erinevaid kihte, millel on ka erinev soojusjuhtivus, siis on keeruline eristada looduslikke temperatuuri gradiendi muutusi puuraugu poolt tingitutest.

Spetsiaalselt soojusvoo tiheduse määramiseks on 1990nda paiku mõõtmisi teinud Valgevene Teaduste Akadeemia uurijad. Valgevenes asus üks NSV Liidu juhtivatest geotermikaalastest uurimisasutustest ning Eesti kuulus nende „mõjupiirkonda“. Soojusvoo määramiseks kasutati osaliselt varasemaid temperatuuriandmeid, kuid teostati ka hulgaliselt uusi mõõtmisi. Lisaks võeti kivimiproove soojusjuhtivuse mõõtmiseks. Kahjuks ei ole valdav osa nende temperatuuriandmetest käesoleva töö autoritele kättesaadav ja vaid üksikuid temperatuurikõveraid on õnnestunud saada isiklike kontaktide kaudu.

Tartu Ülikooli geoloogia instituudi ja Soome Geoloogiateenistuse koostöö geotermika valdkonnas algas 1993. aastal. Alguses sõltusid uuringud paljuski soomlaste tehnikast, kuid tänu TÜ hangitud puuraugutermomeetrile, on välitööde teostamine muutunud paindlikumaks. Mõõtmisi on tavaliselt teostatud 2,5—5 m sammuga ja võimaluse korral on samas augus mõõdetud ka vee elektrijuhtivust, mis peegeldab üsna otseselt soolsuse muutusi ja sealtkaudu annab väärtuslikku infot võimalikust vee liikumisest puuraugus. Osa tulemusi on avaldatud aruannetena ka Keskkonnaministeeriumi kodulehele (Jõeleht, 2012, 2007).

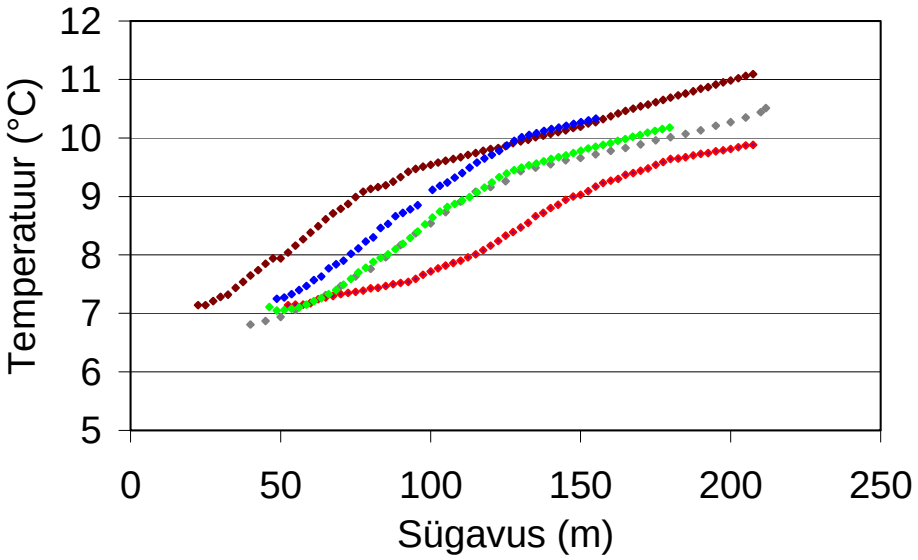
Joonisel 6 on toodud umbes 60 erineva puuraugu temperatuuri andmestik, mis esindavad umbes 50 erinevat paika. Mõningal määral on toodud ka samades puuraukudes tehtud kordusmõõtmiste tulemusi. Toodud materjal ei kata kogu Eestit, kuid on piisav, et näidata üldisi trende.



Joonis 6. Eesti puuraukudes mõõdetud temperatuurid (andmestik EGK ja A. Jõeleht).

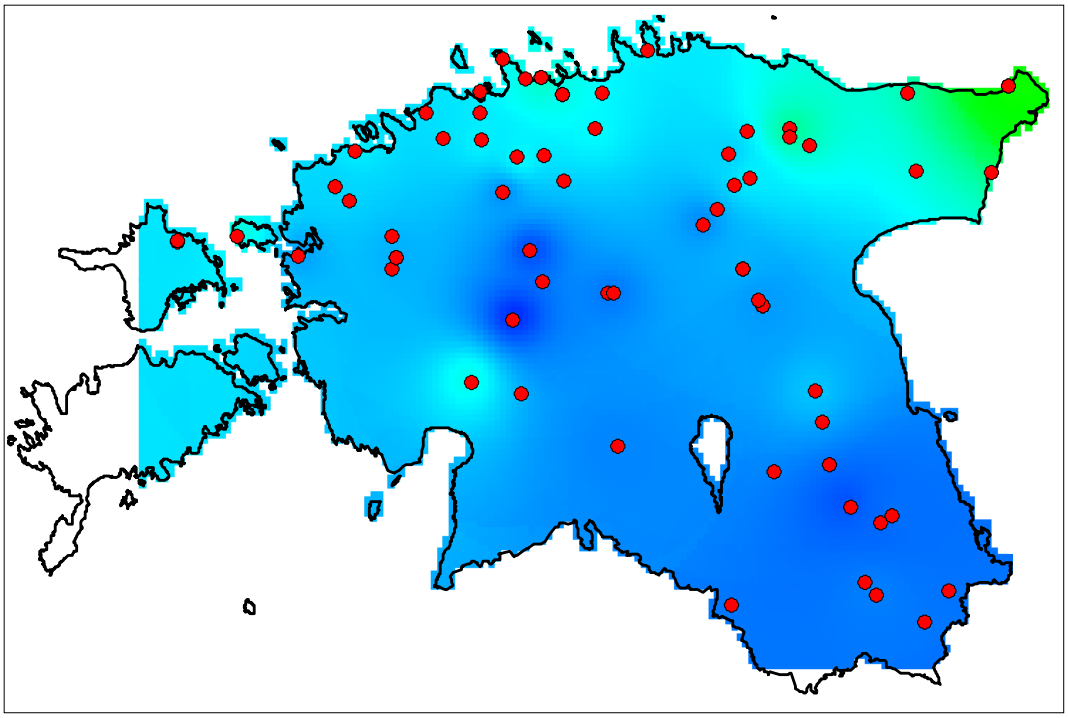
Jooniselt 6 on näha, et valdav osa temperatuuri mõõtmistest on tehtud kuni 200 m sügavustes puuraukudes. See on sügavus, kus esineb kõige rohkem temperatuuri häireid. Vaid üksikud puuraugud on sügavamad kui 300 m. Kui 70-80ndatel oli sügavate puuraukude mõõtmisel piiravaks kaabli pikkus (umbes 300 m), siis nüüdsel ajal piirab uute mõõtmiste tegemist sobilike puurkaevude nappus. Tarbimises olevad puurkaevud ei sobi temperatuuri mõõtmisteks, kuna neis on pumbad, millest tavaliselt sond ei mahu mööda, ning lisaks on seal vee liikumisega kunstlikult häiritud temperatuurid. Sobilikumad on põhjavee vaatluspuuraugud ja konserveeritud seisundis olevad tarbekaevud, kuid ka neid on aegade jooksul jäänud üha vähemaks. Palju puurauke on teadlikult likvideeritud fosforiidisõja ajal ja selle järel. Osa puurauke on muutunud kasutuskõlbmatuks inimtegevuse tulemusena (kivide sisse loopimine, mehaniseeritud põllutööd jm), osa ka looduslikult (setete sissekandumine kaevudesse, roostetamine jm).

Joonis 6 võib jätta petliku mulje, et temperatuuri gradient varieerub suures vahemikus. Kui maapinna lähedal on temperatuuri erinevused 1—2 kraadi, siis juba 100—200 meetri sügavusel on erinevused 4—5 kraadi. Peamiselt on gradiendi muutlikkuse põhjuseks erandliku soojusjuhtivusega kivimid. Joonisel 7 on näitena toodud temperatuurid viiest puuraugust, mis asuvad Tallinna ümbruses maksimaalselt 50 kilomeetrit teineteisest. Nende sügavama osa geoloogilised läbilõiked on sarnased ja peamiseks erinevuseks on lubjakivide kihi paksus läbilõike ülaosas. Neis kõigis on näha lõik, kus temperatuur kasvab kiiremini (~25—35 K/km) ning mis vastab Lontova (Kambriumi vanusega kihid) sinisavile. Savi all lamavate liivakivide ja peal lasuvate lubjakivide soojusjuhtivus on umbes kaks korda suurem ja vastavalt on ka temperatuuri gradient umbes poole väiksem (12—16 K/km). Kuigi vahepealses sügavuses võivad temperatuurid erineda kuni kaks kraadi, siis sügavamale minnes need erinevused suuresti kaovad ning temperatuuri kasv on Eestile tüüpiliselt üsna mõõdukas.

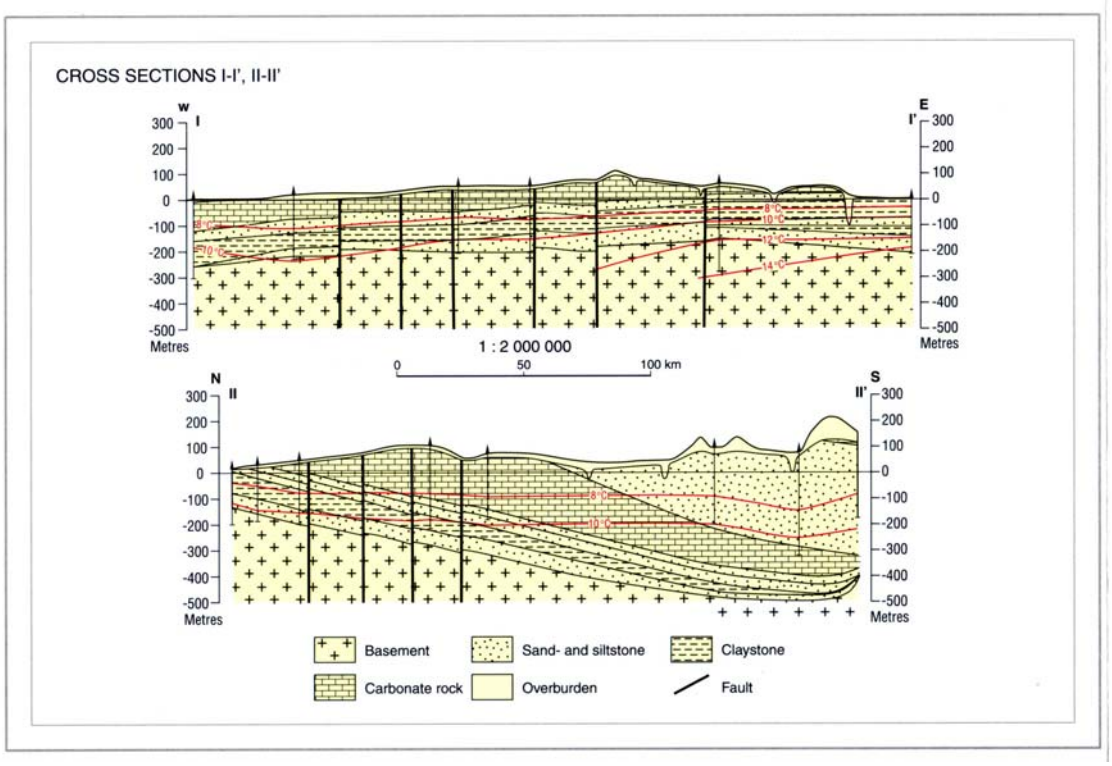


Joonis 7. Temperatuur viies Tallinna ümbruse puuraugus, mille geoloogilised läbilõiked erinevad peamiselt ülaosas lasuvate lubjakivide paksuse poolest. Järsem temperatuuri tõus vastab kehva soojusjuhtivusega Lontova sinisavidele, mis erinevates aukudes on erineval sügavusel. Nii savide all kui ka peal on temperatuuri gradient Eestile tüüpilises vahemikus (12—16 K/km; mõõtmised A. Jõeleht).

Lontova sinisavi tüüpi madala soojusjuhtivusega setendeid võib pidada Eesti geoloogilises läbilõikes pigem haruldasteks. Neid esineb settekatte alaosas ja on ühed vanemad setendid Eestis. Savide suurimad paksused esinevad Põhja- ja Kirde-Eestis, kus nad on ka ühtlasi maapinnale kõige lähemal. Savid kui „soojusisolaatorid“ on peamiseks põhjuseks, miks just nendel aladel on 200 m sügavusel kõrgem temperatuur (Joonised 8 ja 9). Suhteliselt äärmuslikuks tuleb lugeda Eesti kirdenurgas asuvat Meriküla puurauku, kus umbes 200 m paksusest settekattest moodustavad savid ligikaudu 170 m ning kus tulemuseks on senini mõõdetud kõrgeim temperatuur 200 m sügavusel — 14°C (helerohelised punktid joonisel 8).

