

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Raul Paat

**PÕHJAVEEKIHI HÜDRAULILISTE PARAMETRITE MÄÄRAMINE
KASUTADES MAA-LOODETE, ÕHURÕHU NING MERETASEME
MUUTUMISEST PÕHJUSTATUD KÕIKUMISI
PÕHJAVEETASEMETES**

Magistritöö geoloogias (30 EAP)

Juhendaja: Argo Jõelett

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja: _____

31.05.2018

Tartu 2018

Põhjaveekihi hüdrauliliste parameetrite määramine kasutades maa-loodete, õhurõhu ning meretaseme muutumistest põhjustatud kõikumisi põhjaveetasemetes.

Enamasti määratakse põhjaveekihi hüdraulilisi parameetreid pumpamiskatsete või „Slug test“ meetodiga. Looduslikult mõjutavad veetaset põhjaveekihis sellised tegurid nagu maa-looded, õhurõhk ning rannikulähedaste veekihtide puhul ka mereveetase. Kasutades eelmainitud stressitegurite mõjul põhinevaid meetodeid on arvutatud surveleise Kambrium-Vendi põhjaveekihi eriveemahtuvust, rõhujuhtivust, poorsust ning kaevude baromeetrilist efektiivsust, kasutades Viimsi poolsaarel asuvaid puurkaevusid. Uuringute käigus selgus looduslikel stressiteguritel põhinevate meetodite kasutatavus valitud põhjaveekompleksi hüdrauliliste parameetrite määramisel.

Märksõnad: *Maa-looded, baromeetriline efektiivsus, merevee tase, veekihi parameetrid, surveleise põhjaveekiht, hüdrogeoloogia.*

P470 Hüdrogeoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia

Assessing aquifer properties using earth-tides, atmospheric pressure and sea level induced fluctuations in groundwater levels.

In most cases the hydraulic parameters of aquifers are identified with pumping- or slug tests. Water levels in aquifers are affected by naturally occurring stresses such as earth-tides, air pressure and sea level changes in the coastal areas. Using methods that are based on the fore-mentioned naturally occurring stresses, the specific storage, hydraulic diffusivity and porosity of the confined Cambrian-Vendian aquifer system and the barometric efficiency of the used wells on Viimsi peninsula are calculated. In this work the applicability of used methods to determine the properties of the Cambrian-Vendian aquifer system are assessed.

Keywords: *Earth-tides, barometric efficiency, sea level, aquifer parameters, confined aquifer, hydrogeology.*

P470 Hydrogeology, geographical and geological engineering

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Teoreetiline taust	6
1.1. Veekihi eriveemahtuvuse arvutamine kasutades maa-loodeid	6
1.2. Kaevu baromeetiline efektiivsus	9
1.3. Põhjaveekihi poorsuse arvutamine kasutades veekihi eriveemahtuvust ja kaevu baromeetrist efektiivsust	12
1.4. Mere- ning kaevuvee tasemete kõikumiste omavaheline seos	12
2. Viimsi poolsaare geoloogia	14
2.1 Ala geoloogiline kirjeldus	14
2.2 Hüdrogeoloogiline situatsioon	15
2.2.1 Kambrium-Vendi põhjaveekompleks	15
3. Materjalid ja meetodika	17
3.1 Andmete kogumine	17
3.2 Kaevu baromeetiline efektiivsus	19
3.3 Veekihi eriveemahtuvuse arvutamine	20
3.4 Veekihi poorsuse arvutamine	22
3.5 Veekihi rõhujuhtivuse D hindamine tegeliku ning arvutuslikul teel leitud põhjaveetasemete matemaatilisel võrdlusel	22
3.5.1 Veekihi rõhujuhtivuse D määramine, hinnates graafiliselt kaevuvee taseme kõikumise ajalist hilinevust meretaseme suhtes	24
4. Tulemused	25
4.1 Põhjaveekihi eriveemahtuvus, poorsus ning kaevu baromeetiline efektiivsus	25
4.2 Põhjaveekihi rõhujuhtivus	27
5. Arutelu	30
Kokkuvõte	34
Summary	35
Tänuavaldused	36
Kasutatud kirjandus	37
Lisa 1. Kaevude andmete ning arvutatud parameetrite koondtabel	40

Sissejuhatus

Hüdraulilised parameetrid on füüsikalised näitajad, millega iseloomustatakse geoloogiliste formatsioonide võimet mahutada ning edasi kanda kivimites leiduvat põhjavett (Merrit, 2004). Hüdrauliliste parameetrite teadmine on vajalik, et koostada erineva mastaabiga hüdrogeoloogilisi mudeleid ning lahendada erinevaid veemajanduslikke probleeme. Hüdrogeoloogilised mudelid on matemaatilised vahendid, millega viiakse läbi katseid, mida reaalselt pole võimalik põhjaveekihi läbi viia, mis on aluseks erinevate veemajandus- ja poliitiliste otsuste langetamisel antud regioonis (Bear, 1979).

Enamasti kasutatakse põhjaveekihi hüdrauliliste parameetrite määramiseks pumpamiskatseid, mille käigus jälgitakse veetaseme alanemist veekihi, pumbates sealt välja vett kindlal vooluhulgal. Pumpamiskatseid võib teha kasutades ühte või mitut kaevu. Ühe kaevu kasutamisel saab arvutada veekihi filtratsioonikoefitsienti. Laiema mõju hindamine eeldab enamasti vähemalt kahe sama veekihti avava kaevu olemasolu, kus ühes toimub pumpamine ning teises jälgitakse veetaseme alanemist. Pumpamiskatsetega pole võimalik hinnata veekihi poorsust ning ühe kaevu olemasolul ka veekihi eriveemahtuvuse parameetrit. Samuti ei saa alati tagada ka pumbaga ligipääsetavust kaevule või kahe sama põhjaveekihti avava kaevu olemasolu (Fetter, 2001).

Teine levinud viis põhjaveekihi parameetrite määramiseks on nn „slug test“ . Antud katse käsitleb endas kaevuvee taseme muutmist sinna vee lisamise/äravõtmise või kindla ruumalaga raskuse langetamise/eemaldamise teel. „Slug test“-iga on võimalik määrata ainult põhjaveekihi veejuhtivust ning elastset eriveemahtuvust. Antud meetodiga tuleb silmas pidada, et saadud väärtused iseloomustavad ainult kaevu lähedal oleva materjal omadusi. (Fetter, 2001).

Lisaks eelnimetatud antropogeensetele vahenditele, mõjutavad veetaset põhjaveekihtides ka mitmed looduslikud protsessid. Looduslikult esinevad näiteks maa-looded, mis põhjustavad hüdrogeoloogiliste formatsioonide mahumuutusi ning seeläbi veetaseme kõikumisi vaadeldavates kaevudes. Teiseks suureks mõjutajaks on atmosfäärne rõhk, mis samuti rõhudes maa alustele kivimikihtidele ja veetasemetele kaevudes muudavad sealset põhjavee taset. Kui tegemist on hüdrogeoloogiliste formatsioonidega, mis asuvad rannikuäärsetel aladel, siis võib põhjavee tase veekihi mõjutatud olla ka meretaseme liikumistest (Merrit, 2004).

Antud töö eesmärgiks on hinnata põhjaveekihi füüsikalisi parameetreid Viimsi poolsaarel näitel, kasutades selleks looduslikult esinevaid põhjaveetasemeid mõjutavaid stressitegureid, ning analüüsida meetodite rakendatavust.

1. Teoreetiline taust

1.1. Veekihi eriveemahtuvuse arvutamine kasutades maa-loodeid

Varasemad maa loodete uurimused on näidanud, et neil on mõju puurkaevude veetasemetele. Paljudel juhtudel on loodetest tingitud veetaseme kõikumised piisavalt suured, et neid kaevudes jälgida ning mõõta. Kaevuveetasemete sõltuvus maa loodetest loob võimaluse hinnata põhjaveekihi hüdrodünaamilisi parameetreid (Bredehoeft, 1967).

Kuu ja päikese gravitatsiooniline tõmme põhjustab veekihi elastse kivimimaatriksi laienemist ning kokku tõmbumist, mis omakorda mõjutab kivimi poorides oleva vee piesomeetrilist taset ning veetaset seda avavas kaevus. Maa loodete mõju kaevu veetasemele on maksimaalne ajal, mil kaev asub kuule kõige lähemal või kaugemal. Nendel hetkedel on kivimis olevad tühimikud kõige rohkem laienenud ja avatud ning veekihis on sama hulga vee hoidmiseks rohkem ruumi, mistõttu veetase kaevus on madalseisus. Veetase taastab oma „normaalse“ oleku kuutõusul ning loojangul tänu kivimite elastsetele omadustele. Loode tugevus ning sellest tulenevalt veetaseme kõikumise amplituud oleneb ka kuu faasidest, olles maksimaalne kuu loomisel ning täiskuul ja minimaalne poolkuude staadiumis. Samasugused gravitatsioonilised liikumised põhjustavad ka tõusu-mõõna liikumisi ookeanides, mis võivad olla maa loodete jälgimisel segavateks faktoriteks olukorras, kus puurkaev asub rannikualal liiga lähedal veekihi avamusele, mis on allpool merevee taset (Marine, 1975).

Oma töös tuletas Bredehoeft (1967) seose veekihi eriveemahtuvuse (*specific storage* S_s), loodete tekkimise potentsiaali W_2 (m^2/s^2) ning puurkaevu veetaseme kõikumiste vahel dh (m):

$$-dh = \frac{1}{S_s} \left(\frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) \left[\left(\frac{2h-6l}{ag} \right) dW_2 \right] \quad \text{Valem (1)}$$

Antud valemi kaudu on võimalik arvutada veekihi eriveemahtuvus, vaadeldes maa loodete mõju veetasemele kaevus ning teades seejuures veekihti moodustava kivimi Poissoni tegurit ν (ühikuta). Tähisted l ja h on konstandid, mida nimetatakse *Love* numbriteks (mõlemad ühikuta), a (m) tähistab maa raadiust ning g (m/s^2) on gravitatsioonikonstant. *Love* numbreid kasutatakse, et siduda teoreetilist loodete potentsiaali tegelike nihetega maapinnal (Bredehoeft, 1967). Miinus märk valemis 1 näitab, et veetase kaevus langeb, kui loode tekkimise potentsiaal suureneb (Merrit, 2004). Kihi eriveemahtuvust S_s saab valemi 1 järgi arvutada juhul, kui tegemist on surveelise veekihiga, mis koosneb poorsest ning läbilaskvast, täielikult veega küllastunud kivimist, mis on alt ja ülalt piiritletud veepidemetega. Samuti on

antud valemi kasutamisel eeldatud, et veekihi kompressioonil on tahkete osade ruumalalised muutumised väikesed võrreldes vee mahumuutustega. Sellest tulenevalt võib öelda, et veekihi deformatsioonid väliste pingete tõttu väljenduvad eelkõige vee mahumuutustega kivimi poorides ning mõjud kivimi osakestele on väikesed. Eelnevalt mainitud eeldus on tõene teraliste kivimite puhul ning olenevalt Poissoni tegurist ning pooriruumi geometriast ka lubjakivide korral (Bredehoeft, 1967).

Loodete mõju hindamiseks vaadeldava kaevu veetaseme liikumistes toob Bredehoeft (1967) välja kaks võimalust. Esimeseks võimaluseks on võrrelda veetaseme muutuseid kaevus maa-loodeliste komponentide tugevusega, mis vastaval ajal antud asukohas teorias tekiksid. Teine meetod on teostada veetaseme kõverale harmooniline analüüs, mille tulemusena saadakse kaevuvee tasemest erinevate loode komponentide põhjustatud vee liikumiste amplituudid vastavalt nende esinemise sagedusele. Arvestades asjaolu, et loodete tekke potentsiaali komponendid on harmoonilised funktsioonid, mille perioodid on üsna täpselt teada, on eelmainitud teine variant väga käepärane vahend sidumaks maa-loodeid veetasemete kõikumisega kaevudes. Mõlema välja pakutud meetodi puhul tuleb eelnevalt veetasemete andmestikust eemaldada võimalikult palju segavaid faktoreid, näiteks pikemaajalised trendid, baromeetrilised efektid ning vee tarbimisega seotud mõjud (Bredehoeft, 1967).