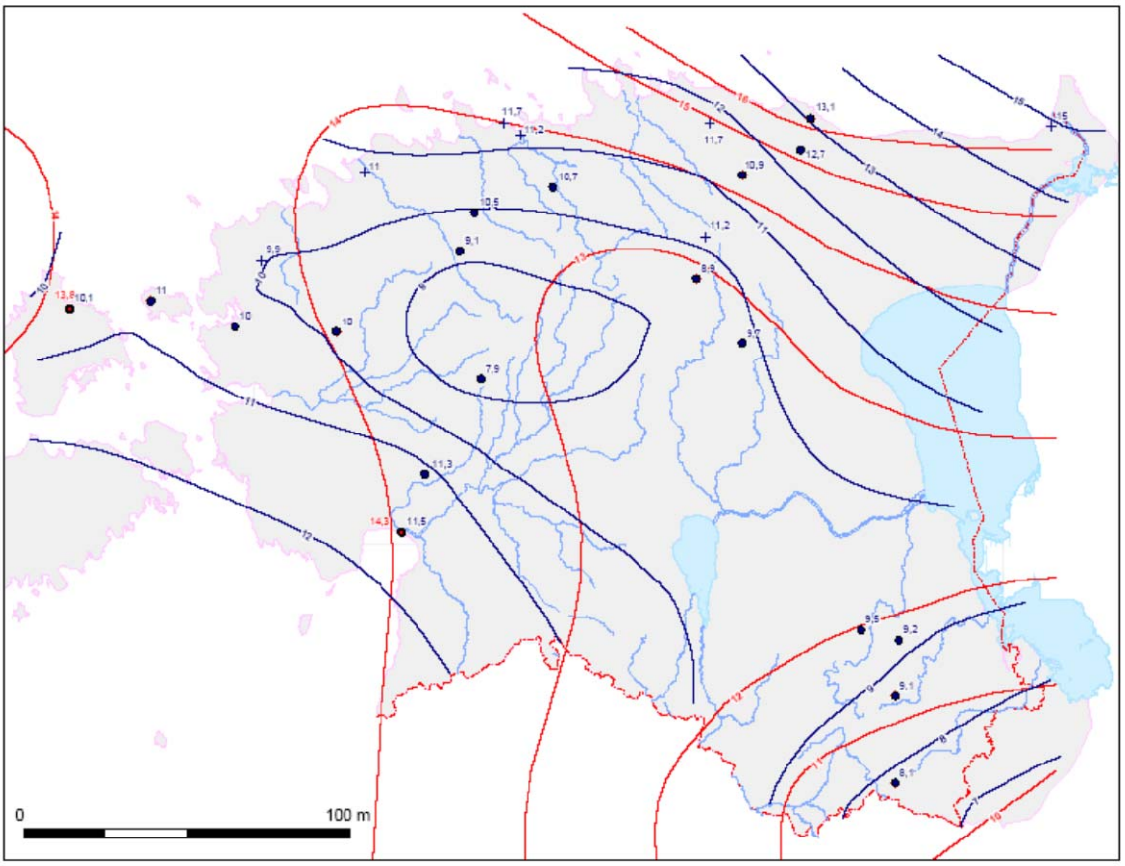


Joonis 8. Temperatuurid 200 m sügavusel on vahemikus 6,7°C (tumesinine) kuni 14°C (roheline; A. Jõeleht).



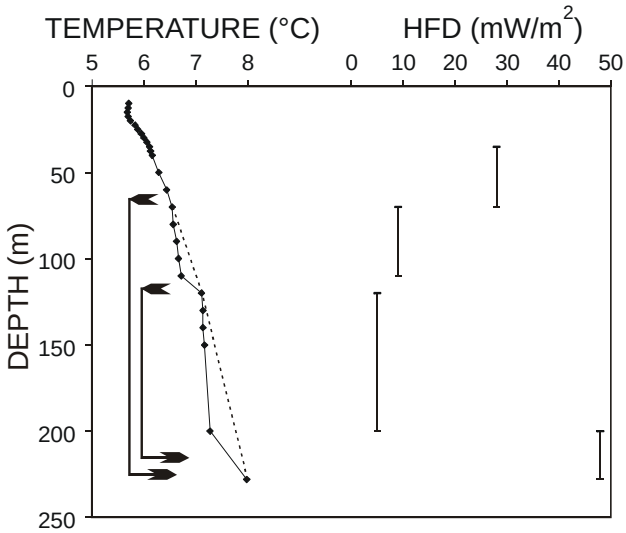
Joonis 9. Temperatuur Põhja-Eestis kulgeval lääne—ida suunalisel profiilil (üleval) ja Pandivere—Haanja joonel kulgeval põhja—lõuna suunalisel läbilõikel (all) (Jõeleht, 2002).

Kuigi vahetult on temperatuuri 500 m sügavusel mõõdetud vaid paaris puuraugus, on alust arvata, et ka sellel sügavusel on temperatuurid Põhja- ja Kirde-Eestis veidi kõrgemad kui mujal (Joonis 10). Ühest küljest on seal „savide isoleeriv mõju, mis kaitseb maa sisemust kosmose külmuse eest“. Teisest küljest näitavad mõõtmised Kirde-Eestis suuremat soojusvoo tihedust, mis võiks tähendada ka kõrgemat geotermilist gradienti.



Joonis 10. Modelleeritud temperatuurid 250 (sinine) ja 500 (punane) m sügavusel (andmed: EGK & Jõeleht, 2002, mudel S. Hade). Tuleb silmas pidada, et andmestikku 500 m sügavusel oleva temperatuuri kohta on väga vähe ning mudel ei pruugi kajastada tegelikkust.

Valgevene teadlased tegid Eesti soojusvoo uurimisel ära suure töö ning peamised tulemused avaldati 1991 (Урбан и др., 1991, joonis 11). Kõigi nende seisukohtadega ei saa siiski nõustuda. Kesk-Eestisse joonistatud temperatuuri ja soojusvoo tiheduse miinimumid põhinevad kolme puuraugu materjalil, mis sobiksid õpikutesse soojusvoo määranguteks kasutuskõlbmatute puuraukude näideteks. Temperatuuri gradienti on arvutatud lõikudes, kus vesi voolab ümbritsevates lõhelistes kivimites või piki puurauku ning just nimelt sellist gradienti on peetud esinduslikuks süvasoojusvoo iseloomustamisel.



Joonis 11. Temperatuur ja soojusvoo tihedus (Урбан и др., 1991) Keava puuraugus. Temperatuuri profiil on klassikaline näide piki puurauku ülevalt alla voolavast veest (sisenemiskohad ~70 m ja ~115 m, väljumine puuraugu põhja lähedal), häirimatud temperatuurid on ligikaudselt tähistatud punktiirjoonega. Kuigi hinnanguliselt võiks soojusvoo tihedus olla 25—30 mW/m^2, on Urban jt. lugenud esinduslikuks 5 mW/m^2.

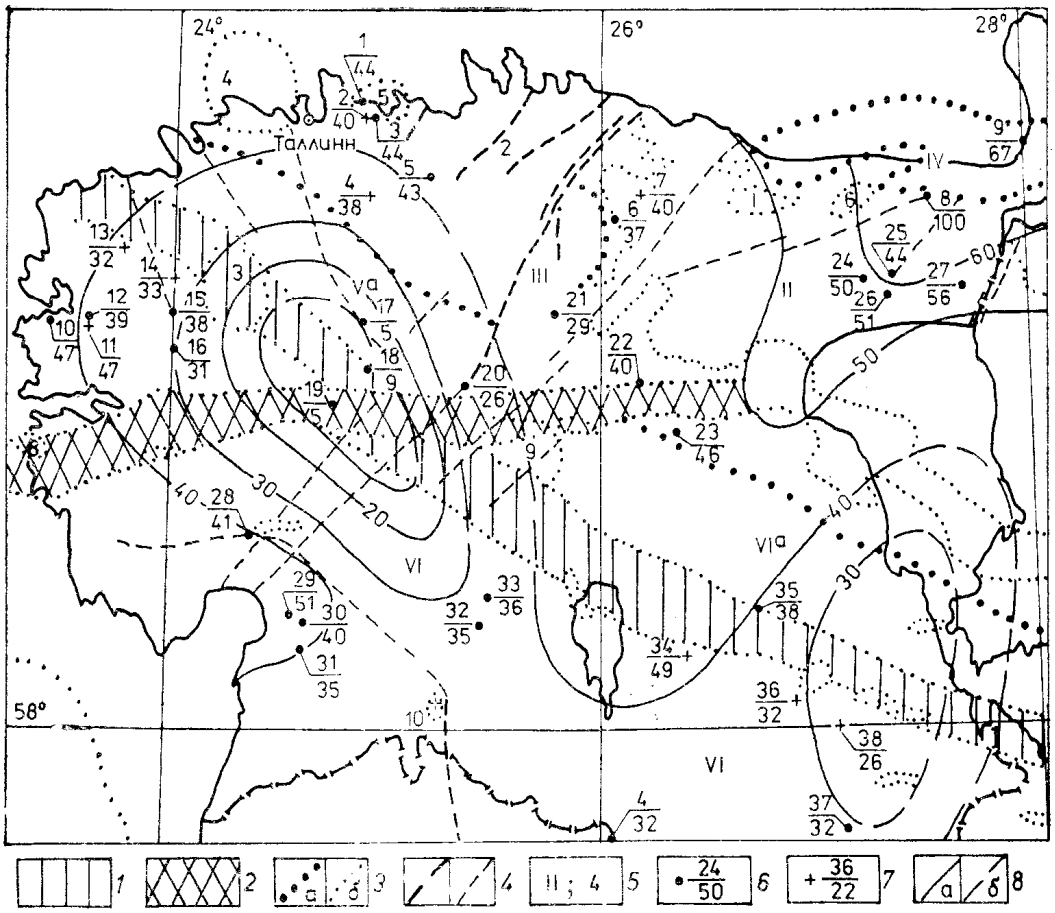
Kliima muutumisest tulenevaid mõjusid hindasid valgevenelased tühisteks (0—5 mW/m^2) ning maapinnalähedast madalat soojusvoogu põhjendati põhjavee voolamisega. Tänapäevases lähenduses on kliima mõju alahinnatud ja vee voolamise mõju ülehinnatud. Järjepidevad ilmavaatlused Tallinnas algasid aastal 1828 ning varsti kahe sajandi pikkuseks saav aegrida näitab enam kui 1 kraadi suurust õhutemperatuuri tõusu, mis toimus kahes etapis — 19. sajandil ja viimastel aastakümnetel. Selline kliima areng on heas kooskõlas soojusvoo andmestikuga. Tuleb tunnistada, et veel tänapäevalgi eirab suurem osa Ida Euroopas riikide geotermikuid kliimamuutuste mõju maasisesele soojusväljale. Valgevenelaste tõlgendus infiltreeruva põhjavee poolt jahutatud läbilõike ülaosast ei pea paika, kuna soojusvoo tihedus on madal nii põhjavee toitealadel kui ka väljavoolu aladel, kuigi viimased peavad peegeldama just kõrgenenud soojusvoogu.

Eesti soojusvoo määrangute suurimaks probleemiks tuleb lugeda puudulikku soojusjuhtivuse andmestikku. Soojusvoo korrektseks määramiseks tuleks ühest ja samast puuraugust mõõta nii temperatuuri kui ka soojusjuhtivust, kuid Eestis on seda tehtud harva, kuna sageli pole puursüdamik säilinud või ei ole soojusjuhtivuse mõõtmiseks esinduslikku proovimaterjali. Tõsi, Eesti settekatte suhteliselt lihtne geoloogiline ehitus võimaldab kasutada naaberpuuraukudest pärinevat materjali. Näiteks lubjakivid on sageli pindalaliselt sarnased ning soojusjuhtivuse mõõtmistulemused on mööndustega ülekantavad samavanuseliste üksuste iseloomustamiseks. Liiva- ja savikivimite kompleksid on kivimiliselt palju muutlikumad. Puursüdamikud kipuvad olema lünklikud, mille tulemusena ei pruugi olemasolev materjal olla kuigi esinduslik. Savikivimid on lõhenenud seibideks või muidu pudistunud, mis ei sobi soojusjuhtivuse mõõtmiseks. Lisaks on suure poorsusega pudedate setendite soojusjuhtivuse mõõtmine tehniliselt keerulisem ja seotud suuremate mõõtmisvigadega. Seetõttu on settekivimite sügavama osa soojusjuhtivus enamasti hinnanguline või vähesel faktilisel materjalil põhinev. Ka Urban jt. tunnistavad, et Kambriumi ja Vendi setendite soojusjuhtivus ei ole piisava detailsusega uuritud. Suuresti soojusjuhtivuse määramatusest tulenevalt võivad samas puuraugus intervalliti määratud soojusvoo tiheduse väärtused erineda enam kuni kaks korda.

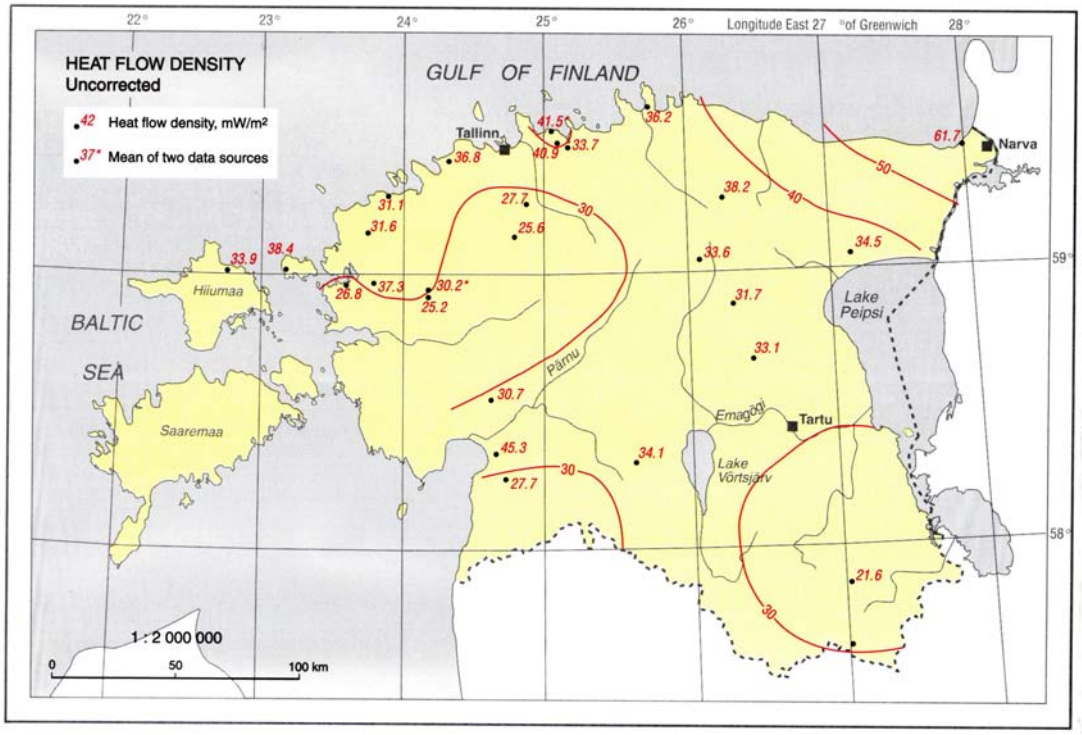
Praegused soojusvoo tiheduse mõõtmised Eestis jäävad vahemikku 25—40 mW/m^2 (Urban jt. (1991, joonis 12) tõlgenduses on soojusvoo tihedus muutlikum, kuid see tuleneb osaliselt eelpool mainitud temperatuuri andmete vääriti tõlgendamisest, osaliselt parandite valikulisest kasutamisest.

Üldisest taustast näib erinevat Eesti kirdenurk, kus mõnes puuraugus on mõõdetud soojusvoo tiheduseks üle 60 mW/m^2. Kõrgem soojusvoog põhineb savikivimites mõõdetud temperatuuri gradiendil ja pigem hinnangulisel soojusjuhtivusel. Urban jt. ei ole täpsustanud kui mitmel mõõtmisel põhinevad nende poolt kasutatud soojusjuhtivuse väärtused (1,3—1,5 W/m/K), kuid need on umbes 20% suuremad kui Põhja-Eesti teiste puuraukude puhul kasutatud samade setendite soojusjuhtivus (1,1—1,3 W/m/K). Samas on näiteks Lontova kihistu savide põhiosa väga ühtlase koostisega ning pindalalised erinevused on vähe tõenäolised. Pigem võiks eeldada vastupidist, kuna läänesuunas kasvab aleuriitsete ja liivakate kihtide osakaal, mille tulemusena peaks ka soojusjuhtivus kasvama.

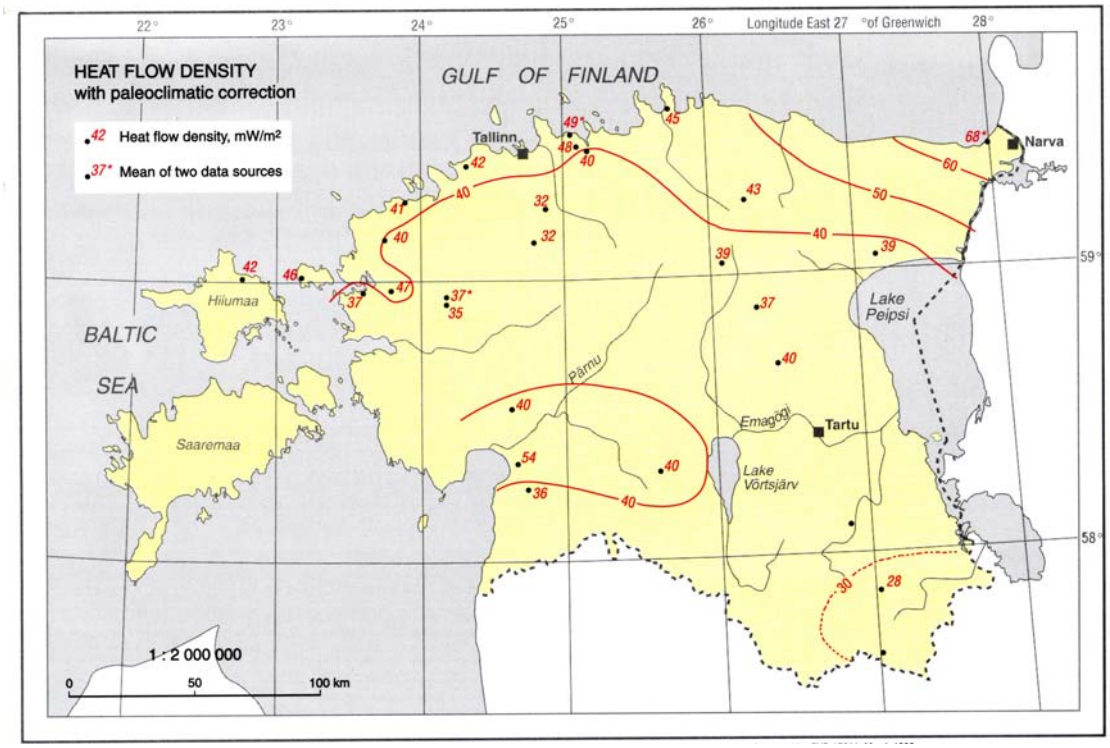
Hoolimata küsitavustest soojusjuhtivuse määrangutes näib Kirde-Eestis olevat soojusvoo tihedus kõrgem kui mujal Eestis (joonised 13, 14). Kaudne andmestik viitab seostele kõrgenenud soojusvoo ja aluskorra Jõhvi vööndi vahel. Nimetatud vöönd jätkub Leningradi oblastis, kus on samuti välja eraldatud soojusvoo anomaalia (Gordienko *et al.*, 1985), mis, tõsi küll, põhineb sama kehval faktilisel materjalil kui Eesti oma. Kohati on kasutatud andmeid ilmajaamadest, kus temperatuure on mõõdetud vaid kolme meetri sügavuseni ja mille puhul on väga raske uskuda, et mõõdetu näitab tasakaalulisi temperatuure. Samad autorid on avaldanud ka mõned Eesti soojusvoo määranguid ja on seejuures demonstreerinud oma nn. kirvemeetodit. Kuivõrd nende soojusjuhtivuse mõõtmistulemused paistavad olevat pigem liiga madalad, siis on põhjust uskuda, et soojusvoo anomaalia Leningradi oblastis tõepoolest eksisteerib ning on võib-olla isegi alahinnatud.



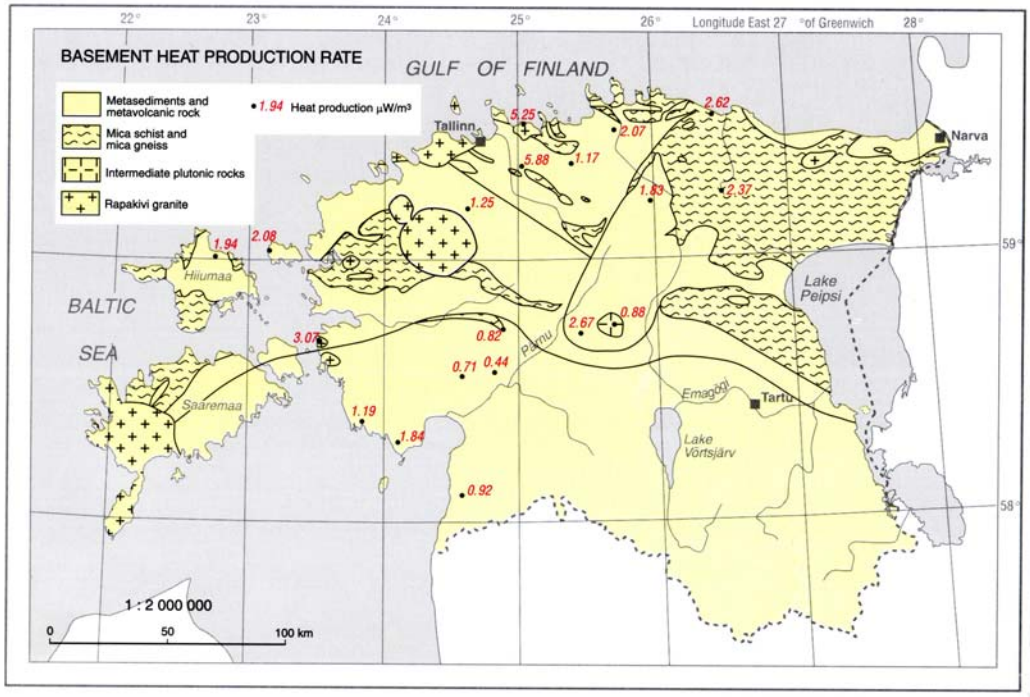
Joonis 12. Urbani jt. (Урбан и др., 1991) tõlgendus Eesti soojusvoost (murrujoone all olevad numbrid). Kesk-Eesti ülimadal soojusvoog (alla 10 mW/m^2) ei ole esinduslik, kuna põhineb kolmel puuraugul, mille sees või mille ümbruses vesi voolab. Andmetes on väga palju subjektiivsust alates sellest, millistes sügavusintervallides määratud soojusvoogu pidada puuraugu jaoks esinduslikuks ning lõpetades sellega, milliste puuraukude tulemustele lisada parandeid ja millistele mitte.



Joonis 13. Konservatiivne vaade mõõdetud soojusvoo tihedusele (Jõeleht, 2002). Joonisel on toodud ainult usaldusväärsed andmed, mille puhul temperatuuri andmestik on olnud kättesaadav ja on olnud võimalik kontrollida vee voolamisega seotud efektide puudumist. Kui Kirde-Eesti välja jätta, siis ülejäänud Eestis on soojusvoo tihedus vahemikus 30—40 mW/m^2.

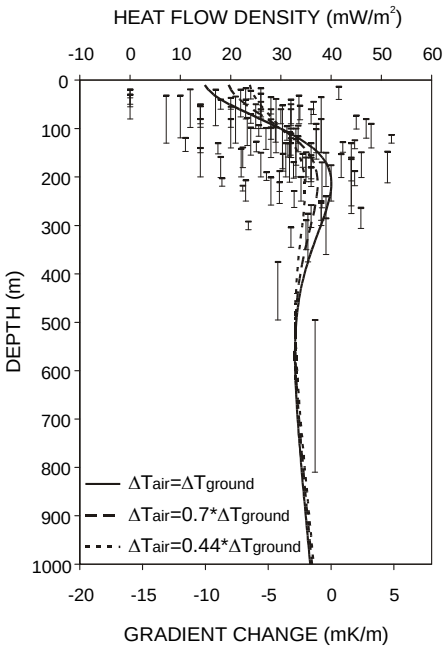


Joonis 14. Mineviku kliimamuutuste mõju suhtes parandatud soojusvoo tihedus, mis peaks paremini kirjeldama sügavamalt tulevat soojusvoogu (Jõeleht, 2002).



Joonis 15. Radiogeenne soojustootlikkus kristalses aluskorras (Jõeleht, 2002) on üldiselt Lääne- ja Lõuna-Eesti kõrgema (granuliitse) moondeastme kivimites väiksem kui Põhja- ja Kirde-Eesti madalama (amfiboliitse) moonde kivimites.

Aluskorra kivimite radiogeense soojustootlikkuse (joonis 15) ja mõõdetud soojusvoo tiheduse vahel ei ole lihtne seoseid leida. Soojustootlikkus peaks peegeldama radioaktiivsete elementide levikut maakoore ülaosas ehk nendes kivimites, kus põhiline osa maapinnani jõudvast soojusest tekitatakse, kuid ühesed seosed nende parameetrite vahel puuduvad. Võib küll üldisemalt tõdeda, et näiteks Lõuna-Eesti granuliitse moonde kivimites on soojustootlikkus väiksem ja samas on ka soojusvoo tiheduse väärtused pigem alla keskmise. Ühest küljest on põhjuseks soojusvoo tiheduse määrangute suhteliselt suur viga, teisest küljest ei ole olemasolev soojustootlikkuse andmestik statistiliselt esinduslik. Aluskorra kivimite soojustootlikkus vajaks siiski täiendavaid uuringuid, et ta muutuks statistiliselt esinduslikumaks ja võimaldaks paremini prognoosida potentsiaalseid kõrgendatud soojusvooga alasid.

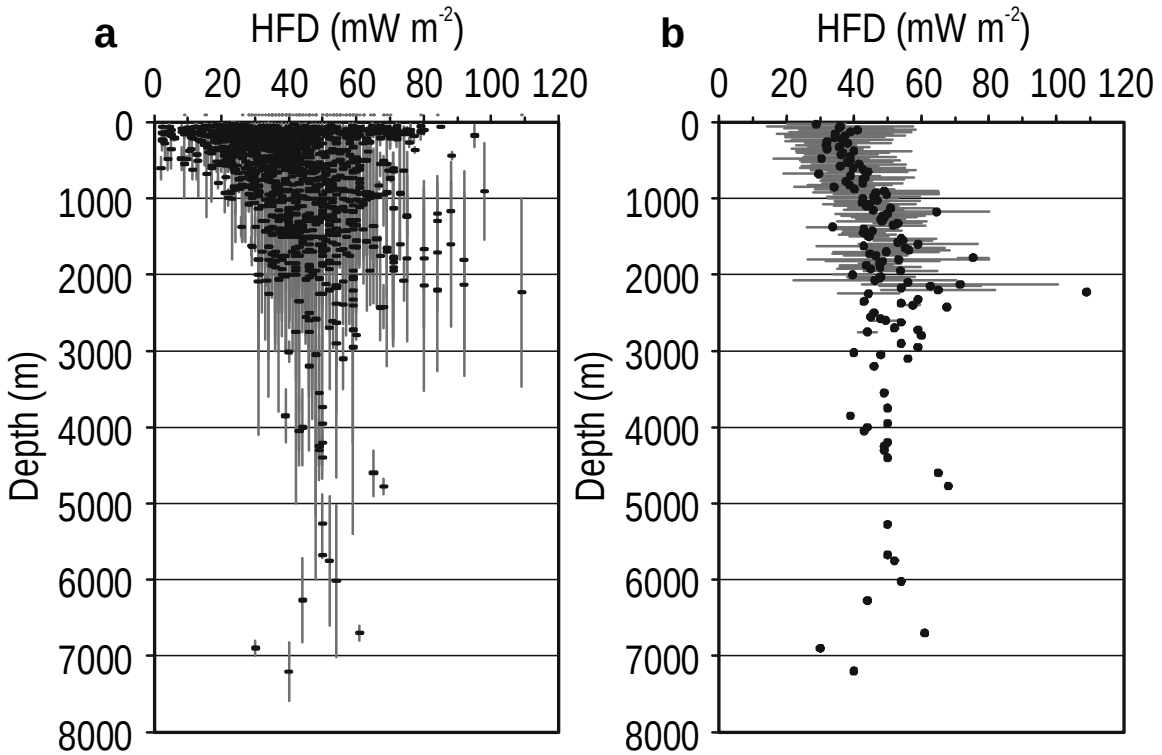


Joonis 16. Eesti soojusvoo (ilma Ida-Virumaata, vertikaalsed jooned) vertikaalne muutlikkus on selgitatav minevikus toimunud maapinna temperatuuri muutustega (kõverjooned) (Jõeleht, 1998).

Parandamata soojusvoo tihedus sõltub sügavusest (joonis 16). Kui Kirde-Eesti andmed välja jätta, siis esimesel sajal meetril on soojusvoo väärtused tüüpiliselt 10—30 mW/m^2, samas kui 200—300 meetri sügavusel on soojusvoog enamasti vahemikus 30—45 mW/m^2. Esimesel sajal meetril esineb harva soojusvoogu üle 40 mW/m^2 ja enam kui 200 m sügavusel ei ole soojusvoog alla 20 mW/m^2. Selliste muutuste taga peab olema protsess, mis hõlmab kogu Eestit ning muutuv kliima on selline protsess, mis suudab tekitada süstemaatilisi muutuseid suurel alal. Tekib küsimus, et kas 30—40 mW/m^2 on ikka esinduslik või on põhjust eeldada jätkuvat tõusu? Eesti andmestikust loomulikult ei saa sellele küsimusele vastust, kuid Põhja-Euroopas on puuritud mitmeid sügavaid puurauke ja termiliste uuringute tulemused näitavad, et soojusvoog ülemisel kilomeetril on umbes 10—15 mW/m^2 väiksem kui kahest kilomeetrist sügavamal. Selliste detailsemalt uuritud puuraukude sekka kuuluvad näiteks Koola puurauk SG3 (12 km sügav) ja KTB Saksamaal (6 km). Siljani puurauk (Gravberg, 6 km) Rootsis oli üks neist vähestest, mida toodi näitena, kus väidetavalt soojusvoo tihedus vertikaalselt ei muutu, kuid ka seal on tegu protsessiga, mis kõrvaldab ülemisel kahel kilomeetril suure soojustootlikkusega kivimites tekitatud soojuse.