Valemis 1 välja toodud parameeter dW_2 , mis iseloomustab harmoonilise loode komponendi tekke potentsiaali maa pinnal, tuleneb loodete tasakaalu teooriast (Munk and MacDonald, 1960; Marine, 1975).

$$W_2 = gK_m b f(\theta) \cos[(\phi, t)] \quad \text{Valem (2)}$$

Valemis olevad parameetrid on defineeritud järgmiselt: g – gravitatsioonikonstant (m/s^2), K_m – üldine lunaarne koefitsient (0,537 m), b – loode harmoonilise komponendi amplituudi faktor (ühikuta); $f(\theta)$ – kaevu asukoha laiuskraadi θ funktsioon, vastavalt loode harmoonilisele komponendile, $\cos(\phi, t)$ – loode harmoonilise komponendi faas, mis oleneb kaevu asukoha pikkuskraadist ϕ ning kellaajast t (GMT) (Marine, 1975). Erinevate loode harmooniliste komponentide laiuskraadi funktsioonid, faasi arutamise valemid ning amplituudi faktorid on toodud Tabel 1 (Merrit, 2004).

Tabel 1. Valitud päevaste ja pool-päevaste loode komponentide parameetrid: b – amplituudi faktor; θ – seirepunkti laiuskraad; q – maa nurkkiirus päikese suhtes (15° /keskmise päikeseööpäeva tunnis); $\phi_s(t)$ – keskmise päikese pikkuskraad (tõuseb $0,0411^\circ$ /keskmise päikeseööpäeva tunnis); $\phi_m(t)$ – Kuu keskmine laiuskraad (tõuseb $0,549^\circ$ /keskmise päikeseööpäeva tunnis); $\phi_p(t)$ – Kuu perigee keskmine pikkuskraad Maa suhtes (tõuseb $0,0046^\circ$ /keskmise päikeseööpäeva tunnis); ϕ – seirepunkti pikkuskraad (Merrit, 2004).

Harmoniline komponent (sagedus 1/d)	b	$f(\theta)$	$\beta(\phi, t)$
O_1 (0,929)	0,377	$\sin\theta\cos\theta$	$qt + \phi_s(t) - 2\phi_m(t) - 169,8^\circ + \phi$
P_1	0,176	$\sin\theta\cos\theta$	$qt - \phi_s(t) - 10,2^\circ + \phi$
K_1	0,531	$\sin\theta\cos\theta$	$qt + \phi_s(t) + 10,2^\circ + \phi$
N_2	0,174	$0,5\cos^2\theta$	$2(qt + \phi_s(t) - 1,5\phi_m(t) + 0,5\phi_p(t) - 79,8^\circ + \phi)$
M_2 (1,932)	0,908	$0,5\cos^2\theta$	$2(qt + \phi_s(t) - \phi_m(t) - 79,8^\circ + \phi)$
K_2	0,423	$0,5\cos^2\theta$	$2(qt + \phi_s(t) - 79,8^\circ + \phi)$
S_2	0,115	$0,5\cos^2\theta$	$2(qt + \phi)$

Merrit (2004), kasutades loode komponentide amplituudide saamiseks harmoonilist analüüsi mis ei olene täpsetest mõõteaegadest, lõi ligikaudse edasiarenduse valemist 1:

$$S_s = 7,88 * 10^{-9} \frac{A_2(\tau, \theta)}{A_h(\tau)} \quad \text{Valem (3)}$$

kus A_2 tähistab kindla perioodiga τ harmoonilise komponendi potentsiaali maa pinnal ning A_h vastava komponendi tekitatud veetaseme muutust seiratavas kaevus. Konstanti väärtus $7,88 \cdot 10^{-9}$ (s^2/m^2) on saadud võttes Poissoni teguri väärtuseks $\nu = 0,27$, Love numbrite väärtusteks konstandid $\underline{l} = 0,07$ ja $\underline{h} = 0,6$, maa raadiuseks $a = 6,371 \cdot 10^6$ (m) ning gravitatsioonikonstandiks $g = 9,78$ (m/s^2). Loodelise komponendi potentsiaal on funktsioon laiuskraadist (θ), kuid mitte enam pikkuskraadist (ϕ), ning selle väärtust on võimalik leida kasutades valemit 4 (Merrit, 2004):

$$A_2(\tau, \theta) = gK_m b f(\theta) \quad \text{Valem (4)}$$

Kasutades teoreetiliselt arvutatud loodelist potentsiaali kui standardit kõrvutamaks kaevu veetasemes nähtavaid kõikumisi, peab sellesse suhtuma mõningase kriitilisusega. Maa pinna

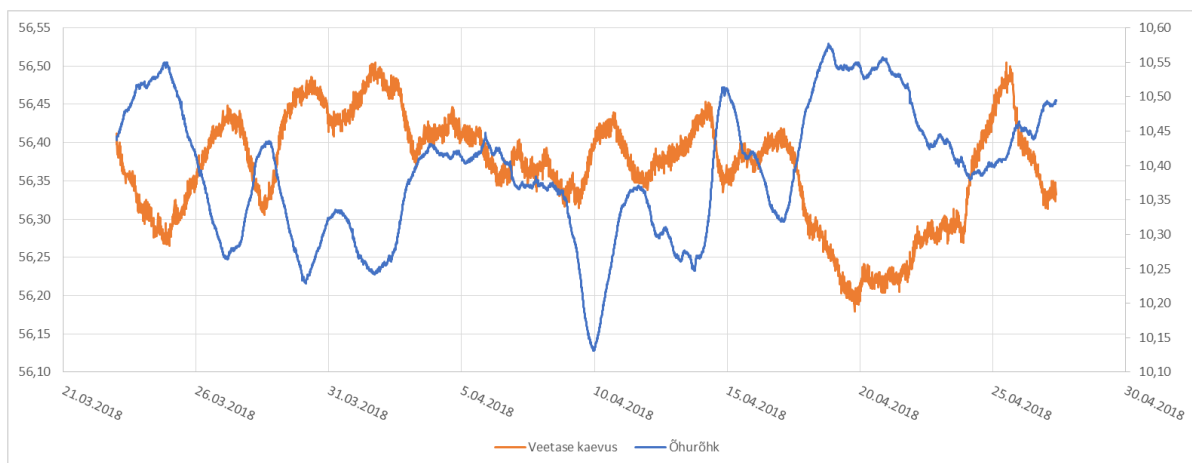
topograafilise varieerumise ning geoloogiliste erinevuste tõttu võib tegelik maa-loode potentsiaal maapinnal erineda märkimisväärselt arvatutust (Merrit, 2004).

1.2. Kaevu baromeetriline efektiivsus

Õhurõhk on maa-loodete kõrval teine suur looduslik tegur, mis avaldab otsest mõju geoloogilistele formatsioonidele. Õhumasside liikumised atmosfääris võivad olla nii perioodilised kui ka aperioidilised. Perioodilisi liikumisi võib seostada maapinnalähedaste õhumasside soojenemise-jahtumise, laienemise-kokku tõmbumise ning nende tõusmise ja langemise tsüklilisusega. Rõhu varieerumine atmosfääris põhjustab veetaseme muutusi põhjaveekihis ning õhurõhu efektide eemaldamiseks andmestikust tuleb leida kaevu baromeetriline efektiivsus (Merrit, 2004).

Õhurõhu liikumised mõjutavad kaevu veetaset vastupidiselt (Joonis 1). Kui atmosfääris rõhk tõuseb, siis veetase kaevus langeb ning vastupidi. Mõõtes atmosfäärset rõhku samaaegselt veetasemega kaevus on võimalik tuletada selle baromeeriline efektiivsus α . Mainitud parameeter iseloomustab veekihi survetaseme (ΔW) ning atmosfäärse rõhu (ΔB) muutumiste omavahelist suhet (Valem 5). Baromeetriline efektiivsus varieerub vahemikus 0–1, olles 0 kui atmosfäärne rõhu muutus mõjub veekihile täies ulatuses, kompenseerides samaaegselt toimuvaid veetaseme muutusi kaevus mille tõttu põhjaveetasest kaevus ei muutu. Baromeetriline efektiivsus on 1 kui rõhumuutused põhjaveekihini ei ulatu ning veetase muutub vaid kaevus (Rasmussen, 1997).

$$\alpha = -\frac{\Delta W}{\Delta B} \quad \text{Valem (5)}$$



Joonis 1. Õhurõhu ja kaevuvee taseme võrdlus puurkaevus 172.

Baromeetrilise efektiivsuse arvutamiseks kasutatakse sageli Clark'i meetodit (Clark, 1967). Antud meetod seob graafiliselt omavahel veetaseme kõikumiste summa kaevus ning neid põhjustavate atmosfäärse rõhu kõikumiste summa. Meetodi aluseks loetakse tingimust, et veetaseme muut Δh_i loetakse positiivseks juhul, kui veetase kaevus tõuseb ning rõhu muut Δb_i positiivseks, kui atmosfääri rõhk langeb. Clark'i meetod arvestab veetaseme liikumisi kaevus kui ainult atmosfääri rõhu kõikumiste poolt tekitatud, mille tõttu võib tuletatud baromeetriline efektiivsus osutada ebatäpseks. Selleks, et vähendada efektiivsuse arvutamisel maa-loodete ja muude efektide ning baromeetriliste mõjude kokkulangevust on tuletatud alternatiivne algoritm (Rahi, 2009):

$$\Delta b_i = b_i - b_{i-1} \quad \text{Valem (6)}$$

$$\Delta h_i = h_i - h_{i-1} \quad \text{Valem (7)}$$

$$I = \Delta b_i * \Delta h_i \quad \text{Valem (8)}$$

$$S_b^i = S_b^{i-1} + |\Delta b_i|, \text{ kui } I < 0 \text{ ja } |\Delta h_i| \leq |\Delta b_i| \quad \text{Valem (9)}$$

$$S_b^i = S_b^{i-1}, \text{ kui eelnevad tingimused pole täidetud} \quad \text{Valem (10)}$$

$$S_h^i = S_h^{i-1} + |\Delta h_i|, \text{ kui } I < 0 \text{ ja } |\Delta h_i| \leq |\Delta b_i| \quad \text{Valem (11)}$$

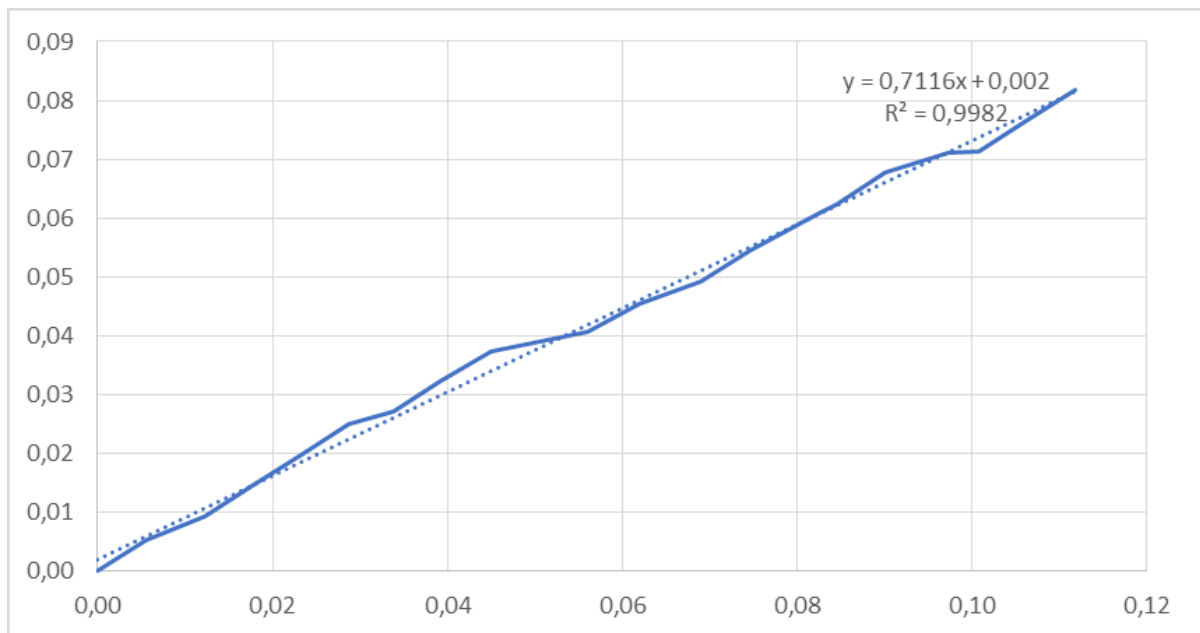
$$S_h^i = S_h^{i-1}, \text{ kui eelnevad tingimused pole täidetud} \quad \text{Valem (12)}$$

Valemite 6–9 kasutamise eelduseks on õhurõhu (b_i) ja veetaseme algandmed (h_i), mis on mõõdetud samal ajahetkel (t_i). Meetodi kasutamine eeldab ka seda, et nii veetase kui ka

õhurõhk on arvutamisel samades ühikutes. Summad S_b^i ja S_h^i saadakse liites järk-järgult ajaintervalli (t_i) kaupa kas õhurõhu (Δb_i) või veetaseme (Δh_i) muut kaevus, järgides valemitega 9–12 toodud tingimusi. Saadud veetaseme ning õhurõhu summade aegridadest koostatakse graafik (Joonis 2), kus parameeter S_h^i on funktsioon väärtusest S_b^i . Saadud andmestiku regressioonisirge tõus väljendab kaevu baromeetrilist efektiivsust α (Meritt, 2004).

Teades kaevu baromeetrilist efektiivsust saab kogutud veetasemete andmestikule viia sisse baromeetrilise korrektuuri. Parandatud veetase $R(t)$ arvutatakse igal ajahetkel mõõdetud veetaseme $W(t)$ puhul korrigeerides seda vastavalt õhurõhu muutumise amplituudile $B(t)$ (Rasmussen, 1997):

$$R(t) = W(t) + \alpha * B(t) \quad \text{Valem (13)}$$



Joonis 2. Andmete põhjal saadud veetasemete muutuste summa S_h sõltuvus õhurõhu muutuste summast S_b puurkaevu 172 näitel.

Mõõtes sama aegselt õhurõhku atmosfääris ning põhjaveetasest kaevus, on võimalik arvutada veekihi veejuhtivuse T ning elastse veemahtuvuse S väärtusi. Eeldades, et õhurõhu muutused mõjutavad veetasest kaevus sarnaselt „slug test“ katsetele, saab tegeliku ning arvutatud veetaseme matemaatilisel võrdlemisel määrata eelmainitud hüdrauliliste parameetrite väärtusi (Furbish, 1991). Samas tuleb tõdeda, et liiga hea kihi veejuhtivuse korral, saabub õhurõhu ja selle poolt mõjutatud veetasemete kõikumises tasakaal liiga kiiresti ning eelmainitud teooriat pole võimalik rakendada.

1.3. Põhjaveekihi poorsuse arvutamine kasutades veekihi eriveemahtuvust ja kaevu baromeetrilist efektiivsust

Teades veekihi eriveemahtuvust S_s ning kaevu baromeetrilist efektiivsust α on võimalik kindlaks teha ka seda moodustava kivimi poorsus (Valem 14). Saadud väärtus iseloomustab põhjaveekihi keskmist poorsust kaevuga avatava intervalli läheduses (Bredehoeft, 1967).

$$\alpha = \frac{\rho g n}{E_w S_s} \quad \text{Valem (14)}$$

E_w tähistab vee elastsuse mahumoodulit, mis antud töös on asendatud tema pöördväärtusega, milleks on vee kokkusurutavus β . Vahetades eelmainitud parameetrid ning avaldades poorsuse n (ühikuta), näeks valem 14 välja järgmiselt (Merrit, 2004):

$$n = \frac{S_s \alpha}{\rho g \beta} \quad \text{Valem (15)}$$

Võrreldes sel viisil omandatud poorsust kivimite füüsikaliste uuringute tulemustega, on võimalik hinnata maa-loodete põhjal arvatud veekihi eriveemahtuvuse ning kaevu baromeetrilise efektiivsuse väärtusi.

1.4. Mere- ning kaevuvee tasemete kõikumiste omavaheline seos

Merevee taseme kõikumine mõjutab märkimisväärselt põhjavee liikumist rannikulähedasel alal. Merevee taseme muutumine ajas tekitab perioodilist ja mitteperioodilist veetaseme kõikumist põhjaveekihi (Dong et al., 2012). Veetaseme kõikumist vastavalt merevee ostsillatsioonile näeb tingimustel, kui põhjaveekiht avaneb merepõhjas ning piisavalt lähedal rannikule. Merevesi surutakse põhjaveekihti sisse või sellest välja vastavalt merevee taseme muutumisele ning selle mõju põhjaveetasemele väheneb kihi avamusest kaugenedes (Merrit, 2004).

Võrreldes omavahel kaevus mõõdetud ning arvutuslikul teel saadud teoreetilist põhjavee taset põhjaveekihi, kasutades merevee taseme kõikumisi, on võimalik hinnata veekihi rõhujuhtivust D . Põhjaveekihi teoreetilist veetaset arvutatakse enamasti kasutades ainult perioodilisi loodete poolt tekitatud mereveetaseme muutumisi, jättes arvestamata juhuslikke aperioidilisi komponente. Selleks, et teoreetilise põhjaveetaseme arvutamine oleks täpsem,

tuleks arvesse võtta kõiki veetaseme kõikumisi meres, kasutades reaajas mõõdetud mereveetaset $g(\gamma)$. Mereveetasemele vastav oletuslikku veetaset põhjaveekihis h on võimalik arvutada teades vahemaad x seda avava kaevu ja veekihi avamuse vahel ning veekihi rõhujuhtivust D :

$$h(x, t) = \frac{(\frac{1}{D})^{\frac{1}{2}}x}{2\sqrt{\pi}} \int_0^t g(\gamma)(t - \gamma)^{-\frac{3}{2}} \exp(-\frac{x^2}{4D(t-\gamma)}) d\gamma \quad \text{Valem (16)}$$

Valem kehtib olukorras, kus on tegemist rannikulähedase, veepidemetega piiritletud põhjaveekihiga, mille avamus kulgeb paralleelselt rannajoonega ning avamus on vertikaalne (Dong et al., 2012).

2. Viimsi poolsaare geoloogia

2.1 Ala geoloogiline kirjeldus

Viimsi poolsaar asub Põhja-Eestis Soome lahe lõunakaldal. Poolsaar asub Soome lahe rannikumadalikul, mis jääb Põhja-Eesti klindi ning lahe nõo äärmise maismaalise lõunaosa nüüdse rannajoone vahele (Arold, 2005).

Valdava osa Viimsi poolsaarest katab Viimsi-Rohuneeme tasandik, mille kõrgus ulatub 5–10 m üle merepinna. Tasandikust kõrgemale ulatub Viimsi klindisaar, mille puhul on tegu Põhja-Eesti lavamaa koosseisu kuuluva kolmnurkse lavasaarega, mida kutsutakse ka Lubjamäeks. Lubjamäe kirde- ja lääneserv moodustavad järsu astangu. Kõrgendiku kõrgus ulatub kuni 51,4 m üle merepinna ning langeb 35–36 m selle lõunaserval. Poolsaare lõunaosas on nähtav ka ida-lääne-suunaline Põhja-Eesti klint (Savitskaja ja Savva, 2008). Umbes 2 km kaugusel poolsaare idapoolsest rannajoonest, lõikub pehmetesse liiva- ja savikivimitesse Muuga mattunud klindilaht, mille erosioonilõige oru põhjaosas ulatub Ediacara liivakivideni (Suuroja et al., 2002). Poolsaare edelaosas lõikub aluspõhja kivimitesse sisse Merivälja mattunud klindilaht. Viimati nimetatud org eraldab Põhja-Eesti klindiplateost Viimsi klindisaare ehk Lubjamäe (Suuroja et al., 2003).

Poolsaarel olev pinnakatte paksus jääb vahemikku 0,5–7 m. Väiksemad pinnakatte paksused on klindipealsel tasandikul ning poolsaare keskel oleval Lubjamäel. Kogu poolsaare piires on aluskorra kivimid kaetud moreeniga (Savitskaja ja Savva, 2008). Moreeni puhul on tegemist sinaka- või rohekashalli vähese jämepurdse materjali sisaldusega, kuid üsna savika jäätumisjärgse settega, mille koostises leiame Kambriumi ja Vendi settekivimeid ning aluskorra kristalliinseid kivimeid (Suuroja et al., 2003).

Poolsaare keskel asuval Lubjamäel ning sellega piirneval alal avanevad väga õhukese pinnakatte all Kesk-Ordoviitsiumi lubjakivid. Nendele järgnevad Alam-Ordoviitsiumi merglid ning glaukoniitlubjakivid. Astangutel, mis ümbritsevad lubjamäge, võib paljandumas näha ka Alam-Ordoviitsiumi glaukoniitliivakivi, glaukoniitsavi ja Türisalu kihistu graptoliitargilliiti. Lubjamäe piirkonnas levivad ka Ülem-Kambriumi ladestiku Kallavere, Tsitre ja Ülgase kihistu kvartslivakivid ning Alam-Kambriumi Tiskre kihistu liivakivid (Savitskaja ja Savva, 2008).

Pinnakatte alla olevas aluspõhjas avanevad suuremal jaol poolsaarel Alam-Kambriumi Lükati kihistu aleuroliitne savi liivakivi vahekihtidega või Lontova kihistu, mille moodustab paks savilasund. Lükati kihistu paksus jääb Viimsi poolsaarel vahemikku 10–15 m ning Lontova paksus võib küündida kuni 65 meetrini. Lükati ja Lontova savikate kivimite all lasuvad Ediacara vanuselised liivakivid, aleuroliidid ning savid. Settekivimilise pealiskorra all lasuvad Mesoproterosoilise vanusega graniit ning paleoproterosoikumi gneisid, graniidid ja amfiboliidid (Savitskaja ja Savva, 2008).

2.2 Hüdrogeoloogiline situatsioon

Viimsi poolsaare hüdrogeoloogiline läbilõige jaguneb järgmiselt: Kvaternaari veekompleks, Ordoviitsiumi veekompleks, Ordoviitsium–Kambriumi veekompleks, Kambrium–Vendi veekompleks.

Savika koostise ning väga õhukese paksuse tõttu ei oma Kvaternaari veekompleks Viimsi poolsaare veevarustuse kohta pealt olulist tähtsust ning sellest põhjavett ei võeta. Sama kehtib ka ainult poolsaare keskosas Lubjamäel leviva Ordoviitsiumi põhjaveekompleksi kohta, mis koosneb Lasnamäe, Aseri ja Kunda lubjakividest ning dolomiidistunud lubjakividest, kogupaksusega 5–6 m. Eelmainitud veekompleks on väga piiratud levikuga ning õhukese katva pinnakatte tõttu on sealne põhjavesi väga tundlik reostusele. Natuke suurema levikualaga leiab poolsaarel ka Ordoviitsium–Kambriumi põhjaveekompleksi, mis koosneb Ülem-Kambriumi/Alam-Ordoviitsiumi Kallavere kihistu ja Alam-Kambriumi Tiskre kihistu peeneteralistest liivakividest ning aleuroliitidest. Vettandvaid kivimeid katab Alam-Ordoviitsiumi glaukoniitliivakivid, glaukoniitsavid ja diktüoneemaargilliit. Altpoolt piirab Ordoviitsium–Kambriumi veekompleksi Lükati–Lontova savikivimitest veepide. Valdav enamus puurkaeve Viimsi poolsaarel avavad Kambrium–Vendi põhjaveekompleksi (Savitskaja ja Savva, 2008).