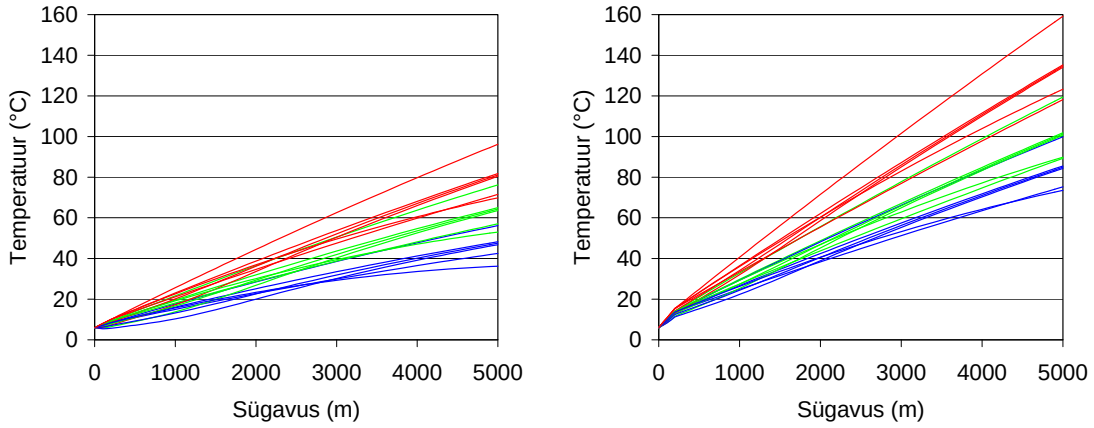
Lisaks detailsemalt uuritud puuraukudele võib sarnast soojusvoo vertikaalset muutlikkust täheldada ka nendes andmetes, kus puuraugu kohta on arvutatud vaid üks „esinduslik“ väärtus. Soojusvoo uurijate üheks peamiseks eesmärgiks on varasematel aegadel olnud häirimatu soojusvoo määramine ning teades, et maapinnalähedane osa on rohkem häiritud, siis esindavad enamasti publitseeritud soojusvoo andmed puuraukude sügavamat osa. Kui võtta Ida-Euroopa platvormi soojusvoo andmestik üle 1300 määranguga, siis hoolimata piirkondlikest variatsioonidest, sisaldub ka nendes andmetes soojusvoo vertikaalne muutlikkus (joonis 17). Maapinnalähedase madalama soojusvoo põhjuseks on peamiselt viimane jääaeg, mille kõige külmemal perioodil oli maapinna temperatuur keskmiselt umbes 8 kraadi praegusest madalam (Kukkonen and Jõeleht, 2003), liustiku servaesistel aladel (Karjala, Poola) isegi külmem. Kuigi klimaatilistes mudelites ja sealt tulenevates

parandites on veel paljugi arenguruumi, võib siiski hinnata, et tasakaaluline soojusvoog on enamikus Eestist 45 ±10 mW/m^2 ja Kirde-Eestis paiguti 60 ±10 mW/m^2.



Joonis 17. Ida-Euroopa platvormi soojusvoo andmestiku (vasakul) sügavussuunaline muutlikkus tuleb selgemalt välja pärast keskmistamist piirkonniti ja sügavusintervalliti (paremal) (Kukkonen and Jõeleht, 2003).

Hinnang suuremas sügavuses olevate temperatuuride kohta sõltub peamiselt soojusvoo tihedusest ning läbilõikes olevate kivimite soojusjuhtivusest. Kliima muutused ja põhjavee voolamine mõjutavad soojusvoogu väikses sügavuses ja sealtkaudu meie hinnaguid, kuid sügavatele temperatuuridele on nende otsene mõju väike. Lähtudes eelmises lõigus toodud häirimatu soojusvoo hinnagutest, võib arvutada võimalikke temperatuurikõveraid iseloomustamaks Eestit üldisemalt ning eristamaks selle taustal Kirde-Eestit (Joonis 18). Erinevad versioonid arvestavad peamiselt soojusvoo variatsioonidega (sinine, roheline, punane), aga lisaks on varieeritud soojusjuhtivuse, soojustootlikkuse ja kliima mõjudega. Kuigi rohelisi kõveraid tuleks pidada kõige tõenäolisemateks variantideks, siis usutavasti esineb Eesti maapõues kogu näidatud temperatuurivahemik.



Joonis 18. Hinnangulised temperatuurid enamikus Eestist (vasakul) ja Kirde-Eestis (paremal). Erinevad mudelid võib jagada madala (sinine), keskmise (roheline) ja kõrge (punane) soojusvooga variantideks.

4. GEOTERMILISE RESSURSI KASUTAMINE MÕNINGATES NAABERMAADES

4.1. Rootsi

Lõuna-Rootsi geoloogiline ehitus on sarnane Eesti maakoore ehitusele, kus kristalsed aluspõhjakivimid on kaetud settekivimitega. Kesk- ja Põhja-Rootsis aga paljanduvad kristalsed kivimid. Geoloogiline ehitus tingib ka erineva lähenemise geotermilistele rakendustele.

Praegusel ajal Rootsis ei ole geotermilisi elektrijaamu. Kuid Maa süvasoojust kasutatakse laialdaselt soojatootmiseks. Lundis töötab munitsipaal-soojuskäitis, mis kasutab süvasoojust umbes 800 m sügavusest puurkaevust ning käivad eeltööd 3,5 km sügavuse puurkaevude süsteemi rajamiseks kuuma vee saamiseks.

Rootsi 100 tuhande elanikuga Lundi linnas annab kaks geotermikal töötavat soojuskäitist (20 ja 27 MW; rajatud 1985-86. a.) 30-40% linna tsentraalsest soojusvõrgust tarbitavast soojusenergiast. Puurkaevudest pumbatakse 800 m sügavuses olevat sooja (20°C) vett. Vee soolsus on 6 mahu% ja gaaside sisaldus 0.06 l/l. Soojuspumpade abil viiakse tarbevesi 77 ^{o}C-ni. Soojusvahetajas algselt kasutatud freoon asendati loodussõbralikuma jahutaja R134a-ga. Protsessis kautatud 1 kWh elektrienergiat annab 3,3 kWh soojusenergiat. Käitis kasutab kompleksis ka teisi “rohelise” energia saamise võtteid.

2002.a. publitseeritud andmete kohaselt kavatsetakse ehitada Lundi 3500 m sügavune kuuma vee kaev. Loodetud vee temperatuur oleks 125 ^{o}C ja aastane soojusenergia toodang 390 GWh. Seda kuuma vett saaks kasutada otse kuumaveevõrgus, aga samuti soojuspumpades soojenduseks ja jahutuseks. On kalkuleeritud nafta/gaasi kokkuhoid ja

CO_2, SO_2 ja NO_x emissiooni vähendamise mahud. 2004. a. algasid ettevalmistused sügavkaevude rajamiseks ka veel Scånes.

2009. aaasta lõpu andmetel on geotermaalenergia kasutamise kogumaht 4 460 MWt. Enamus soojapumpasid varustavad eramajasid sooja ja jahutusega. Installatsioonide arv küünib 230 000-ni, kusjuures aastane kasv jääb 25 tuhande soojuspumba juurde. Suurtest ettevõtetest kasutab näiteks Arlanda lennujaam geotermaalenergiat kütteks ja jahutuseks.

Kogumaht:

140 MWt ja 828 TJ/aastas majade kütte osas;
90 MWt ja 504 TJ/aastas maa-ause energiasalvestuse osas (UTES);
4,230 MWt ja 43,969 TJ/aastas muud geotermaalsed soojuspumba lahendid.

Geotermilise energia rakendusuuringutesse on kaasatud mitmed uurimisasutused ning kirjanduse andmetel intensiivistuvad tööd ka süvapuuraukude kasutuselevõtuks.

4.2. Soome

Soome maapinna moodustavad Fennoskandia kilbi Proterozoikumi ja Arhaikumi vanusega kivimid, mis on kaetud vaid õhukese, kuni 5 m paksuse Kvaternaari setete ja mullakihiga. Geotermaalne gradient jääb tavaliselt 8 ja 15 kraadi vahele kilomeetri kohta. Arvutuste kohaselt on saavutatakse mõnedes kohtades temperatuur kuni 40 kraadi umbes 1-1,5 km sügavusel. Kuid sellised temperatuuri väärtused varieeruvad kahtlemata sõltuvalt geoloogilisest ehitusest ja osad eksperdid seavad sellised kõrged väärtused kahtluse alla. Osaliselt tulenevalt geoloogilisest ehitusest ja osaliselt teiste energiallikate rohkusest hetkel Soomes puuduvad elektrienergiat tootvad ja ka süvakihtidest soojust ammutavad geotermaalsed käitised.

Järjest intensiivsemalt kasutatakse pinnalähedast geotermaalset energiat soojuspumpades. Kui 1999. aasta lõpuks oli Soomes installeeritud umbes 10000 soojuspumpa, siis 2005. aastaks oli soojuspumpade arv tõusnud juba üle 40000, saavutades koguvõimsuse 260 MWt/a ning aastatoodanguks 1 950 TJ (2005). EurObserveri hinnangul on soojuspumpade arv 2008. Aastaks tõusnud 46 400-ni, kuid täpsemad andmed Soome kohta on puudulikud. Eramajapidamistes kasutatavate puuraukude sügavus jääb tavaliselt 80-130 meetri piiridesse.

0,5 MW soojuspumbal põhinev küttesüsteem toimib Forssas (Lõuna-Soome). Jaamas kasutatakse umbes 50 m sügavusel paiknevat põhjavett (temperatuuriga 7 kraadi). On uuritud mahajäetud maa-aluste kaevanduste kasutamist lokaalse küttesüsteemi rakendustes, siiani puuduvad andmed sedatüüpi installatsioonide käivitamise kohta. Ka Soome autorid kurdavad, et puudub korralik statistika geoenergeetilise ressursi kasutamise kohta. Puuduvad andmed süvapuuraukude rakendamisvõimaluste uuringute kohta.

Arvestuslik kogumaht:
Installeeritud 857,9 MWt;
Otsekasutus aastas 8 370 TJ/a

4.3. Taani

Taani maapinna moodustavad erinevad glatsiaalsetted, millede all lasuvad põhiliselt Mesozoikumi kuni Paleozoikumi vanusega settekivimid. Kristalsed kivimid asuvad 2-8 km sügavusel. Geoloogilise ehituse eripärast on tingitud ka praegused geotermaalse ressursi uuringute spetsiifika.

Taanis ei ole geotermilisi elektrijaamu. Sügavate põhjavete soojusenergiat kasutatakse kahes linnas: Tistedis ja Kopenhagenis. Kogu riigis kasutatakse laialdaselt soojuspumpasid pinnalähedase energia ammutamiseks: sh. u. 250 põhjavette rajatud ja 43000 muud seadet annavad u. 3900 TJ aastas.

Jutlandis, Tistedi linnas 1984.a.-st töötavad ja 2001. a. 7 MWt tootlikkuseni laiendatud soojuspumbad annavad aastas 80 TJ soojusenergiat. Kasutatakse 1,25 km sügavusest pumbatud 44°C vett. Kopenhagenis käivitati 2004. a. seadmed merre rajatud üle 2 km sügavuste puuraukude baasil 73°C vee kasutamiseks. Taani geotermilised käitised ammutavad kuuma sooladerikast vett paksudes settekivimilasundis lasuvatest poorsetest kivimikihtidest. Uurningud käivad Sonderborgi ja Hjorringi piirkondade lähedal. Olemasolevaid jaamu kavatsetakse laiendada. Arvutuslikult on maal installeeritud umbes 20 tuhat vertikaalset süsteemi kasutavat soojuspumpa.

Taani on pakkunud oma geotermika-alast teadmist, mis vähemalt osalt tuleneb Islandi kogemustest, ja majanduslikku abi Ida-Euroopa taasvabanenud riikide (Poola, Leedu) geotermika-alaste uuringute ja rakenduste arendamiseks.