2.2.1 Kambrium-Vendi põhjaveekompleks

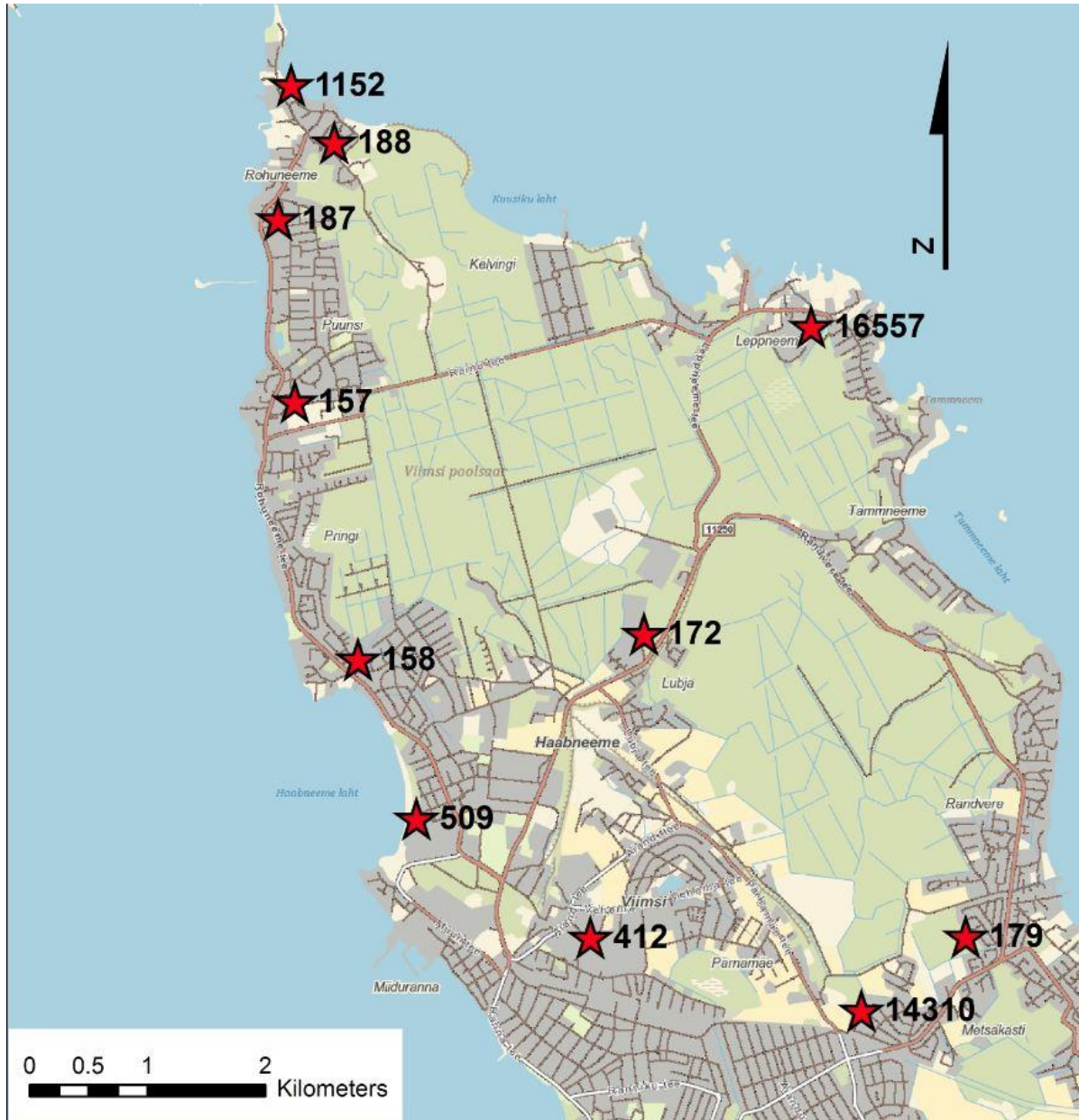
Kambrium–Vendi põhjaveekompleks koosneb Ediacara ja Kambriumi vanuselistest terrigeensetest setetest, mis levivad üle kogu Eesti, välja arvatud Mõniste-Lokno kerkel Lõuna-Eestis (Raukas ja Teedumäe, 1997). Suurimad põhjaveekompleksi paksused on Kirde-

Eestis, ulatudes 80–90 meetrini. Setete paksused vähenevad Lääne-Eesti saarte suunas, leidudes seal vaid paari meetri paksuse lasundina. Kambrium-Vendi põhjaveekompleks kiildub välja Soome lahes, umbes 20 km põhjapool rannajoonest ning lääne suunas Läänemeres põhjas. Põhjaveekompleksi Ediacara vanused terrigeensed setted puuduvad Lääne- ja Lõuna-Eestis (Raidla et al., 2009).

Kambrium-Vendi põhjaveekompleksi vesi on survealine ning on kaetud Lükati-Lontova veepidemega. Kivimilise koostise poolest on Lükati- Lontova puhul tegemist savikivimitega, mis võivad sisaldada ka aleuriiti (Raidla et al., 2009). Veekompleksi all lasub vahetult kristalliinne aluskord, mis oma omaduste ja koostise tõttu moodustab kohati vettandva veekompleksi või suhtelise veepideme (Savitskaja ja Savva, 2008). Ediacara vanused vettandvad kihid jagunevad Voronka ja Gdovi veekihtideks, mille vahele jääb Kotlini veepide, mis kiildub välja Lääne-Eestis. Lääne-Eestis asenduvad kaks veekihti ühtse Lontova–Gdovi veekihtiga, mis koosneb Kambriumi ja Ediacara vanuselistest vettandvatest kivimitest (Raukas ja Teedumäe, 1997). Voronka veekiht koosneb põhiliselt Voronka kihistu kvartsliidakivist ja aleuoliitidest, mille paksus ulatub kuni 40 meetrini. Gdovi veekihtis näeme eriteralisi liidakivisid ja aleuoliite. Kihide paksused jäävad Gdovi puhul vahemikku 40–65 meetrit (Raukas ja Teedumäe, 1997).

3. Materjalid ja meetodika

3.1 Andmete kogumine



Joonis 3. Seirekaevude asukohad Viimsi poolsaarel. Aluseks baaskaart (Maa-amet, 2018).

Käesoleva töö andmed koguti Viimsi poolsaarelt AS Viimsi Vesi omandisse kuuluvatest puurkaevudest (Joonis 3), mis kõik avavad Kambrium–Vendi veekompleksi (Tabel 2). AS Viimsi Vesi kaevud on kõik kasutuses seire- või reservkaevudena, kus pumpamist andmete kogumise ajal ei toimunud. Seiret teostati kahel korral ajavahemikus 9. november 2017 kuni

4. detsember 2017 ning 15. märts 2018 kuni 27. aprill 2018. Esimese seireperioodi andmestik osutus töö käigus ebapiisavaks ning selle tõttu tehti lisamõõtmisi 2018. aasta kevadel. Teise seireperioodi andmestik koguti koostöös Eesti Geoloogia Teenistusega.

*Tabel 2. Seiratud kaevude tehnilised andmed ja asukohad. [Eesti Looduse Infosüsteemi (EELIS) veebirakendus VEKA (Keskkonnaagentuur, 2018). Koordinaatide konverteerimine L-EST97 koordinaatsüsteemist geodeetilisse on läbi viidud kasutades Maa-ameti veebirakendust (Maa-amet, 2018)]. *Puurkaevus 16557 puudub Kotlini veepide ning kaev avab mõlemat veekihti.*

Katastri nr.	Sügavus (m)	Põhjalaius (kraadi)	Idapikkus (kraadi)	Avatud intervall (m)	Veekiht
179	90	59,500152	24,897969	56,9–90	Voronka
157	120	59,541598	24,798343	60–115	
158	110	59,521848	24,807410	71,2–110	
187	70	59,555481	24,796219	51,3–70	
509	75	59,509671	24,815848	54,5–69,5	
14310	124	59,494621	24,882164	90–124	
16557*	110	59,546781	24,875984	80–110	
172	136	59,523528	24,850341	95,2–136	Gdov
188	90	59,561238	24,805211	71,1–90	

Andmete kogumisel kasutati *Van Essen Instruments* poolt toodetud veetaseme logereid *TD-Diver* ja õhurõhu mõõtmiseks baromeetrit *Baro-Diver*. Mõlemat tüüpi instrumendid mõõdavad samaaegselt ka ümbritseva keskkonna temperatuuri. Kaevudesse paigaldati 20 m mõõtevahemikuga mõõdikud, välja arvatud punkti 172. Eelnevalt mainitud seirekaevu pandi 50 m mõõtevahemikuga *diver*. Baromeetreid paigaldati poolsaarele üks, mis asus punktis 1152. Nii veetaseme kui ka õhurõhu mõõdikute mõõtesageduseks määrati 10 minutit. Kõik lugejad seadistati käivituma täiskümnend minutil, saavutamaks andmejadade ajaline sünkroonsus. Enne logerite installeerimist mõõdeti kaevude veetase manuaalselt, hindamaks mõõdiku paigaldamissügavikku. Kõik logerid fikseeriti kindlale sügavusele kasutades peenikest roostevaba trossi.

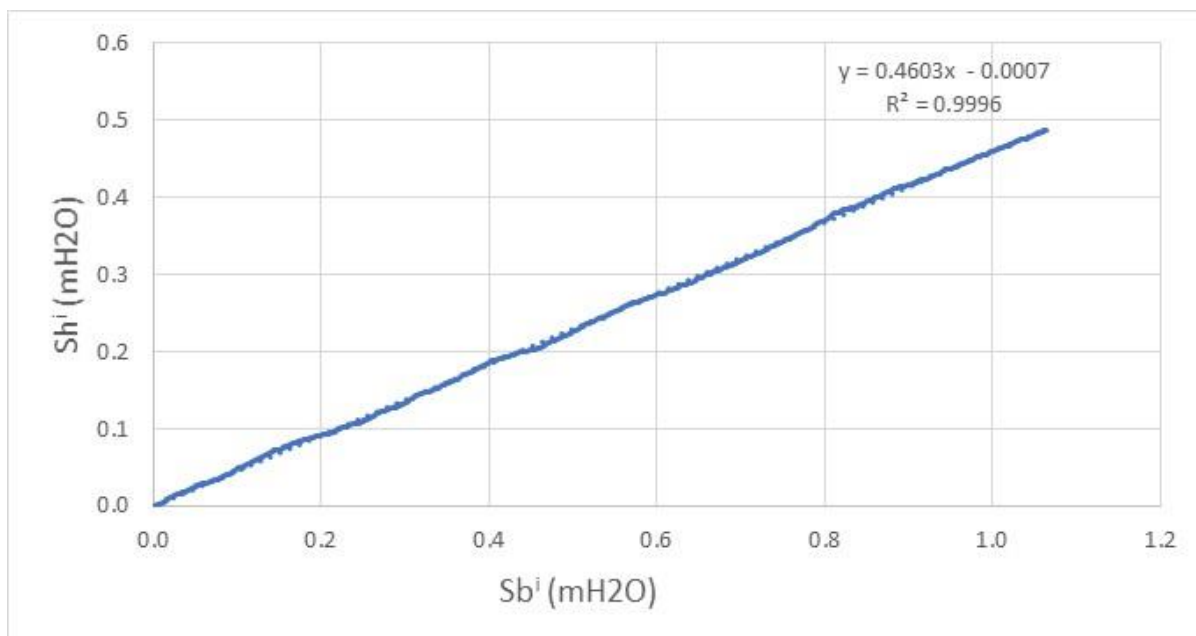
Logerite seadistamiseks, käivitamiseks ja andmete maha laadimiseks on kasutatud *Van Essen Instruments* poolt välja töötatud USB seadeldist ning arvutitarkvara *Diver-Office*.

Eelnimetatud tarkvara võimaldab kogutud andmed vaadata ning eksportida neid programmi *Microsoft Excel*, mida on antud töös andmete töötlemiseks kasutatud.

3.2 Kaevu baromeetiline efektiivsus

Kaevus olev *diver* mõõdab enda kohal olevat rõhku (mH₂O), mis koosneb veesamba- ning atmosfääri rõhust. Tegelike veetasemete saamiseks tuleb kogu andmestik baromeetriselt kompenseerida, lahutades kaevus oleva *diveri* poolt mõõdetud rõhust (p_{diver}) baromeetriga mõõdetud atmosfäärne rõhk (p_{baro}) (Van Essen Instruments, 2017).

Iga kaevu baromeetrilise efektiivsuse arvutamiseks on nii kompenseeritud veetase kui atmosfäärne rõhk jäätud seadmete poolt mõõdetud ühikutesse (mH₂O). Kasutades samaaegselt mõõdetud veetaseme ja õhurõhu väärtusi ning valemeid 6–12 on saadud summade S_b^i ja S_h^i aegread. Valemis 6 on ära vahetatud lahutavate järjekord, et täita valemite kasutamise eelduseks olevat algtingimust $\Delta b_i > 0$, kui atmosfääri rõhk langeb. Järgnevalt on viidud S_h^i aegrida sõltuvuses S_b^i XY- punktdiagrammile, millele on lisatud lineaarne regressioonikõver (Joonis 4). Saadud regressioonikõvera tõus on antud kaevu baromeetiline efektiivsus α .