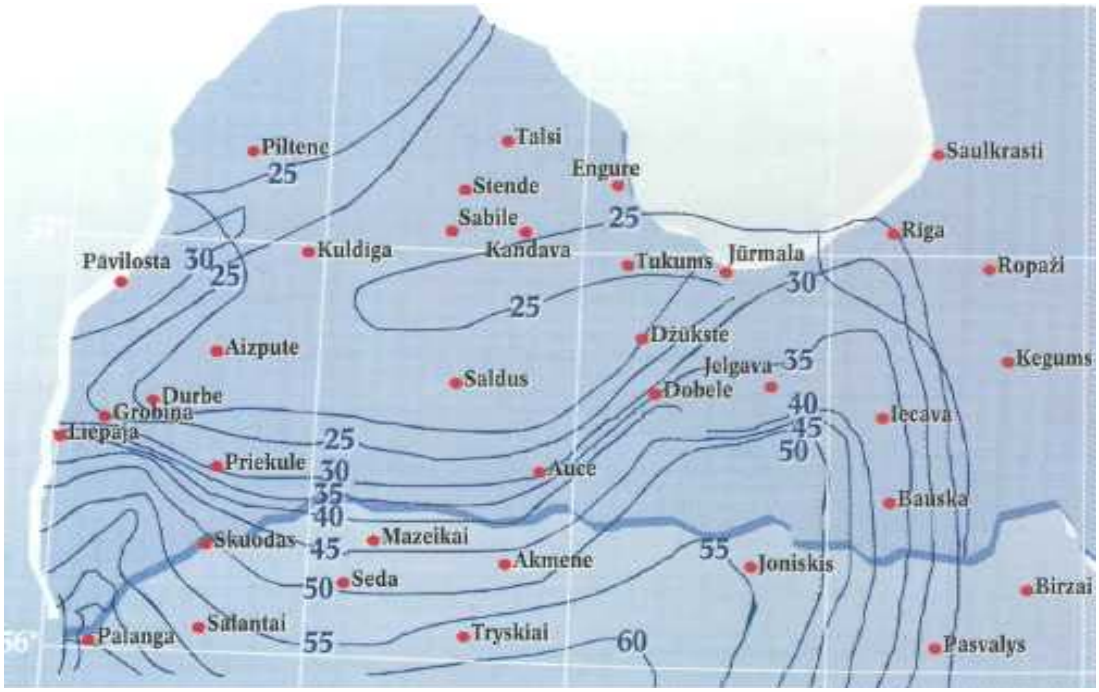
Arvestuslik kogumaht:
Summaarne maht 200 MWt;
Otsene kasutus 2500 TJ/aastas

4.4. Läti

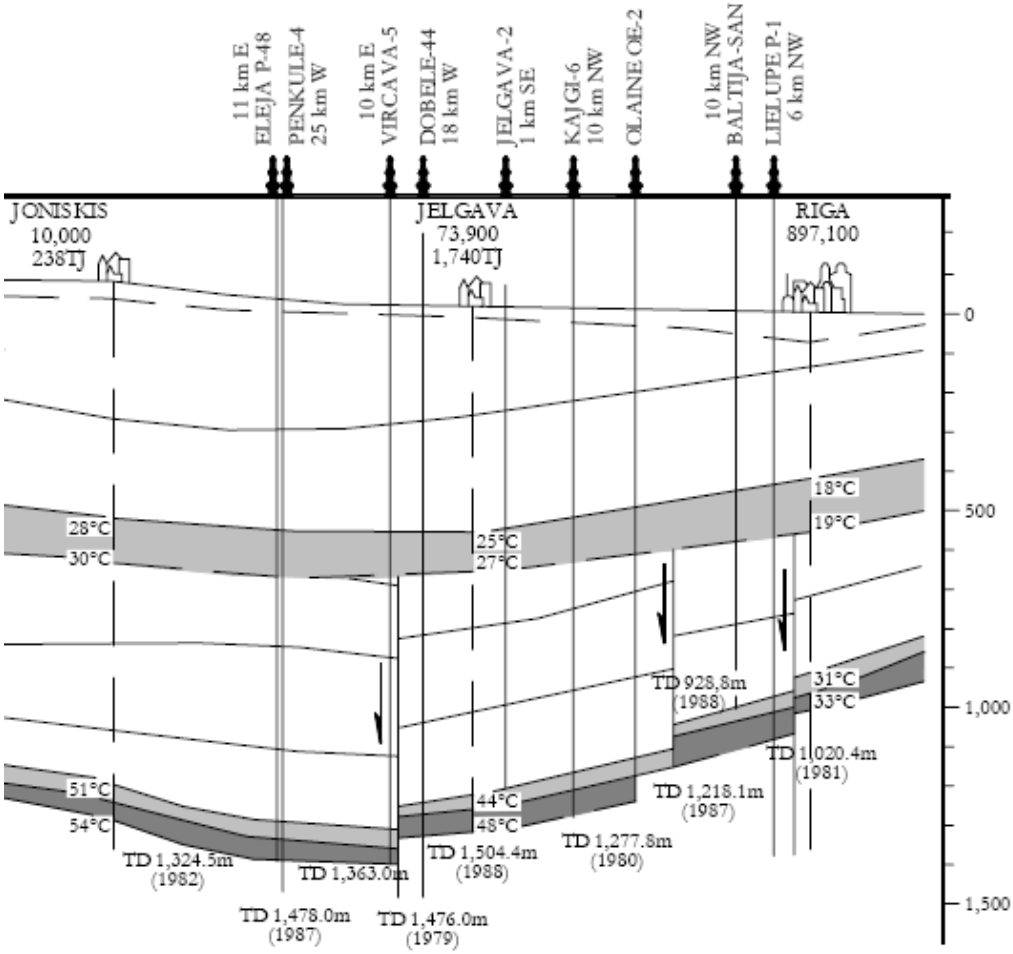
Läti maapinda katvate glatsiaalsete setete (sarnaselt Eestile moreenid, liivad jm.) all lasuvad põhiliselt Paleozoikumi vanusega settekivimid, millede paksus ulatub kuni 2 kilomeetrini. Seega on Lätis Paleozoikumi settekivimite paksus mitmeid kordi suurem kui Eestis.

Sarnaselt Leedule on Lätis praegune geotermaalse energia huvi seotud soojade vetega settekatte Kesk- ja Alam-Devoni (maksimaalne temperatuur 30°C,) ja Kambriumi (maksimaalne temperatuur 65°C) veekihtides sügavustes 850-1730 m, Edela-, Lääne ja Kesk-Lätis (vaata ka joonised 19, 20). Edela-Lätis asub teadaolev geotermaalne anomaalia. Huvipakkuvad on Ala-Devoni ja Kambriumi kuumad veed, mida on teada 12 tuhande ruutkilomeetri suurusel alal ja millede sügavused jäävad 900 ja 1800 m piiridesse.

Lätis hinnatakse geotermilise energia osatähtsust 2020. aastaks samaks või veidi suuremaks kui turbal, väikestel hüdrojaamadel, tuulest, Päikesest, aga <100 korda väiksemaks kui biomassil. On kavasid geotermilise energia rakendamiseks Dobele ja Liepaja linnades. Loodud on Lätit haarav geotermaalne andmebaas. Andmed puuduvad kristalsete kivimite temperatuuride kohta.



Joonis 19. Näide põhjavete temperatuuri pindalalisest jaotusest Lätis.



Joonis 20. Näide põhjavete temperatuuri vertikaaljaotusest Lätis.

4.5. Leedu

Leedu geoloogiline ehitus erineb Läti ja Eesti ehitusest, seda eeskätt settekompleksi paksuse ja lamamissügavuse poolest. Mitmete parameetrite poolest on Leedu settekompleksi geotermaalsed veed sarnased Läti omadele.

Andmed Leedu geotermiliste tingimuste kohta saadi eelkõige naftaotsingute puuraukudest. 1988. a. pandi kokku ülevaade geotermaalsete põhjavete kohta ning juba 2000. a. alustati Taani ja Maailmapanga abiga 41 MW võimsusega geotermaalse „demonstratsioon“-ettevõtte ehitamist Klaipedas. Esialgse otsuse selle rajamiseks võttis Taani Keskkonnaagentuur vastu juba 1992. aastal. Näitena on esitatud Kalipeda „demonstratsiooni“ geotermilise rajatise rajamiskulud (tabel 1).

Tabel 1 Klaipeda „demonstratsiooni“ geotermilise rajatise rajamiskulud (World Bank: Report, Document No. 26174).

Component	Appraisal Estimate US$ million	Actual/ Latest Estimate (1) US$ million	Percentage of Appraisal
Investment Component	**12.59**	**14.21**	113
Drilling Operation	1.91	2.7	141
Completion of Wells	0.69	0.6	87
Control and Evaluation of Drilling Operations	0.15	0.4	267
New Injection Well*	0	1.45	
Cleanup of Injection Well Filters*	0	0.37	
Spare Motor for Second Production Well*	0	0.11	
Brine Pumps - Submersible and Injection Pumps*	0	0.97	
Building and Civil Works	0.52	1.6	308
Connection to Boiler House and External Pipeline	0.73	0.45	62
Geothermal Flowline to New Injection Well*	0	0.25	
Heat Exchangers for Absorption Heat Pumps	0.71	0	0
Absorption Heat Pumps	6.34	1.97	31
Hot Water Boilers for Driving Heat*	0	1.04	
Heat Exchangers and Economizers for Boilers*	0	0.53	
Heat Accumulation Tank*	0	0.12	
Circulation Pumps (district loop and heat accumulator)*	0	0.09	
Local Design of Buildings and Flowline**	0	0.09	
Sewage Tanks and Pipeline*	0	0.12	
Filters, Valves and Internal Piping	0.82	0.71	87
Power, Control and Regulation	0.72	0.64	89
Technical Assistance and Training	**2.26**	**2.55**	**113**
Project Implementation Support	**0.24**	**0.09**	**38**
TOTAL BASELINE COST	**15.09**	**16.85**	**112**
Physical Contingencies	0.75		
Price Contingencies	1.78		
TOTAL PROJECT COST	**17.62**	**16.85**	**96**
Interest during construction	0.4	0.4	
TOTAL FINANCING REQUIRED	**18.02**	**17.25**	**96**

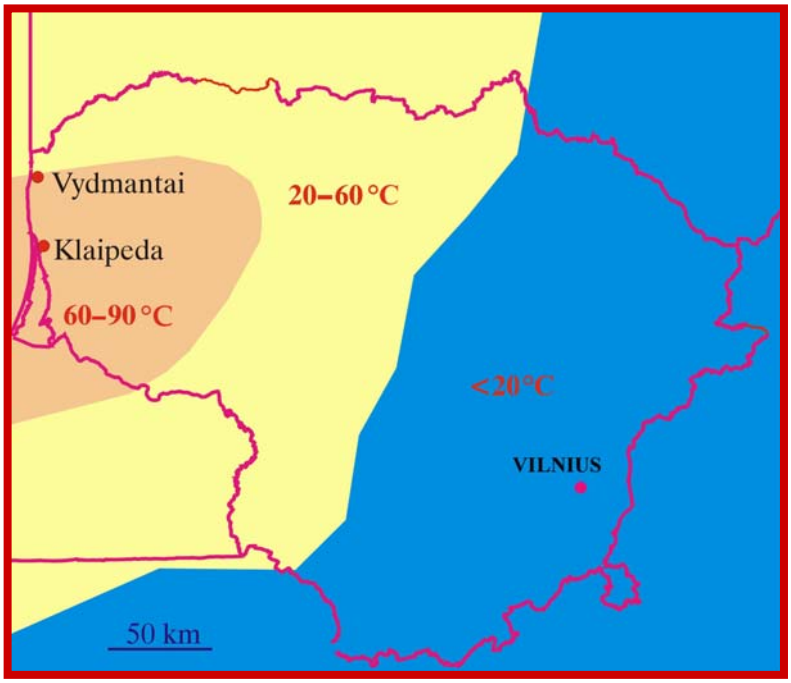
Aluspõhja geotermaalsed ressursid Klaipeda piirkonnas peituvad sügavamates settekivimikihtides (vt. ka joonis 21). Settekatte kogupaksus on seal üle 2,3 km, suurim kolme Balti riigi territooriumil. Madalaim, umbes 600-800 m sügavusel, on 170-200 m paksune Ülem- ja Kesk-Devoni üksikute 1-25 m paksuste veekihtidega soojaveelasund. 925-1125 m sügavusel lasub Kesk- ja Alam-Devon, kus üksikute veekihtide vee temperatuur ulatub 40-50°C ja soolsus on 20-110 g/l. Nendesse kihtidesse on rajatud Klaipeda demonstratsioonijaama kuumaveehaare, milles on kaks tootmiskaevu ja kaks injektsioonikaevu, mille sügavused on 1128-1228 m piires. Ülespumbatava vee temperatuur on 38 ^{o}C.

See suunatakse kasutamiseks Klaipeda soojusvõrku (kasutatakse absorptsiooni soojuspumpasid). Probleemiks kujunes soolsusest tingitud torude täitumine kipsiga, mistõttu pidurdus ka kokku 41 MW soojusenergiat andva käitise ametlik üleandmine soojusvõrgule. 2002. a. toodeti 189000 MWh soojusenergiat.

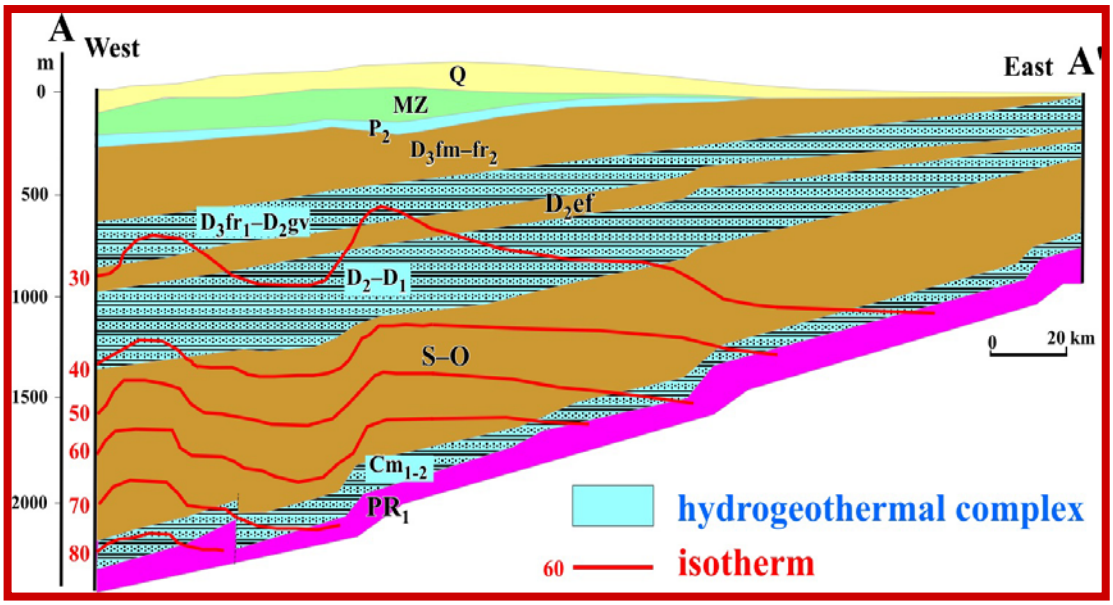
Saksa firma Geothermie Neubrandenburg on ette valmistanud geotermaalse jaama projekti Vilkaviskis. Kavandatav jaam kasutab 49 kraadist vett (umbes 150m^3/h), saavutades keskmise võimsuse 6,1 MW ning peaks kindlustama 41000 MWh/aastas kohalikku soojussüsteemi. Jaama kompressioonilised soojuspumbad kasutavad elektrienergiat (koondvõimsus 30 MW). Jaama hinnaks on planeeritud 5,6 miljonit USD.

Umbes 2000-2400 m sügavusel Lääne-Leedus lasuva Alam-Kambriumi veekihtides on naftapuuraukudes mõõdetud temperatuure, mis ulatuvad 40-90°C-ni ja soolsuseks on saadud 100-200 g/l. Praktilistest sammudest selle soojusressursi kasutamiseks ei ole teateid. Aluskorra kuivades kristalsetes kivimites oletatakse temperatuure 150-180 ^{o}C umbes 4-5 km sügavusel. Leedus on töös või lõpetatud enam kui 20 geotermilise ala uuringu.