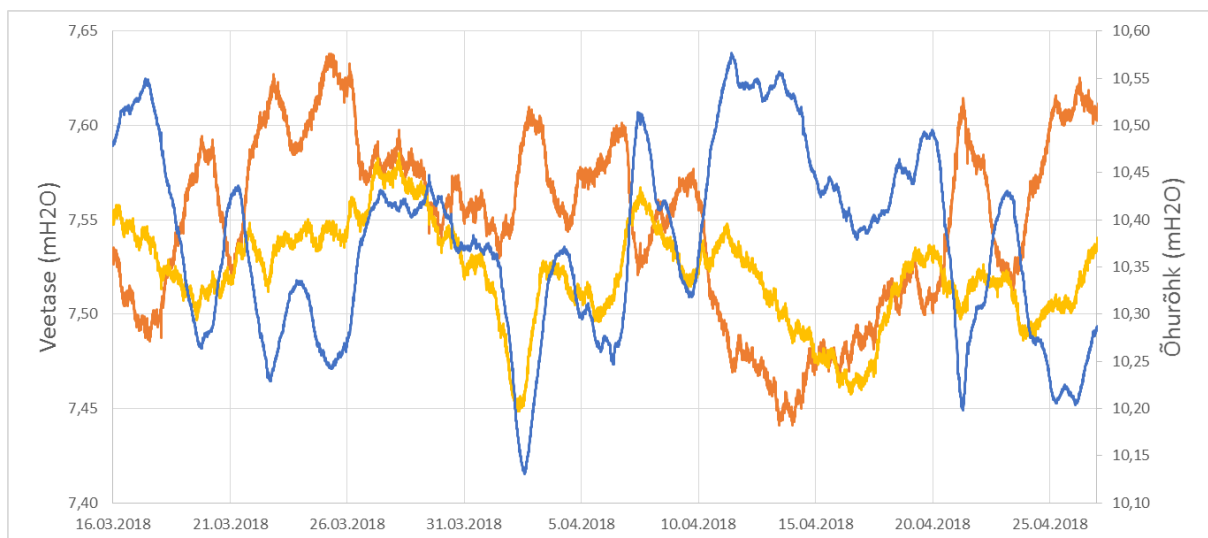
Joonis 4. Saadud baromeetrilise efektiivsuse väärtus 0,46 puurkaevus 172.

3.3 Veekihi eriveemahtuvuse arvutamine.

Eriveemahtuvuse arvutamiseks aluseks on võetud iga seiratud kaevu 40 päeva andmestik vahemikus 15.03.2018 09:20 kuni 27.04.2018 09:20.

Kogutud toorandmestikust on eelnevalt harmoonilisele analüüsile maha lahutatud samal ajal mõõdetud seirepiirkonna atmosfäärne rõhk, sest kaevus mõõdetud veetase on õhurõhu ning logeri peal oleva veesamba rõhu summa. Allesjäänud veesamba rõhu väärtustele on tehtud baromeetiline korrektuur, et eemaldada õhurõhu muutumisest põhjustatud veetaseme kõikumine (Joonis 5). Baromeetriliseks korrektuuriks, on kasutatud valemit 13, kus õhurõhu muut $B(t)$ on arvatud esimese mõõdetud õhurõhu (b_1) suhtes. Kuigi andurite poolt mõõdetud veetasemed on rõhuühikutes mH₂O, ei muutu nende väärtus teisendades neid pikkusühikuteks arvestades valemi 17 kehtivust, kus $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ning $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ (Van Essen Instruments, 2017).

$$W(t) = 9806,65 \frac{R(t)}{\rho * g} \quad \text{Valem (17)}$$

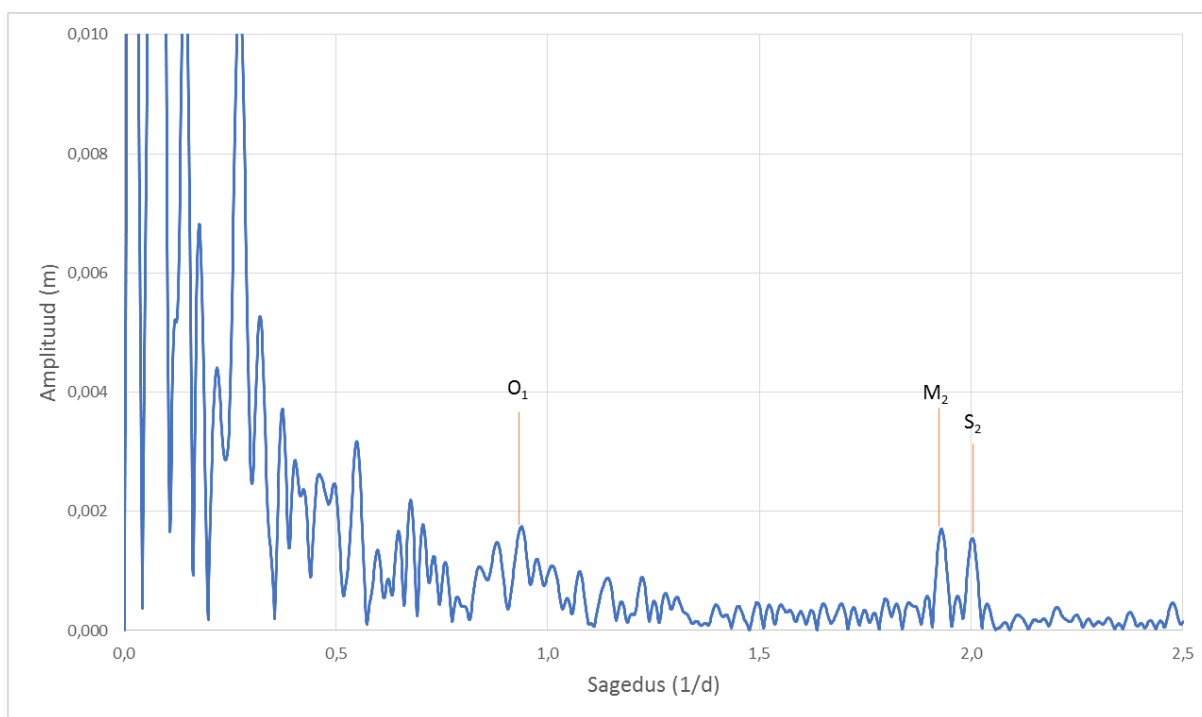


Joonis 5. Baromeetriselt kompenseeritud (kollane)- ning baromeetriselt parandatud (oranž) veetase, koos õhurõhuga (sinine) kaevus 179.

Järgnevalt tehti töödeldud andmestikule harmooniline analüüs, et saada maa-loodete poolt tekitatud veetaseme kõikumise amplituud $A_h(\tau)$ kaevus, mida on vaja veekihi S_s arvutamiseks. Harmooniliseks analüüsiks kasutati programmi ElyaEItfm (Courtney ja Courtney 2015). Antud programm kasutab *Fourier* teisendust, et saada veetasemete andmetest erinevate perioodiliselt võnkuvate komponentide amplituud ja faas vastavalt nende sagedustele (Courtney ja Courtney 2015). Programmi sisendiks võeti 40 päeva kaevu veetaseme

kõikumiste amplituudi andmed, mis salvestati 10 min mõõteintervalliga. Amplituudi saamiseks lahutati igast mõõtetulemusest kaevu 40 päeva keskmine veetase. Harmoonilise analüüsi tulemustest on võimalik saada kindla maa-loode komponendi poolt indutseeritud veetaseme kõikumise amplituud $A_h(\tau)$ kaevus.

Eriveemahtuvuse arvutamiseks on kasutatud maa-loodete harmoonilisi komponente M_2 (lunaarne, poolpäevase perioodiga) ja O_1 (lunaarne, päevase perioodiga), mis on kõige tugevama mõju ja amplituudiga loode komponendid. Osade kaevude puhul on *Fourier* analüüsi tulemustes näha ka komponent S_2 , mida antud töös ei kasutata selle kokkulangevuse tõttu päevaste baromeetriliste kõikumistega atmosfääris (Hsieh et.al, 1987). Kihi eriveemahtuvus S_s on arvatud kasutades valemeid 3 ja 4. Arvutamiseks vajalikud parameetrid, harmooniliste komponentide M_2 ja O_1 jaoks, on toodud tabelis 1 ning kaevude koordinaadid tabelis 2. Veetaseme amplituud $A_h(\tau)$ võetakse eelnevalt mainitud programmiga tehtud *Fourier* analüüsi tulemustest, vastavalt loodeliste komponentide päevastele sagedustele ($O_1 = 0,929 \text{ d}^{-1}$ ja $M_2 = 1,932 \text{ d}^{-1}$) (Joonis 6).



Joonis 6. Puurkaevu 179 veetaseme *Fourier* analüüsi tulemus.

3.4 Veekihi poorsuse arvutamine

Veekihi poorsuse arvutamisel on kasutatud valemit 15. Vee kokkusurutavuseks β on võetud $4,8 \cdot 10^{-10}$ (m²/N), mis iseloomustab vett 9 °C juures. Veekihi poorsus on arvatud iga kaevu puhul, kasutades loodeliste komponentide O₁ ja M₂ suhtes arvatud kihi eriveemahtuvuse S_s väärtusi. Tiheduse ρ väärtuseks on võetud 1000 kg/m³ ning gravitatsioonikonstant $g = 9,79$ m/s².

3.5 Veekihi rõhujuhtivuse D hindamine tegeliku ning arvutuslikul teel leitud põhjaveetasemete matemaatilisel võrdlusel

Prognoositud- ning tegeliku põhjaveetaseme omavaheliseks võrdluseks on valitud neli puurkaevu 157, 158, 509 ja 16557, mis asuvad Kambrium–Vendi põhjaveekihti avavate Merivälja klindilahe ja Maardu ürgorule potentsiaalselt kõige lähemal (Joonis 7). Samuti on antud kaevudes autori poolt täheldatud kõige suuremat merevee taseme kõikumise mõju põhjaveekihile.

Arvutuste aluseks on võetud mõlema kaevu andmed ajavahemikus 15.03.2018 14:20–20.04.2018 01:00. Samas ajavahemikus tunniajase intervalliga mõõdetud mereveetaseme absoluutkõrgus on saadud Keskkonnaagentuuri poolt hallatavast Rohuneeme seirejaamast Viimsi poolsaarel (KAUR, 2018) (Joonis 7). Saadud mereveetasemete seireandmeid on tihendatud programmeerimiskeeles FORTRAN kirjutatud programmiga, et saada kaevuvee taseme mõõtmistega sarnane 10 minutilise intervalliga andmestik. Nii mere kui ka kaevu andmestiku puhul on leitud veetasemete kõikumise amplituud, lahutades igast mõõtetulemusest kogu perioodi seireandmete keskmine väärtus.

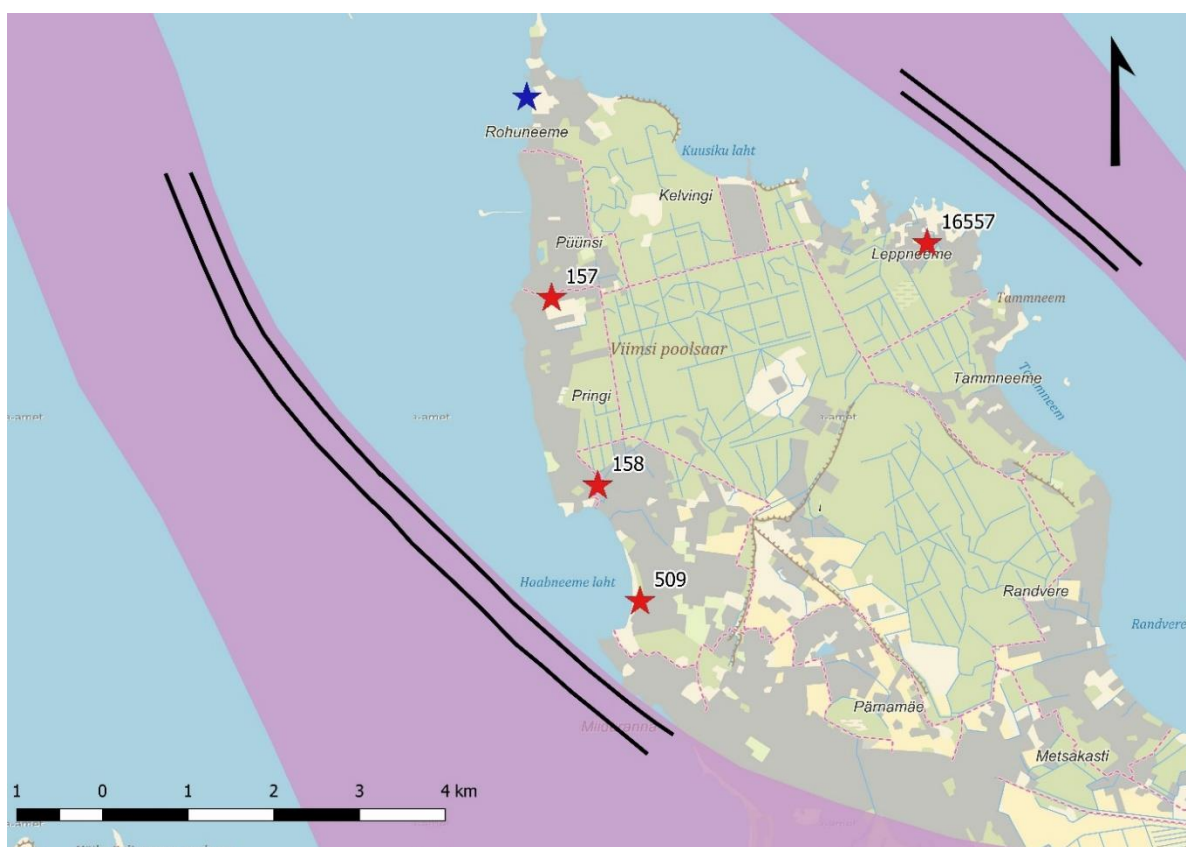
Hinnangulist vahemaad Kambrium–Vendi põhjaveekompleksi avamuse ning vaadeldavate kaevude vahel on hinnatud võttes aluseks Maa-ameti geoloogilise baaskaart (Maa-amet, 2013) ning Veeteede-ameti poolt mõõdetud merepõhja reljeef (Veeteede amet, 2018). Puurkaevude hinnangulised kaugused on järgmised: 157: 2900 – 3100 m, 158: 1600 – 1800 m, 509: 1000 – 1200 m, 16557: 1300 – 1500 m (Joonis 7).

Põhjaveekihi prognoositud kõikumine puurkaevus vastavalt mõõdetud merevee tasemetele on arvatud kasutades valemit 16. Kalibreerides põhjaveekihi rõhujuhtivuse D väärtust on leitud vähim ruutkeskmise viga tegeliku ning arvatud põhjaveetaseme vahel kaevus. Antud meetodiga on võimalik matemaatiliselt hinnata põhjaveekihi rõhujuhtivust (Dong et al., 2012).

Parameetri kalibreerimiseks, leides väikseima võimaliku ruutkeskmise vea arvatud ning tegeliku veetaseme vahel, on kasutatud *Microsoft Exceli* lisaprogrammi *Solver*.

Rõhujuhtivus väljendab põhjaveekihi filtratsioonikoefitsendi K ja eriveemahtuvuse S_s omavahelist suhet (Valem 18) (Freeze ja Cherry, 1979). Matemaatilise analüüsi tulemusena saadud rõhujuhtivuste väärtuste kaudu on arvatud põhjaveekihi eriveemahtuvus, võttes filtratsioonikoefitsendi väärtuseks $K = 17 \text{ m/d}$, mis on keskmine hinnang Viimsi poolsaarel ja selle lähiümbruses teostatud pumpamiskatsete tulemustest (Vatalin, 1998 ja Savitski et al., 1993).

$$D = \frac{T}{S} = \frac{K}{S_s} \quad \text{Valem (18)}$$



Joonis 7. Violetse värviga on toodud eelduslikud mattunud orgude asukohad, kasutades geoloogilist baaskaarti (Maa-amet, 2013) ning merepõhja reljeefi (Veeteede-amet, 2018). Sinine täht märgistab Keskkonnaagentuuri Rohuneeme seirejaama asukohta. Mustade joontega on toodud eelduslik Kambrium-Vendi veekompleksi avamuse kaugusevahemik, kust mereveeimpulsid põhjaveekihti jõuavad. Joonise taustaks on Maa-ameti baaskaart (Maa-amet, 2018).

3.5.1 Veekihi rõhjuhtivuse D määramine, hinnates graafiliselt kaevuvee taseme kõikumise ajalist hilinevust meretaseme suhtes.

Lisaks eelnevas peatükis kirjeldatud meetodile on põhjaveekihi rõhjuhtivust arvatud hinnates merevee taseme kõikumise impulsi ajalist hilinemist vaadeldavasse kaevu. Oletades, et impulss levib põhjaveekihis lineaarselt ning teades kaevu kaugust x veekihi avamusest on võimalik hinnata hüdroteoloogilise üksuse rõhjuhtivust, kasutades Cooper-Jacobi meetodit, mis leiab tavaliselt kasutust hüdrauliliste parameetrite määramisel pumpamiskatsetel (valem 19) (Fetter, 2001).

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \quad \text{Valem (19)}$$

Kasutades seost põhjaveekihi rõhjuhtivuse D ning kihi veejuhtivuse T ja elastse veemahtuvuse S vahel (Valem 18), ning asendades raadiuse r veekihi avamuse ja kaevu vahelise kaugusega x , saab valemi 19 ümber kirjutada järgmiselt:

$$D = \frac{x^2}{2,25t_0} \quad \text{Valem (20)}$$

Merevee taseme muutumise impulsi ajalist hilinemist kaevu on hinnatud kasutades kahe veetasemekõvera ristkorreleerimist (Davis, 1986). Korreleerimise aluseks on võetud mere- ja kaevuvee taseme kõikumise amplituud samadel ajahetkedel. Ristkorreleerimiseks on kasutatud vabavaralist tarkvara Past versiooni 3.20 (Hammer, 2018). Ajalised hilinevused vaadeldavate kaevude puhul on järgmised: 157: 200 min, 158: 130 min, 509: 130 min ja 16557: 60 min.

4. Tulemused

4.1 Põhjaveekihi eriveemahtuvus, poorsus ning kaevu baromeetriline efektiivsus

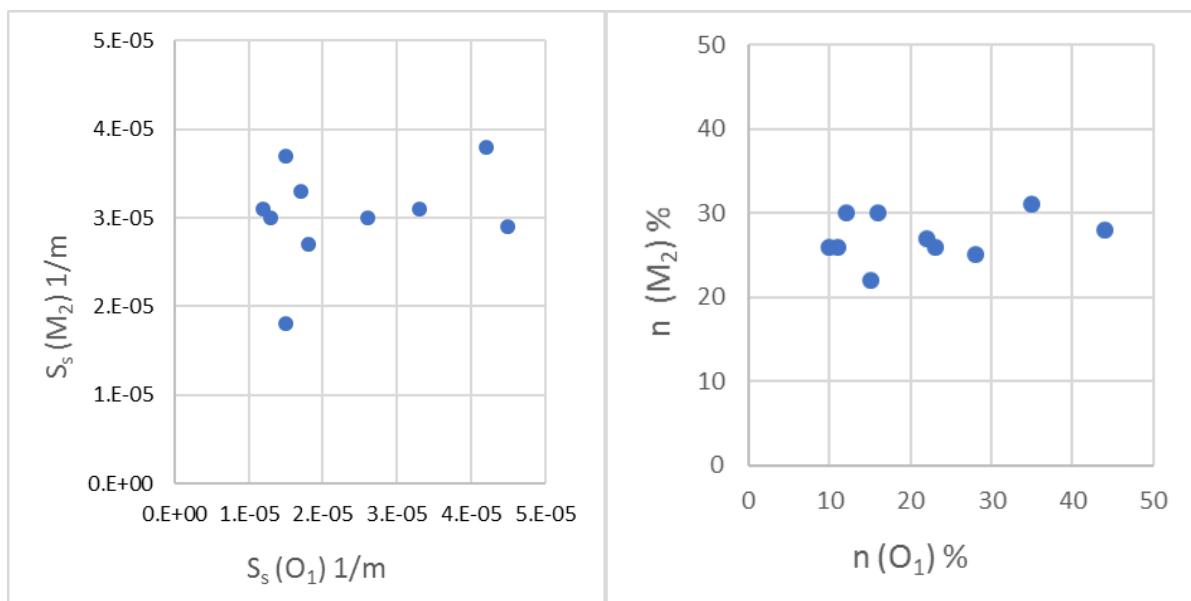
Arvutuste tulemusena saadud veekihi eriveemahtuvus, poorsus ja kaevu baromeetriline efektiivsus on toodud Tabel 3 iga seiratud puurkaevu lõikes. Lisaks on arvutatud ka elastne veemahtuvus S , mis iseloomustab veekihi eriveemahtuvust intervallis, mis on kaevuga avatud. Veetasemete harmoonilise analüüsi tulemused, maa-loode teoreetilised amplituudid ning muud arvutatud väärtused on toodud koondtabelina lisa 1.

Tabel 3. Seiratud puurkaevude arvutatud parameetrid.

Kat. nr.		S_s (1/m)	Avatud intervall H (m)	n (%)	$S=S_s \cdot H$	α (%)	Veekiht	
179	O ₁	$4,5 \cdot 10^{-6}$	33,1	44	$1,5 \cdot 10^{-4}$	46	Voronka	
	M ₂	$2,9 \cdot 10^{-6}$	33,1	28	$9,6 \cdot 10^{-5}$	46		
157	O ₁	$2,6 \cdot 10^{-6}$	55,0	23	$1,4 \cdot 10^{-4}$	41		
	M ₂	$3,0 \cdot 10^{-6}$	55,0	26	$1,7 \cdot 10^{-4}$	41		
158	O ₁	$3,3 \cdot 10^{-6}$	38,8	28	$1,3 \cdot 10^{-4}$	39		
	M ₂	$3,1 \cdot 10^{-6}$	38,8	25	$1,2 \cdot 10^{-4}$	39		
187	O ₁	$1,3 \cdot 10^{-6}$	18,7	11	$2,4 \cdot 10^{-5}$	40		
	M ₂	$3,0 \cdot 10^{-6}$	18,7	26	$5,6 \cdot 10^{-5}$	40		
509	O ₁	$1,8 \cdot 10^{-6}$	15,0	15	$2,7 \cdot 10^{-5}$	39		
	M ₂	$2,7 \cdot 10^{-6}$	15,0	22	$4,1 \cdot 10^{-5}$	39		
14310	O ₁	$1,7 \cdot 10^{-6}$	34,0	16	$5,8 \cdot 10^{-5}$	43		
	M ₂	$3,3 \cdot 10^{-6}$	34,0	30	$1,1 \cdot 10^{-4}$	43		
16557	O ₁	$1,5 \cdot 10^{-6}$	30,0	12	$4,5 \cdot 10^{-5}$	37		Voronka-Gdov
	M ₂	$3,7 \cdot 10^{-6}$	30,0	30	$1,1 \cdot 10^{-4}$	37		
172	O ₁	$1,5 \cdot 10^{-6}$	41,4	22	$6,2 \cdot 10^{-5}$	71	Gdov	
	M ₂	$1,8 \cdot 10^{-6}$	41,4	27	$7,5 \cdot 10^{-5}$	71		
188	O ₁	$1,2 \cdot 10^{-6}$	18,9	10	$2,3 \cdot 10^{-5}$	40		
	M ₂	$3,1 \cdot 10^{-6}$	18,9	26	$5,9 \cdot 10^{-5}$	40		
412	O ₁	$4,2 \cdot 10^{-6}$	12,9	35	$5,4 \cdot 10^{-5}$	38		
	M ₂	$3,8 \cdot 10^{-6}$	12,9	31	$4,9 \cdot 10^{-5}$	38		

Arvutatud eriveemahtuvus S_s jääb seiratud kaevude lõikes vahemikku $1,2 \cdot 10^{-6}$ 1/m – $4,5 \cdot 10^{-6}$ 1/m. Põhjaveekihi poorsused n jäävad vahemikku 10% – 44%. Kõik ekstreemsed väärtused on saadud kasutades harmoonilist komponenti O_1 . Kõige väiksem eriveemahtuvus on saadud Viimsi poolsaare tipu lähedal asuvas puurkaevus 188 ($1,2 \cdot 10^{-6}$ 1/m) ning kõige suurem väärtus pärineb ala kagu osas paiknevast kaevust 179 ($4,5 \cdot 10^{-6}$ 1/m). Kõige suurem veekihi poorsus 44% on arvutatud puurkaevu 179 andmete põhjal ning väiksem 10% seirepunktis 188.