Kokkuvõtlikult võib öelda, et Leedu näeb edasisi perspektiive geotermilise energia kasutamiseks settekivimite hüdrotermaalsetes vetes Lääne-Leedus, eelkõige Klaipeda piirkonnas. Võimalikuks peetakse soojuse tootmist Kambriumi liivakividest u 2250-2340 m sügavusest, kus vesi on 80-86 ^{o}C ja soolsus kuni 200 g/l. Aluskorra kuumades kuivades kivimites 4-5 km sügavusel oodatakse temperatuure 150-180 ^{o}C, ja seda peetakse võimalikuks kasutada ka elektritootmises.



Joonis 21. Põhimõtteline Leedu territooriumi geotermaalne rajoneerimine. Lääne-Leedu osa paistab silma kõrgendatud põhjavee temperatuuride poolest.



Joonis 22. Põhimõtteline ida-läänesuunaline läbilõige Leedu territooriumist. Sinisega on näidatud põhjaveekompleksid, punane joon näitab isoterme ehk temperatuuriväärtusi vastavates kihtides.

Kokkuvõttes võib öelda, et lähinaaberriikides ei kasutata geotermaalenergiat elektritootmiseks, kuid põhjamaades on kasutusel arvukalt maasoojuspumpasid. Ka Eestis on arvestuslikult installeeritud umbes 8000 maasoojuspumpa, mis enamasti kasutavad horisontaalseid kontuure. Väga vähe on Eestis kasutusel vertikaalse elemendiga soojuspumpasid, mere ja järve soojust on kasutatud marginaalselt. Rootsi kogemustest vääriks üle võtmist vertikaalsete elementidega maasoojussüsteemid, samuti ka soojuse akumulatsioonimehanismid. Leedu kogemustest vajab esiletõstmist soojuspuurkaevude kasutamine. Viimane vajaks kindlasti täiendavaid uuringuid, seda eriti vee tagasijuhtimise mehanismide osas.

5. MUUD KOGEMUSED GEOTERMILISE ENERGIA RAKENDAMISEL

Tihti kasutatakse geotermaalenergiat elektritootmiseks. Sel juhul peaks saadava vee temperatuur ületama 100 kraadi (praeguse tehnoloogia juures). Saja kraadist põhjavett on aga keeruline leida või ei vasta saadava vee maht vajalikele parameetritele. Regioonid, kus põhjavee temperatuur ei ületa paarikümmet kraadi, on mõistlik rajada sügavamad puurkaevud, reeglina kuuma kivimisse. Sel juhul tuleb luua maasügavusse reservuaar, eeskätt ümbriskivimit lõheliseks muutes ning pumbata reservuaari vett. Nimetatud tehnoloogiat nimetatakse Hot Fractured Rock technology (HFRt) – Kuuma Lõhestatud Kivi (KLK) tehnoloogiaks. Samuti kasutatakse mõistet EGS – enhanced geothermal systems.

Näiteks varustab Birdsville'i, NSW Queenslandi väikelinna kogu vajaliku (eriti jahutamiseks!) elektrienergiaga 1992. a. rajatud ja hiljem moderniseeritud elektrijaam nominaal-võimsusega 150 kW, mis kasutab 1200 m sügavuse kaevu 98 kraadist vett. Meie seisukohast on erilist huvi pakkuv uus paljutõotav Hot Fractured Rock technology (HFRt) – Kuuma Lõhestatud Kivi (KLK) tehnoloogia kasutamise projekt, mida on kaugele arendatud Lõuna-Austraalia osariigis, Cooperi Basseinis. Seda arendab Brisbane´i firma Geodynamics.

Seda katselist projekti arendatakse kahe firma majanduslikus koostöös, mille taga on ka suur riiklik ja Briti Rahvaste Ühenduse rahastamisfondide toetus tööstuse heitsoojuse ja geotermaalse energia kasutamise efektiivsele, kõrgtemperatuuriliste auruturbiinide (nn. Kalina Tsükli) projektile, selleks, et vähendada riigi sõltuvust fossiilsetest kütustest, täita riiklikke eesmärke taastuvate energiaressursside rakendamisel ja CO_2 jm. kahjuliku emissiooni vähendamisel. Projektil on ka suur populaarsus paljude investeerijate hulgas (Austraalias üle 6000 aktsionäri) ning nii kogutud algkapital ning fondide heldus kindlustab projekti rahastamist.

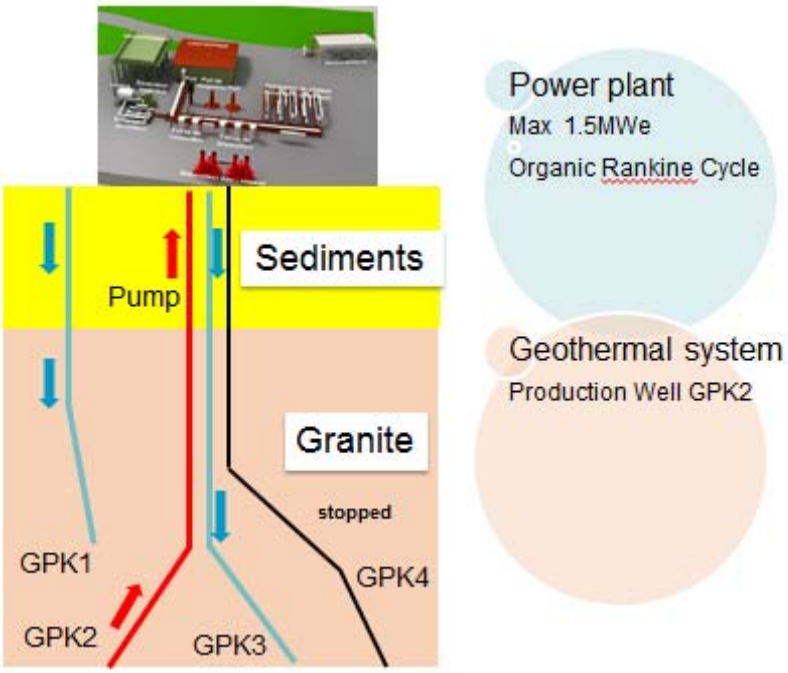
Projekti õnnestumisele aitavad kaasa ülisoodsad, välja arvatud asukoht keset kõrbe, looduslikud tingimused ja tehnoloogilised õnnestumised:

- globaalselt esimese suurusjärgu geotermaalne anomaalia, mida on leitud väljaspool vulkaanilisi alasid;
- erakordselt suur radioaktiivset soojust tootev graniitne keha: 3870 m-st sügavamal enam kui 1 km paksune, temperatuuriga üle 250 ^{o}C;
- graniidimassiivi keskosa loodetust palju efektiivsem purunemine hüdraulilise stimulatsiooni (sisse pumbatud vedeliku kiire jahutamisefekti) toimel, hüdraulilise sideme loomine kahe 500 m kaugusel paikneva puuraugu vahel ning loodetust palju suurema lõhestatud kõrge poorsuse ja hea veejuhtivusega kivimikeha – kunstliku soojusvahetuse reservuaari - loomine;
- graniidimassiivi alumises osas teise lõhelise reservuaari loomine hiiglasliku poorimahuga 11 miljonit kuupmeetrit;
- graniidimassiivi põhjas veel täiendava rõhtsa loodusliku lõhevööndi esinemine, mis kõik koos loob eeldusi mitmekorruselise soojusvahetuse reservuaari loomiseks;
- suletud süsteemis kasutamiseks piisava põhjaveehulga avastamine geoloogilises läbilõikes välistamaks kaugelt veevedu kõrbesse;
- kahjulike komponentide madal sisaldus tsrikulatsioonivees.

Samuti on nimetatud tehnoloogiliste lahenduste uuringud aktiivsed viimasel kahel kümnendil Prantsusmaal, kus on jõudnud katsekäitise ehitamise ja käivitamise järku Soultz-sous-Forêts's ettevõte. Katsepolügoni valikul lähtuti Rheini Grabeni (Alangu) piirkonna geotermaalsest anomaaliast. Kuumad kivimid – kristalne aluskord, milles on kõrge graniitide osakaal – on kaetud 1,4 km paksuse kobedate poorsete settekivimite kattega. Energia ammutamiseks pakuvad huvi puuraukudega avatud kristased kivimid 3,5-5 km sügavusel, kus nende temperatuur on vastavalt 160 ^{o}C ja 200 ^{o}C. (http://www.soultz.net/version-en.htm).

Tööde graafik, mis ühtlasi demonstreerib taoliste programmide metodoloogilisi arenguid, on esitatud järgnevalt:

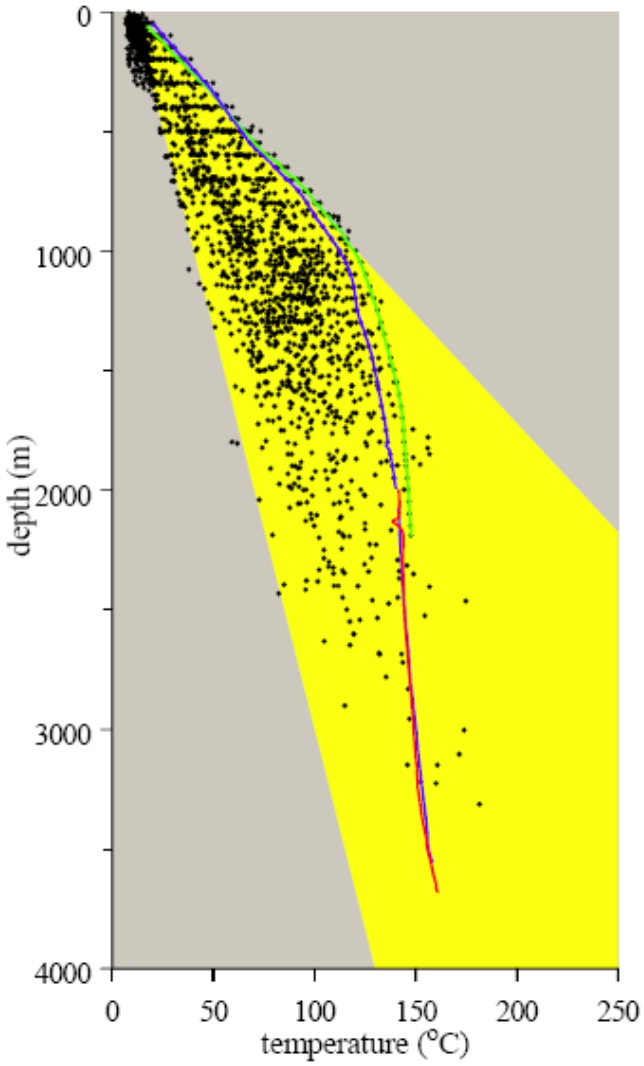
- 1987: GPK-1 (Geotermaalse energia otsingupuurauk No1) puuriti kuni 2002 m sügavusele; T= u. 140 ^{o}C;
- 1992: GPK-1 – süvendatud 3590 m sügavusele, T= 160 ^{o}C;
- 1993-1994: katse- ja uurimistööd;
- 1995: GPK-2 puuritud 3876m, T= u.160 ^{o}C;
- 1995: madala reservuaari esimene stimuleerimine umbes 2700-3200 m sügavusel (kivimikeha lõhestamine lahuste sissepumpamisega);
- 1996: reservuaari teine stimuleerimine, maailmas suurima(!) Hot Fractured Rock (HRF) – Kuuma Lõhestatud Kivimi (KLK) - reservuaari loomine;
- 1997: 4 kuud kestnud tsirkualtsiooni-proov kahe 500 m kaugusel asuva puuraugu vahel loodud KLK reservuaari kaudu;
- 1999: GPK-2 süvendamine 5000 m sügavuseni; T=200 ^{o}C;
- 2000: GPK-2 stimuleerimmine, sügava (kuni 5000 m) lõhestatud reservuaari loomine; mikroseismiline monitooring reservuaari kontuuride ja sisestruktuuri määramiseks;
- 2003: GPK-3 – 650 m kaugusel eelmistest, injektsiooni puurauk 5000 m(?), põhja T=200,6 ^{o}C;
- 2003 – 2008 injektsioonikatsed ja reservuaari arendamine laiemaks ja poorsemaks;
- 2008-2001 tsikrulatsioonitestid, uute katseseadmete käivitamised.



Joonsi 23. Soultz'i ettevõtte kontseptsioon koos külma ja sooja vee puuraukudega ning tsirkulatsioonipumbaga GPK-2 puuraugus 260 m sügavusel.

5.1 Ülevaade Soultz-sous-Forêts' piirkonna geoloogiast ja geotermikast

Pribnow ja Clauser (2000) ja seda täiendavatest viimastest puurimistulemustest nähtub, et Rheini Grabeni läänetiiva all on 5 km sügavusel kivimite temperatuur 200 ^{o}C (vt. joonis 24). Seega, üldine geotermiline gradient alal on 40 ^{o}C/km. Pribnow ja Clauser (2000) aruandest ilmneb, et geotermilised puuraugud on rajatud murranguvööndisse, mis on lokaalseks põhjavee väljavoolualaks. Põhjavee voolamine on küllaltki komplitseeritud hõlmates nii toitumist Reini oru ümbruse mägedest (Vosges ja Schwarzwald) kui ka vaba konvektsiooni grabenit täitvates setendites. Soultzi ümbruses on tänu tõusvale põhjaveele 1 km sügavusel tõuseb temperatuur umbes 120 ^{o}C-ni ja edasine temperatuuri tõus sügavuse suunas aeglustub ning juba 3 km sügavusel ei ole puuraukudes mõõdetud temperatuur kõrgem kui 150 ^{o}C, mis on sarnane ümbruskonnas esinevale temperatuurile.



Joonis 24. Rheini Grabeni (punktid) ja Soultzi (jooned) puuraukude mõõdetud kivimite temperatuurid. Näha on, et puuraukude temperatuurid varieeruvad suurtes piirides. Näha on ka mõõdetud temperatuuriväärtuste kasv kuni umbes 1500 m sügavuseni ja selle aeglasem kasv peale seda sügavust.

Peab ettevaatusega suhtuma maapinna lähedases osas määratud soojusvoo anomaalia (140 mW/m^2) väärtustesse. Geotermaalse käitise töösügavused on valitud umbes 4-5 km sügavusse, kus nad kasutavad ära piirkondlikku soojusvoogu (80 mW/m^2) ja põhjavee poolt kokku kantud täiendavat soojust. Seega võivad põhjavee väljavoolualad olla soodsatel tingimustel perspektiivsed ka teistel aladel, kuna seal kantakse soojust maapinnale lähemale.

6. EESTI OMAPÄRA JA VÕIMALIKUD LAHENDUSED

Toetudes olemasolevale geofüüsikalisele, petroloogilis-mineraloogilisele, struktuurigeoloogilisele ja vahetule temperatuuride mõõtmise andmestikule saab teha küll üldisi järeldusi, kuid detailsemas plaanis antud andmestiku rakendamine Eesti maapõue geotermaalse ressursi prognoosimisel on raskendatud.

Põhilised kitsaskohad viimaste aastakümnete uuringutes ja tulemuste interpreteerimisel oleksid järgmised:

1. Olemasolevad puuraugud on usaldusväärselt soojusvoo tiheduse määramiseks enamasti liiga madalad (kuni 100—200 m) ja alluvad seega välistele perioodilistele ja mitteperioodilistele mõjutustele. Paljudel juhtudel raskendab kordusmõõtmiste tegemist puuraukude asukoha ebatäpne info, selle hävimine inimtegevuse või teistel põhjustel või selle seisund, mis füüsiliselt ei lase mõõtmisi läbi viia (ummistunud jm.).

2. Eesti maapõue pindalalise temperatuuri jaotumise hinnangut ei luba piisaval täpsusel läbi viia puuraukude ebaühtlane jaotus; Edela- ja Lõuna-Eestis teostatud mõõtmisi on liiga vähe temperatuurijaotuste ja -anomaaliate hindamiseks. Samas on ka puuraukudes teostatud varasemad mõõtmised tihti liiga suure intervalliga.

3. Saadud mõõtmiste tõlgendamisel ilmnes mitmeid erinevusi eri töögruppide puhul (Valgevene, Eesti). Tihti on algandmestik hävinud või ei ole otseselt kasutatav, ning uurija peab lähtuma juba töödeldud andmestikust. Peamised tõlgendamisest tulenevad erinevused ilmnevad situatsioonides, kus mõõtjate poolt pole ära tuntud puurauku pidi voolavat vett. Tihti pole arvestatud regionaalseid ja lokaalseid maapinna temperatuuri muutusi. Paljudel juhtudel on tehtud arvutused ilma konkreetsete kivimite soojusjuhtivuse detailsete uuringuteta.

Praeguses situatsioonis edasiminekuks oleks eeskätt vaja: (1) jätkata madalate puuraukude mõõtmisi ning nende baasil luua Eesti maapõue ülemise osa 50-250 m temperatuurijaotuse mudel, mis arvestaks kivimilisi ja põhjavee filtratsioonilisi eripärasid;
(2) rajada 1-4 sügavpuurauku sügavusega vahemiksu 1000 kuni 2500 meetrit hindamaks maapõue sügavamaid temperatuure, geotermilist gradienti ning muid seonduvaid parameetreid.

Ülemise maakoore soojustootlikuse/juhtivuse täpsustamiseks tuleks läbi viia uuringuid Alam-Paleozoikumi settekivimites. Tuleks täpsustada settekatte termilisi omadusi ja soojusvoo tihedust läbilõike pinnalähedases osas. Selleks tuleks:

1) Uurida Kambriumi ja Vendi setendite soojusjuhtivust peamiselt paljandite materjali põhjal. Põhja-Eestis on mitmeid karjääre, kus saab süstemaatiliselt uurida Lontova sinisavi ja tema peale jäävate liivakivide soojusjuhtivust.

2) Olemasolevate sügavate põhjavee vaatluskaevude korrastamine koostöös näiteks Eesti Geoloogiakeskusega ning seejärel nendes temperatuuri mõõtmiste läbiviimine. Vaatluskaevud on sageli sügavamas osas liiva täis jooksnud või on ülemisse otsa kive sisse loobitud. Sobilike puuraukude leidumisel võiks kaaluda nende sügavamaks puurimist, et nad ulatuksid 300—500 m kristalsesse aluskorda.

3) Teha täiendavaid temperatuuri mõõtmisi konserveeritud ja mittekasutatavates puurkaevudes. Selliseid puurauke ei pruugi olla palju ja nende kasutamine vajab ilmselt kokkuleppeid puurkaevude omanikega.

On selge, et tulevikuperspektiivis on vaja lisaks kütte/jahutusvee potentsiaalile anda hinnang ka võimalikule elektritootmise perspektiivile süvapuuraukude baasil. Vajadus mõlemat tüüpi uuringuteks on selgelt välja öeldud mitmes EL direktiivis aastatel 2011-2012.

Kui esimese ülesande – ülemise maakoore osa geotermaalse mudeli loomine eeldab rohkeid mõõtmisi vanades ja uuemates madalates puuraukudes, andmestiku detailset arvutitöötlust, siis süvaperspektiivi hindamine vajab eeskätt uute süvapuuraukude puurimist.

6.1 Vajadus süvageotermaalseteks uuringuteks

Põhiline järeldus olemasolevate andmete sünteesist viitab sellele, et kõrgematemperatuurist geotermilist ressurssi rakendada ei ole võimalik meie aluspõhjakihtides oleva põhjavee baasil, kuna veetemperatuurid ei ületa 10-16 kraadi (loomulikult on võimalik kasutada energiat soojuspumpade abil). See on ka suurimaks erinevuseks Läti ja Leedu situatsioonidest, kus Ordoviitsiumi ja Kambriumi veelademete veetemperatuurid ulatuvad tihti üle 30 kraadi. Teiselt poolt on selge, et energiatootmise rikastamiseks on vaja erinevaid tootmisviise ning Euroopaski on suunatud viimastel aastatel uuringufookus elektritootmisele süvapuuraukude abil. Selline tootmisviis eeldab kristalse kivimi lõhustamist maapõues ning vee pumpamist.

Ka Eestis võib suurema geotermaalse käitise jaoks huvi pakkuda vaid maakoore süvakihtide soojusenergia, see on umbes 3-6 km sügavusel lasuvad kristalsed aluskorrakivimid. Hetkel puuduvad andmed võimalike temperatuuride kohta nimetatud sügavustel. Maailmakogemused näitavad, et sarnaseid lahendusi on maailmas (Kesk-Euroopa, Austraalia, USA) edukalt rakendatud. Inglise keeles nimetatud Hot Dry Rocks (HDR) – Kuumad Kuivad Kivimid (KKK), või teise nimega Hot Fractured Rocks (HFR) – Kuumad Lõhelised Kivimid (KLK) arendatakse edukalt mitmetes riikides. Selle tehnoloogia põhiprintsiip on lihtne: kuumadesse, puurauguga avatud kivimitesse pumbatakse külma lahust ning luuakse hüdraulilise injektsiooniga lõhelis-poorsed soojusvahetus-reservuaarid (EGS tehnika).

Eesti maasisene soojusväli on häiritud. Kuni mõnesaja meetri sügavuseni on mõjutavaid tegureid päris palju (näiteks tänapäevased kliima muutused, jääaegade mõju, maakasutuse muutused, põhjavee tsirkulatsioon) ja häired on suured. Sügavamal kui pool kilomeetrit on peamiseks soojusvoogu häirivaks teguriks pikaajalised kliimamuutused (jääaegade jahutav mõju). Nii pikaajaliste kui ka tänapäevaste kliimamuutuste tulemusena on väikses sügavuses soojusvoo tihedus oluliselt vähenenud.

Süvatemperatuuride ennustamisel on soojusvoo tihedus olulisemaid parameetreid ja selle tõttu tema korrektne määramine hädavajalik. Pikaajaliste kliimamuutuste ja põhjavee filtratsiooni mõju on võimalik arvesse võtta, kuid lokaalsed efektid nagu näiteks maakasutuse muutumisest tulenevad maapinna temperatuuri muutused võivad põhjustada suuri häireid, mis on raskesti hinnatavad. Kuigi sügavamal omavad lokaalsed efektid

väiksemat mõju temperatuuridele, siis hetkel saavad ennustused põhineda vaid ebakindlatel soojusvoo tiheduse määrangutel.

Samas peab märkima, et geotermilised anomaaliad pinnalähedastes veekihtides Leedus, Lätis ja ehk ka Eestis viitavad kõrgemate temperatuuridega kivimmasside olemasolule aluskorras, kuid nähtavasti olemasolevad andmed Eesti kohta ei võimalda pindalaliselt selliseid kohti seni täpsemalt lokaliseerida. Settekatte veekihtide kõrgeim anomaalne temperatuur Leedus, keskmine Lätis ja madalaim Eestis on otseses korrelatsioonis settekihtide paksusega, kusjuures erinevalt Lätist ja Leedust on Eestis peaaegu kogu õhuke settekivimite vöönd aktiivse veevahetuse tsoonis, milles ka jääaegade jahutav mõju on olnud suurim. Seega veekihtide kõrgem temperatuur Leedus > 2 km sügavusel ei oma üldjuhul suuremat tähtsust kui tunduvalt nõrgemate anomaaliate esinemine Eestis 500-1000 m sügavusel. Kõrgenenud soojusvooga alade lokaliseerimine on eelduseks, et leida ka Eesti aluskorras kasutamist väärivaid geotermaalseid ressursse.

Eesti aluskorrakivimite temperatuurivälja sõltuvus geofüüsikaliselt ja geoloogiliselt tuvastatud graniitsete kivimite massidest ja nende radioaktiivsusest põhjustatud kõrgematest temperatuuridest on vähe uuritud, aga siiski põhiline üldine globaalselt kehtiv kriteerium katsekaevude kohtade valikul.

6.2 Uuritavad geoloogilised struktuurid

Eesti aluskorras väärivad mitmed geoloogilised eripärad tähelepanu. Näiteks (1) süvamurrangud; (2) suured granitoidsed intrusiivid; (3) teadaolevalt kõrgema temperatuuriväljaga paikkonnad; (4) Mõniste-Lokno kerkeala.

- On teada, et paljud granitoidsed kivimid on rikastunud elementidest nagu K, Th ja U, ehk siis radioaktiivsetest elementidest, mille lagunemisel eraldub soojust. Geoloogiliste uuringutega oleks vaja kindlaks teha aluskorra madala ja kesksügava osa granitoidsete massiivide soojatootlikkus ja geotermiline gradient 1-3 km sügavusel. Eri vanusega graniitsete kivimite osakaal Eesti aluskorras on suur. Esialgset laboriuuringut saab läbi viia olemasolevate aluskorra puursüdamike analüüsimise teel.

- Hinnata ja määrata murranguvööndite temperatuurivälja Eesti erinevates osades, seejuures silmas pidades ka seni avastatud geotermilise välja uuritust ja leitud anomaaliaid nii Eestis kui Lätis-Leedus. Siinkohal eeldatakse, et seoses parema läbitavusega murenenud kivimite vööndis (murrangud) võivad kuumad fluidid tõusta kõrgematesse kihtidesse põhjustades seeläbi kõrgemat temperatuuri murrangupiirkondades.

- Viia läbi täiendavad uuringud Kirde-Eesti anomaalses piirkonnas, selgitada selle võimalikud põhjused ning määratleda süvapuuraugu võimalik asukoht.

- Viia läbi täiendavad uuringud Kagu-Eestis, Mõniste-Lokno kerkealal eesmärgiga selgitada kerhestruktuuri iseloomu ja geoloogilisi põhjuseid. Saadud info põhjal määratleda süvapuuraugu võimalik asukoht.

Pärast soojusvoo tiheduse ja aluskorra soojustootlikkuse täpsustamist saab detailsemalt hinnata potentsiaalseid kohti uute puuraukude rajamiseks. Olemasolevate

mõõtmistulemuste alusel ja geoloogilise ehituse eripära baasil võib välja pakkuda 4-5 põhimõttelist puurimiskohta (joonis 25).

6.3 Võimalikud uuringuliste süvapuuraukude asukohad

I. Regionaalne paksu ja kerge (st graniidirikka) maakoore ala: **Kirde-Eesti** ja **Põhja-Eesti** regionaalne (K, U ja Th-rikaste) graniitidega tugevasti rikastunud gneisside levila, üksikute mikrokliingraniidi- ja rabakivigraniidi-massiividega selle sees ning piirneva hiiglasliku Viiburi rabakivigraniidi pluutoni lõunaservaga Soome lahes, ida-läänesuunaliste aluskorda ning kirde-edalasuunaliste nii aluskorda kui pealiskorda läbivate murrangutega; nõrgalt tõestatud, kuid siiski võimaliku pinnalähedase geotermilise anomaaliga Kirde-Eestis ja külgnevas Leningradi oblastis (joonis 25). Anomaalia asukoht analoogne anomaaliaga Riia massiivi lõunaserval. Settekatte paksus 150-300 m.

KOHAD: Narva, Sillamäe, Jõhvi, Tallinna linna ümbrus;
Esmane puurimissügavus 2-3 km, kindlustada jätkamisvõimalus.

II. Regionaalne paksu ja muutliku tihedusega maakoore ala **- Lõuna-Eestis,** mille piires valida kohalik (K-, U- ja Th-rikaste) graniitidega tugevasti rikastunud gneisside levila, teadaolevalt mikrokliingraniidi- ja tsarnokiidi-massiividega selle sees ning piirneva hiiglasliku Riia rabakivigraniidi pluutoni idaservaga Riia lahes. Soovitavalt leida asukoht Mõniste-Lokno kerkealal, happeliste kivimite alal. Settekatte paksus 400-500 m.