Harmoonilise komponendi M_2 suhtes saadud S_s ja n tulemused on kõigi puurkaevude lõikes vähem varieeruvad kui O_1 põhjal arvutatud (Joonis 8). M_2 komponendi suhtes on suurim eriveemahtuvus arvutatud kaevu 412 andmete põhjal ($3,8 \cdot 10^{-6}$ 1/m) ning väiksem väärtus on saadud puurkaevu 172 puhul ($1,8 \cdot 10^{-6}$ 1/m). Väiksem veekihi poorsus kasutades M_2 komponenti on saadud rannikule kõige lähemal asuva kaevu 509 puhul (22%) ning suurim Lubja mäel asuva puurkaevus 412 (31%).



Joonis 8. Põhjaveekihi eriveemahtuvuse S_s (vasakul) ja poorsuse (paremal) tulemused kasutades harmoonilisi komponente M_2 ja O_1 .

Baromeetiline efektiivsus jääb seiratud puurkaevudes vahemikku 37% – 71%. Kõige väiksem väärtus on saadud mõlemat veekihti (Voronka-Gdov) avavas puurkaevus 16557 (37%), mis asub Leppneeme külas, Viimsi poolsaare kirde-rannikul. Suurim efektiivsus on

arvutatud poolsaare keskosas asuvale kaevule 172 (71%), mis avab Gdovi veekihti. Viimase puhul on tegemist anomaalse väärtusega, sest ülejäänud poolsaarel jäävad baromeetrilise efektiivsuse hinnangud 40% lähedusse, varieerudes 37% – 46% vahel.

Voronka veekihti avab Viimsi poolsaarel kuus seiratavat kaevu. Neli nendest asuvad poolsaare läänekalda läheduses ning kaks kaevu jäävad ala kaguosasse. Voronka põhjaveekihi puhul jäävad eriveemahtuvuse väärtused O_1 komponendi suhtes arvutatuna vahemikku $1,3 \cdot 10^{-6}$ 1/m – $4,7 \cdot 10^{-6}$ 1/m. M_2 komponendi puhul jäävad arvutatud tulemused $2,7 \cdot 10^{-6}$ 1/m ja $3,3 \cdot 10^{-6}$ 1/m vahele. Sarnaselt kõigi puurkaevude võrdluses, varieeruvad ka Voronka veekihi puhul harmoonilise komponendi O_1 suhtes arvutatud väärtused rohkem kui M_2 puhul. Sarnast trendi näeb ka veekihi poorsuse tulemustes. O_1 komponendi analüüsi tulemusena on saadud poorsus, mis jääb vahemikku 11 – 46% ning M_2 annab väärtused 21 – 31% ulatuses.

Gdovi veekihti avab seiratavatest kaevudest ainult kolm. Kaev 188 asub poolsaare tippu lähistel, sealt lõuna poole liikudes, üsna poolsaare keskosas asub puurkaev 172 ning kaev 412 asub poolsaare edela-osas Viimsi aleviku piiridesse. Kihi eriveemahtuvuse väärtused jäävad vahemikku $1,2 \cdot 10^{-6}$ 1/m – $5,7 \cdot 10^{-6}$ 1/m loodelise komponendi O_1 puhul ning $1,8 \cdot 10^{-6}$ 1/m – $3,8 \cdot 10^{-6}$ 1/m poolpäevalise sagedusega M_2 komponendi suhtes arvutatuna. Gdovi poorsused on O_1 komponendi puhul saadud vahemikus 10% – 42%. Loodelist komponendi M_2 kasutades on poorsused Gdovi veekihis saadud intervallis 26% – 37%.

4.2 Põhjaveekihi rõhujuhtivus

Arvutatud põhjaveekihi rõhujuhtivuse tulemused kahe vaadeldava puurkaevu suhtes on toodud Tabel 4, Tabel 5, Tabel 6 ja Tabel 7. Neljas tabelis on toodud nii tulemused, mis on saadud tegeliku ja arvutatud (Valem 16) põhjavee tasemete matemaatilise võrdluse teel (edaspidi meetod 1) kui ka ristkorrelatsioonil hinnatava merevee impulsi hilineamise meetodiga (Valem 20) (edaspidi meetod 2). Lisaks on tabelites toodud ka rõhujuhtivuste tulemuste põhjal arvutatud veekihi eriveemahtuvuse väärtused, võttes filtratsioonikoefitsendi K väärtuseks 17 m/d, mis põhineb varasemate antud piirkonnas läbi viidud pumpamiskatsete (Savitski et al., 1993 ja Vatalin, 1998) tulemustel.

Tabel 4. Kahe meetodiga arvatud põhjaveekihi rõhujuhtivuse D ning eriveemahtuvuse S_s väärtused, puurkaevus 16557.

	Tegeliku ja arvatud veetaseme võrdlus			Impulsi hilinemise meetod			
x (m)	D (m²/d)	K (m/d)	S_s (1/m)	D (m²/d)	K (m/d)	S_s (1/m)	Ajaline hiline mine (min)
1300	$1,1 \cdot 10^8$	17	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$6,8 \cdot 10^6$	17	$2,5 \cdot 10^{-6}$	160
1400	$1,3 \cdot 10^8$		$1,3 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^6$		$2,2 \cdot 10^{-6}$	160
1500	$1,5 \cdot 10^8$		$1,1 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^6$		$1,9 \cdot 10^{-6}$	160

Puurkaevu 16557 puhul jäävad meetodiga 1 ja 2 saadud veekihi rõhujuhtivuse tulemused suurusjärku vastavalt 10^8 ja 10^7 (Tabel 4). Meetodiga 1 saadud rõhujuhtivuse väärtused vahekauguste lõikes on suuremad kui meetodiga 2 arvatud tulemused. Kasutades meetodit 1 on näha põhjaveekihi rõhujuhtivuse suurenemist $2 \cdot 10^7$ m²/d võrra, kui veekihi avamuse kaugus puurkaevust 16557 kasvab 100 meetrit. Meetodiga 2 suureneb põhjaveekihi rõhujuhtivus kaevu-avamuse vahekauguse suurenedes umbes $1 \cdot 10^6$ m²/d võrra.

Tabel 5. Kahe meetodiga arvatud põhjaveekihi rõhujuhtivuse D ning eriveemahtuvuse S_s väärtused, puurkaevus 509.

	Tegeliku ja arvatud veetaseme võrdlus			Impulsi hilinemise meetod			
x (m)	D (m²/d)	K (m/d)	S_s (1/m)	D (m²/d)	K (m/d)	S_s (1/m)	Ajaline hiline mine (min)
1000	$1,3 \cdot 10^8$	17	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^6$	17	$3,5 \cdot 10^{-6}$	130
1100	$1,6 \cdot 10^8$		$1,1 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^6$		$2,9 \cdot 10^{-6}$	130
1200	$1,9 \cdot 10^8$		$9,1 \cdot 10^{-8}$	$7,1 \cdot 10^6$		$2,4 \cdot 10^{-6}$	130

Poolsaare läänekaldal asuva puurkaevu 509 (Tabel 5) puhul on meetodiga 1 saadud rõhujuhtivuse väärtused suuremad kui kaevu 16557 puhul, kuid teisega saadud väärtused on väiksemad. 200 meetrise kaugusvahemiku lõikes jäävad esimese meetodi puhul veekihi rõhujuhtivuse väärtused vahemikku $1,3 \cdot 10^8 - 1,9 \cdot 10^8$ m²/d. Teise meetodiga saadud parameetri D väärtused on kahe suurusjärgu võrra väiksemad ning jäävad 200 meetri piires intervalli $4,9 \cdot 10^6 - 7,1 \cdot 10^6$ m²/d.

Tabel 6. Kahe meetodiga arvatud põhjaveekihi rõhujuhtivuse D ning eriveemahtuvuse S_s väärtused, puurkaevus 158.

	Tegeliku ja arvatud veetaseme võrdlus			Impulsi hilinemise meetod			
x (m)	D (m²/d)	K (m/d)	S_s (1/m)	D (m²/d)	K (m/d)	S_s (1/m)	Ajaline hilinemine (min)
1600	$1,8 \cdot 10^8$	17	$9,6 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^7$	17	$1,4 \cdot 10^{-6}$	130
1700	$2,0 \cdot 10^8$		$8,5 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^7$		$1,2 \cdot 10^{-6}$	130
1800	$2,2 \cdot 10^8$		$7,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^7$		$1,1 \cdot 10^{-6}$	130

Puurkaevu 158 (Tabel 6) rõhujuhtivuse väärtused on esimese meetodi puhul üsna sarnased puurkaevu 509 tulemustega. Teise meetodi puhul on saadud rõhujuhtivuse väärtused suurusjärgu võrra suuremad kui kahe eelmise kaevu puhul. Esimese meetodiga saadud tulemused jäävad vahemikku $1,8 \cdot 10^8 - 2,2 \cdot 10^8$ m²/d, mis on suurusjärgu võrra suuremad kui teisega saadud tulemused intervallis $1,3 \cdot 10^7 - 1,6 \cdot 10^7$ m²/d.

Tabel 7. Kahe meetodiga arvatud põhjaveekihi rõhujuhtivuse D ning eriveemahtuvuse S_s väärtused, puurkaevus 157.

	Tegeliku ja arvatud veetaseme võrdlus			Impulsi hilinemise meetod			
x (m)	D (m²/d)	K (m/d)	S_s (1/m)	D (m²/d)	K (m/d)	S_s (1/m)	Ajaline hilinemine (min)
2900	$6,4 \cdot 10^8$	17	$2,6 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^7$	17	$6,3 \cdot 10^{-7}$	200
3000	$6,9 \cdot 10^8$		$2,5 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^7$		$5,9 \cdot 10^{-7}$	200
3100	$7,4 \cdot 10^8$		$2,3 \cdot 10^{-8}$	$3,1 \cdot 10^7$		$5,5 \cdot 10^{-7}$	200

Kõige põhjapoolsemas antud meetoditega uuritavas kaevus 157 (Tabel 7) on arvatud rõhujuhtivuse tulemused kõige suuremad. Esimese meetodiga arvatud tulemused, nagu eelneva kaevu puhul, olid samuti suurusjärgu võrra suuremad teisel viisil saadud rõhujuhtivuse väärtustest. Meetodiga 1 jäävad rõhujuhtivuse tulemused intervalli $6,4 \cdot 10^8 - 7,4 \cdot 10^8$ m²/d. Teise meetodiga saadud väärtused jäävad vahemikku $2,7 \cdot 10^7 - 3,1 \cdot 10^7$ m²/d.

5. Arutelu

Käesolevas töös arvatud poorsuste, eriveemahtuvuse, baromeetriliste efektiivsuste ning rõhujuhtivuste kontrolliks on kasutatud varasemaid pumpamiskatseid, põhjavee varude hindamisi ja petrofüüsikalisi mõõtmisi. Varasematele uuringutele tuginedes võiks Kambrium-Vendi veekihti moodustavate liivakivide poorsus nende Viimsi poolsaarel jääda peamiselt vahemikku $n = 15\text{--}30\%$ (Jõelet ja Kukkonen, 2002; Jõelet et al., 2002; Shogenova et al., 2009). Rõhujuhtivuste väärtuste vahemik jääb Viimsi poolsaarel ning selle lähipiirkonnas läbi viidud pumpamiskatsete ja põhjavee varude hindamiste kohaselt suurusjärku $D = 10^5\text{--}10^6$ (Savitski ja Savva, 1994; Vatalin, 1998; Savitski et al., 1993). Põhjaveekihi eriveemahtuvuse suurusjärguks on hinnatud $S_s = 10^{-6}$, tuginedes eelnevatele põhjavee varude uuringutel kasutatud ning pumpamiskatsetel saadud kihi veejuhtivuste ning rõhujuhtivuse parameetritel (Savitski ja Savva, 1994; Vatalin, 1998; Savitski et al., 1993; Tamm, 1998).