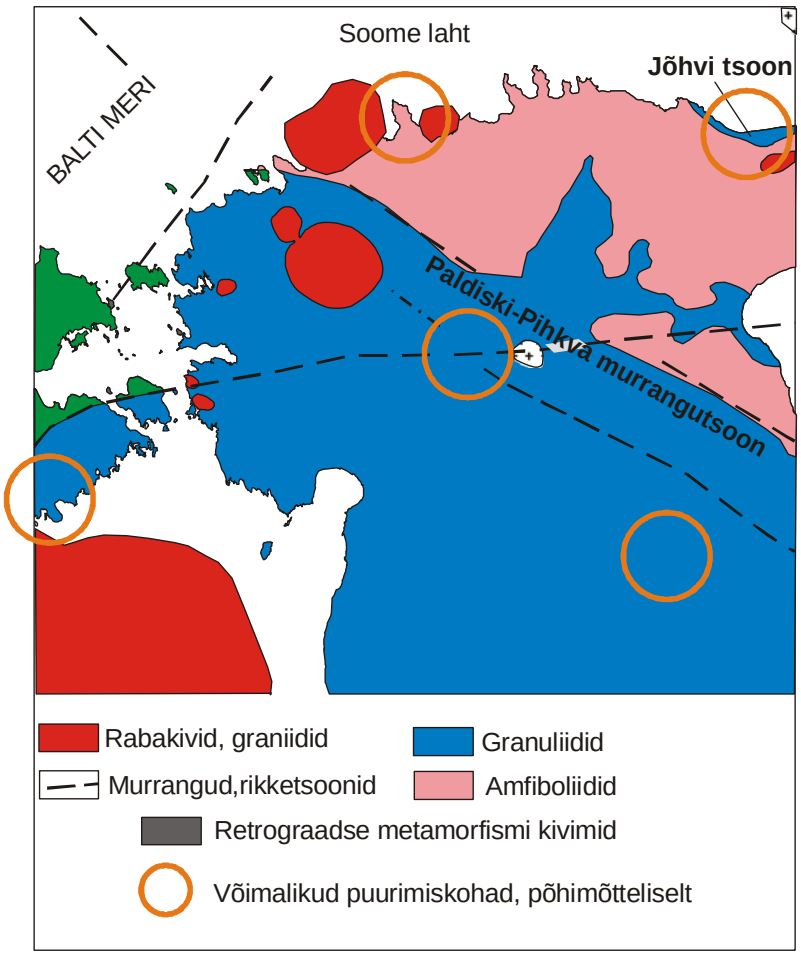
Valga või Võru maakond;
Esmane puurimissügavus 2-3 km, kindlustada hilisem jätkamisvõimalus.

III. Hiiglasliku Riia rabakivimassiivi põhjaserv **Saaremaal,** madalal sügavusel tardunud (K-, U- ja Th-rikaste) valdavalt graniitne intrusioon aluskorra ülaosas. Võimalik Edela-Läti geotermiline anomaalia asub settekihtides Riia rabakivimassiivi lõunaääre kohal. Eestis andmed rabakivi leviku äärealade temperatuuri kohta puuduvad. Katvate settekivimite paksus 500 m.

Kuressaare linna piirkond või Edela-Eesti nurk;
Esmane puurimissügavus 2-3 km, kindlustada hilisem jätkamisvõimalus.

IV. **Paldiski-Pihkva** süvamurrangusüsteem, mis läbib Eesti diagonaalselt. Puurimise asukohaks valida koht, kus NW-SE suunaline murrang lõikab E-W suunalist murrangut. Katvate settekivimite paksus erinev, 200 – 600 m.

Esmane puurimissügavus 0,8-1,5 km, kindlustada hilisem jätkamisvõimalus. Ilmselt vajadus mitmete 0,8-1,2 km puuraukude järele, mis täpsustavad murrangu iseloomu ja täpsemat asukohta.



Joonis 25 Eesti Eelkambriumi vanusega kristalse aluskorra lihtsustatud ehitus ja võimalikud puurimiskohad.

KOKKUVÕTE

Toetudes olemasolevale geofüüsikalisele, petroloogilis-mineraloogilisele, struktuuri-geoloogilisele ja vahetule temperatuuride mõõtmise andmestikule saab teha küll üldisi järeldusi, kuid detailsemas plaanis antud andmestiku rakendamine Eesti maapõue geotermaalse ressursi prognoosimisel on raskendatud.

- Eestis kasutatakse maasoojusenergiat enamasti läbi horisontaalsete kontuuride, mis on paigaldatud 1-2 m sügavusse. Installeeritud soojuspumpasid on ligi 8000, kuid puuduvad usalduslikud andmed vertikaalsete kontuuride, soojuspuuraukude kohta. Raskused seadusandluses soojapuuraukude rajamiseks – ilmselt peapõhjus. Üksiknäited: vt http://www.geopower.ee/materjalid/naidislahendused/

- Puudub mudel ülemise maakoore osa, 30 – 250 m – soojus- ja temperatuuriparameetrite kohta, mis hõlbustaks soojapuuraukudel põhinevate tulevikurakenduste juurutamist. Selles osas vajab seadusandlus täiendamist.

- Olemasolevad puuraugud on usaldusväärselt soojusvoo tiheduse määramiseks enamasti liiga madalad (100—200 m) ja alluvad seega välistele mõjutustele. Eesti maapõue pindalalise temperatuuri jaotumise hinnangut ei luba piisaval täpsusel läbi viia puuraukude ebaühtlane jaotus; Edela- ja Lõuna-Eestis teostatud mõõtmisi on liiga vähe temperatuurijaotuste ja -anomaaliate hindamiseks.

- Põhiline järeldus olemasolevate andmete sünteesist viitab sellele, et Eestis on olemas ressurss madalatemperatuurilise geotermaalse energia kasutamiseks põhjavee baasil hoonete kütte/jahutuse eesmärgil, kuid see vajab detailseid uuringuid.

- Efektiivsemat (kõrgematemperatuurilist) geotermilist ressurssi rakendada ei ole võimalik meie aluspõhjakihtides oleva põhjavee baasil, kuna veetemperatuurid ei ületa 10-16 kraadi. See on ka suurimaks erinevuseks Läti ja Leedu situatsioonidest, kus Ordoviitsiumi ja Kambriumi veelademete veetemperatuurid ulatuvad tihti üle 30 kraadi.

- Eestis võib suurema geotermaalse käitise jaoks huvi pakkuda maakoore süvakihtide soojusenergia, see on umbes 3-6 km sügavusel lasuvad kristalsed aluskorrakivimid temperatuuril >>100 ^{o}C. Sellega kaasnevat tehnoloogiat on inglise keeles nimetatud Hot Dry Rocks (HDR) – Kuumad Kuivad Kivimid (KKK), või teise nimega Hot Fractured Rocks (HFR) – Kuumad Lõhelised Kivimid (KLK) ning seda arendatakse viimasel kümnendil edukalt mitmetes riikides. Nimetatud valdkonnas andmestik täiesti puudu.

- Geotermaalse ressursi hindamise huvides on vaja: (a) jätkata madalate puuraukude mõõtmist; (b) rajada sügavpuuraugud ressursi hindamisks.

- On välja eraldatud 4-5 võimalikku puurimiskohta lähtudes Eesti ala geoloogilisest omapärast, temperatuurianomaaliatest ja väliskogemustest:

- Edasiste rakendusuuringute läbiviimine lubaks täpsustada ja hinnata Eesti aluskorra geotermilist potentsiaali. All-loetletud uuringud võiks jätkuda paralleelselt näiteks ühe katse- (uuringu) puuraugu rajamisega. Suurima tähtsusega projekti jätkumise seisukohast oleksid järgmised uuringusuunad:

(a) Kindlaks teha aluskorra madala ja kesksügava osa granitoidsete massiivide soojatootlikkus ja geotermiline gradient 1-3 km sügavusel; eesmärgi märksõna: - **graniit**, mille soojustootlikkuse põhjuseks oleks radioaktiivsete elementide (K, U ja Th) suhteline rikkus. Eri vanusega graniitsete kivimite osakaal Eesti aluskorras on suur. Uurimust saab läbi viia olemasolevate aluskorra puursüdamike analüüsimise teel;

(b) Hinnata ja määrata murranguvööndite temperatuurivälja Eesti erinevates osades, seejuures silmas pidades ka seni avastatud geotermilise välja uuritust ja leitud anomaaliaid nii Eestis kui Lätis-Leedus. Eesmärgi märksõna: - **murrang,** millega võiks olla seotud sügavustest lähtuv kõrgem soojusvoog;

(c) Täpsustada settekatte **termilisi omadusi ja soojusvoo tihedust** läbilõike pinnalähedases osas eesmärgiga hinnata täpsemalt regionaalset soojusvoogu.

KASUTATUD KIRJANDUS

Annual Report 2005 Geodynamics. 2005. Brisbane, Australia. 96 lk.

Clauser, C., and H. Villinger, Analysis of conductive and convective heat transfer in a sedimentary basin, demonstrated for the Rhine Graben, Geophys. J. Int., 100, 393-414, 1990.

Eihmanis, E., 2000: Incorporation of geothermal heat sources in Latvian heat supply systems. Proceedings on the World Geothermal Congress 2000, Kyushu – Tohoku, Japan,169-174.

Geotemperaturnoe pole Estonii na melkomastabnõh kartah. 1984.TA Geoloogia Instituut. Aruanne. 44 lk.

Gordienko, V.V., Zavgorodnyaya, O.V., Moiseenko, U.I. and Smyslov, A.A., 1985. Heat Flow at the Southern Slope of the Baltic Shield. Geophysical Journal, 6(3), 365-376.

Jõeleht, A., 2007. Soojapuuraukude mõju keskkonnale. Aruanne, Tartu Ülikool, 39 lk.

Jõeleht, A., 2002. Estonia. In: S. Hurter and R. Haenel (eds) Atlas of geothermal resources in Europe. Publication No. EUR17811 of the European Commission, Lovell Johns, Text pp. 28-29, Tables p. 65, p. 78, and Plate 17.

Jõeleht, A., 1998. Geothermal studies of the Precambrian basement and Phanerozoic sedimentary cover in Estonia and Finland. Tartu, 125 p. (PhD dissertation).

Jõeleht, A., and Kukkonen, I.T., 2002. Physical properties of Vendian to Devonian sedimentary rocks in Estonia. GFF, 124, 65-72.

Jürimaa, M. 1984. Metodõ analiza i obrabotki gidrogeologitseskih dannõh dlja prognoza resursov podsemnõh vod. Akademii Nauk Estonskoi SSR. 216-221.

Juodkazis V. Suveizdis P. and Rasteniene V. 1997. Geothermal and mineral water resources of Lithuania. In: Mineral and Thermal Groundwater Resources, M. Albu, D. Banks and H. Nash. Publ. by Chapman & Hall, London, pp. 281-316.

Kukkonen, I., 1987. Vertical variation of apparent and palaeoclimatically corrected heat flow densities in the central Baltic Shield. Journal of Geodynamics, 8, pp. 33-53.

Kukkonen, I., 1988. Terrestrial heat flow and groundwater circulation in the bedrock in the central Baltic Shield. Tectonophysics, 156, pp. 59-74.

Kukkonen, I., 1989. Terrestrial heat flow and radiogenic heat production in Finland, the central Baltic Shield. Tectonophysics, 164, 219-230.

Kukkonen, I.T., 1993. Heat flow map of northern and central parts of the Fennoscandian Shield based on geochemical surveys of heat producing elements. Tectonophysics, 225, 3-13.

Kukkonen, I.T., 1999. Geothermal resources in Finland. In: Atlas of Geothermal Resources in Europe, S. Hurter (ed.), European Commission, Directorate General XII - Science, Research and Development.

Kukkonen, I.T., 2000. Geothermal energy in Finland. World Geothermal Congress 2000, Japan.

Kukkonen, I.T. and Jõeleht, A., 2003. Weichselian temperatures from geothermal heat flow data. Journal of Geophysical Research, vol. 108 (B3), 2163, doi:10.1029/2001JB001579.

LaPlaige, P., Jaudin, F., Desplan, A., Demange, J., 2000. The French geothermal experience. Review and perspectives. World Geothermal Congress 2000, Japan.

Mahler A. 1998. Geothermal Energy in Denmark & Klaipeda. Report for Seminar on Transfer of Geothermal Technology and Knowledge. Reykjavik. 13 pp.

Pribnow, D., and Clauser, C. 2000. Heat and fluid flow at the Soultz hot dry rock system in the Rhine graben. Proceedings World Geothermal Congress 2000; Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000, 3835-3840.

Prols, J., 1994: Origin, distribution and the main features of mineral water in Latvia. Abstracts of the Latvian - Danish Seminar on Groundwater and Geothermal energy, Jurmala, 27-28.

Precambrian basement of the Gulf of Finland and surrounding area. Map 1:1 million (1 sheet) and Explanatory Note (V. Puura - kaasautor). 1994/1996.

Puura,V., Vaher, R., Klein, V., Koppelmaa, H., Niin, M., Vanamb, V. and Kirs. J. 1983. The Crystalline Basement of the Estonian Territory (Monograph). Moscow, Nauka Publishers, 208 p. (vene k. inglise resśmeega).

Puura V., Flodén T. 1996. Subjotnian igneous structures in the Svecofennian Domain of the Baltic region. - GFF 118 Jubilee Issue, A22-23.

Puura V. & Raukas A. 1997. Estonia. - In: Moores E.M. & Fairbridge R.W. (eds.). Encyclopedia of European and Asian Regional Geology. Chapman & Hall. London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras. 195-201.

Puura V. and Floden T. 1999. Rapakivi-granite-anorthosite magmatism - a way of thinning and stabilisation of the Svecofennian crust, Baltic Sea basin. Tectonophysics, 305 (1-3): 75-92.

Puura V., Hints R., Huhma H., Klein V., Konsa M., Kuldkepp R., Mänttäri I., and Soesoo A. 2004. Svecofennian metamorphic zones in the basement of Estonia. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology 53, 3, 190-209.

Puura V. and Plado J. 2005. Settings of impact structures in the Svecofennian Crustal Domain. In. Impact Tectonics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 211-246.

Puura, V., Klein, V., Hints, R., Konsa, M., Kuldkepp, R., & Soesoo, A. 2004. Svecofennian metamorphic zones in the basement of Estonia: an overview. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology, Special Issue, 53, 190-209.

Soesoo, A. & Niin, M. 1992. Petrographical and geochemical features of the Estonian porphyritic potassium granites. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology Series, 41, 93-107.

Soesoo, A. 1993. Estonian porphyraceous potassium granites: petrochemical subdivision and petrogenetical interpretation. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology Series, 42, 97-109.

Soesoo, A., Puura, V., Kirs, J., Petersell, V., Niin, M. & All, T. 2004. Outlines of the Precambrian basement of Estonia. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology, Special Issue, 53, 149-164.

Soesoo, A. 2004. Precambrian basement of Estonia. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology, Special Issue, 53, 147 - 148.

Soesoo, A.; Kosler, J. & Kuldkepp, R. 2006. Age and geochemical constraints for partial melting of granulites in Estonia. Mineralogy and Petrology, 86(3-4), 277 - 300.

Suveizdis P., Rasteniene V. and Zinevicius F. 1995. Geothermal energy possibilities in Lithuania. In: Proceedings of the World GeothermalCongress. Vol.1, Florence, pp.227-232.

Urban, G, Tsõbul, L., Kosjöl, V., ja Smidt, A. 1991. Geotermitseskaja karakteristika severnoi tsastii Baltiiskoi sineklisõ. TA Toimetised. 112-121.