Kui vaadata antud töös arvatud poorsuse väärtusi jäävad need üldjoontes samasse vahemikku petrofüüsikalistel mõõtmistel saadutega. Paremini sobituvad varasemate hinnangutega harmoonilise komponendi M_2 põhjal arvatud poorsuse väärtused (22–31%). O_1 komponendi suhtes arvatud poorsuse väärtused on palju varieeruvamad (11–44%) ning mitme kaevu puhul jäävad saadud tulemused välja varasemate mõõtmiste piiridest.

Varasemate hinnangutega samasse suurusjärku jäävad ka arvatud põhjaveekihi eriveemahtuvuse S_s väärtused. Siinkohal tuleb aga samuti ära märkida, et harmoonilise komponendi O_1 alusel saadud väärtused erinevad üksteisest rohkem kui M_2 komponendi puhul. Eriveemahtuvuse ja baromeetrilise efektiivsuse alusel arvatud poorsust saab käsitleda kui kontrollparameetrit, mis võimaldab hinnata eelnevate parameetrite määramistäpsust. Liiga suured või väikesed poorsuse väärtused O_1 komponendi suhtes tulenevad eelkõige ebatäpsustest kihi eriveemahtuvuse määrangutel.

Päevase sagedusega lunaarse komponendi O_1 suhtes arvatud põhjaveekihi eriveemahtuvuse ning poorsuse väärtuste suurem varieeruvus ja kohatine ebakõla varasemate hinnangutega võib tuleneda ebatäpsustest põhjavee tasemete harmoonilisel analüüsil. Vaadates harmoonilise analüüsi tulemuste graafikuid (Joonis 9) on näha palju suure amplituudiga komponente madalamatel sagedustel. Suure-amplituudilised väärtused harmoonilise analüüsi madalatel sagedustel võivad tuleneda päevade või nädala pikkustest aperiodilistest atmosfääri rõhu kõikumistest (Merrit, 2004). Nähtavad aperiodilised kõikumised võivad osaliselt langeda

kokku O_1 komponendi sagedusega ning põhjustada tegelikust suuremat veetaseme kõikumise amplituudi. Samuti tuleb antud väärtuste puhul arvestada, et osad kaevud asuvad rannikule ning potentsiaalselt põhjaveekihi avamusele väga lähedal ning võivad olla mõjutatud merevee harmoonilistest liikumisest. Samas on M_2 komponendi suhtes saadud eriveemahtuvuse väärtused rannikuäärsetel kaevudel sarnased nendega, mis asuvad kaugemal sisemaal ning pole mõjutatud mereveelistest efektidest. Seega võib eeldada, et mereveetasemete harmooniliste kõikumiste mõju rannikulähedastele kaevudele on tühine või puudub.



Joonis 9. Harmoonilise analüüsi tulemus puurkaevu 172 andmetel.

Edaspidiste uuringute käigus tuleks leida meetodeid, mis vähendaksid maa-loodetest mitte sõltuvaid perioodilisi ja aperioidilisi veetaseme muutusi põhjaveekihis, et vähendada harmoonilisel analüüsil madalama sagedusspektri suurt müra. Näiteks tuleks võrrelda erinevatel mõõtesagedustel ning seireperioodidel kogutud andmetele tehtud harmoonilisi analüüse, et näha erinevate seiremeetodite mõju andmete tulemustele.

Mõõdetud mereveetasemete põhjal valemiga 16 arvutatud ning kaevuga avatud tegeliku põhjavee taseme võrdlemisel kalibreeritud rõhujuhtivuse väärtused on poolteist suurusjärku suuremad kui antud piirkonnas tehtud pumpamiskatsetel saadud tulemused. Suurusjärku võrra suuremad väärtused on saadud ka teise meetodiga, mis hindab merevee impulsi ajalisi hilinevust vaadeldavasse kaevu (Valem 20). Samas kui vaadata impulsi hilinevuse meetodiga saadud põhjaveekihi eriveemahtuvuse S_s väärtusi, mis on leitud kasutades varasemate uuringutega saadud K väärtustel, siis võib saadud rõhujuhtivuse väärtuste tulemusi pidada võrreldavateks antud töös maa-loodete M_2 komponendi põhjal arvutatud ning eelnevate uuringute käigus saadud resultaatidega. Seega võib öelda, et impulsi hilinevuse meetodiga

arvutatud rõhujuhtivuse tulemused on paremad kui tegeliku ning merevee tasemete põhjal prognoositud põhjavee taseme võrdlemisel saadud.

Suured erinevused arvutatud rõhujuhtivuse tulemustes kahe kasutatud meetodi vahel jäävad antud töö käigus selgusetuks. Arvutatud ja tegeliku veetaseme kõvera võrdlemisel saadud poolteist kuni kaks suurusjärku suuremate väärtuste tulemuste juures võib oluliseks teguriks olla matemaatilise algoritmi ebasobivus, või vale ja ebapiisav andmetöötlus enne arvutamist. Impulsi hilinemise meetodiga arvutatud tulemused on puurkaevu 509 ja 16557 puhul võrreldavad varasemate uuringute ning antud töös maa-loodetega arvutatud eriveemahtuvuse väärtustega. Puurkaevu 158 andmetest saadud väärtused erinevad varasematest tulemustest mõned korrad. Puurkaevu 157 puhul jäävad rõhujuhtivuse väärtused ühe suurusjärgu võrra suuremateks varasemate uuringute tulemustest. Eelnevalt käsitletud meetoditega saadud rõhujuhtivuse väärtuste juures tuleb ka meeles pidada, et antud väärtused on arvutatud ligikaudsete kaevu ja veekihi avamuste vahelise vahekauguse põhjal. Kui puurkaevu 509 ning 16557 puhul on määratud kaugusvahemiku intervallis impulsi hilinemise meetodiga saadud väärtused ligilähedased varasemate hinnangutega, siis kahe põhjapoolsema kaevu (157 ja 158) korral see nii ei ole. Puurkaevude 157 ja 158 puhul võib oletada, et suuremad rõhujuhtivuse väärtused tulenevad ebatäpsustest põhjaveekihi avamuse ja kaevude vaheliste kauguste hindamisel. Viimati mainitud puurkaevude puhul on võimalik, et vahemaad kihi avamuse ja kaevude vahel on väiksemad kui antud töös välja pakutud. Antud järeldust kinnitab ka asjaolu, et puurkaevu 509 ja 158 puhul saadud impulsi hilinemise aeg on tasemekõverate ristkorrelatsioonil saadud sama, kuid hinnatud vahekaugused on erinevad.

Antud töö tulemustest võib järeldada, et maa-loodetest põhjustatud veetasemete kõikumiste põhjal, on võimalik arvutada Kambrium-Vendi põhjaveekihtide eriveemahtuvuse ning poorsuse väärtusi. Ligilähedaste tulemuste saamine varasematel petrofüüsikalistel uuringutel ning pumpamiskatsetel tõestavad, et harmoonilise komponendi M_2 komponendi alusel saadud väärtused on kasutatavad edasistes hüdrokeoloogilistes uuringutes. Ettevaatlikkusega tuleb suhtuda aga harmoonilise komponendi O_1 põhjal saadud poorsuse ja kihi eriveemahtuvuse väärtustesse, pidades silmas arvutustel saadud väga ebaühtlaseid ning kohati varasemate uuringutega mitte kokku langevaid tulemusi.

Töö käigus saadud rõhujuhtivuse väärtuste põhjal võib eeldada, et merevee impulsi hilinemist arvestav meetod on sobilik antud parameetri hindamiseks. Samas tuleb nentida, et antud meetodi puhul on vajalik põhjaveekihi avamuse ning kaevude vahelise distantssi täpsustamine,

mis antud töös näib kohati olevat hinnatud liiga suureks. Meetodit, mis hindab veekihi rõhujuhuvust võrreldes tegelikku ning merevee taseme kõikumistest arvutatud veetaset kaevus, ei saa pidada piisavalt täpseks ning vajab täiendavaid uuringuid.

Kokkuvõte

Antud töö eesmärgiks oli hinnata hüdrogeoloogilise üksuse hüdraulilisi parameetreid, kasutades selleks looduslikult esinevaid mõjusid põhjaveekihi veetasemele. Parameetrite leidmiseks kasutati meetodeid, mis sidusid omavahel maa-loodete, õhurõhu ja mereveetaseme kõikumised ning nende mõjutustest tekkivaid põhjaveetaseme muutusi. Andmeid koguti Viimsi poolsaarel asuvatest puurkaevudest, mis avavad Kambrium-Vendi põhjaveekompleksi. Arvutuste käigus hinnati antud veekompleksi eriveemahtuvust, poorsust, rõhujuhtivust ning seiratud kaevude baromeetrilist efektiivsust.

Tehtud uuringute ning arvutuste põhjal võib tuua järgmised järeldused:

- 1) Maa-loodete põhjal arvatud Kambrium-Vendi põhjaveekompleksi eriveemahtuvused ning poorsused on võrreldavad varasemate pumpamiskatsete ning põhjavee varude hindamisel saadud tulemustega.
- 2) Harmoonilise loodelise komponendi M_2 põhjal arvatud veekihi poorsuse ning eriveemahtuvuse väärtused varieeruvad vähem kui O_1 põhjal saadud.
- 3) Rannikul asuvates Kambrium-Vendi veekihti avavates puurkaevudes on jälgitavad meretaseme kõikumisest tulenevad survetaseme kõikumised (amplituudiga kuni 40% meretaseme kõikumisest), mida saab kasutada veekihi rõhujuhtivuse määramiseks.
- 4) Järgnevate uuringute käigus tuleks võrrelda erinevate mõõteintervallide ning mõõteperioodi pikkustega andmestikke, et vähendada loodetest mittetulenevate komponentide mõju harmoonilise analüüsi madalama sagedusega spektriosale.
- 5) Kambrium-Vendi põhjaveekihi avamuse kaugust seda avavatest kaevudest tuleb täiendavate uuringute käigus täpsustada.
- 6) Meetodit, mis hindab veekihi rõhujuhtivust, kasutades tegeliku ning arvatud kaevuvee tasemete võrdlust, ei anna piisavalt täpseid tulemusi ning vajab järgnevate uuringute käigus täpsustamist.

Summary

The aim of current master's thesis was to estimate the aquifer hydraulic parameters using only naturally occurring physical stresses that affect the water table in the aquifer. The methods used in this work were based on the relations between earth-tides, atmospheric pressure, sea water levels and water table fluctuations in aquifers. The data were gathered from wells that open the confined Cambrian-Vendian aquifer system on the Viimsi peninsula, Estonia. During calculations the barometric efficiency of studied wells and the specific storage, porosity and diffusivity of given aquifer were assessed.

The main conclusions of the thesis are:

- 1) The specific storage and porosity values calculated from earth-tides are comparable with the results of earlier pumping tests and evaluation of water resources of the given area.
- 2) Porosity and specific storage values calculated with the harmonic tide component M_2 vary less than the results with O_1 .
- 3) Fluctuations in water table of the aquifer caused by the changes in sea level are traceable and can be used to determine the diffusivity of Cambrian-Vendian aquifer.
- 4) Data sets with different measure periods and sample intervals should be compared, to see if it would reduce the effect of non-tidal fluctuations to the lower spectra of the harmonic analysis.
- 5) The distance between the outcrop of the Cambrian-Vendian aquifer and the used wells should be clarified with additional geological research.
- 6) The method for calculating hydraulic diffusivity, that uses comparison of the measured and sea level based calculation of aquifer water levels, does not give accurate results and must be adjusted in future research.

Tänuavaldused

Tahaksin tänada Mailet, kes oli abiks andmete kogumisel ning heaks nõu andjaks igal hetkel. Samuti tänan Joonast ja Siimu koostöö eest ning Eesti Geoloogia Teenistust, kes oma logeritega andmete kogumist toetas. Siiralt tänulik olen Arne Tõugjasele, kes tagas ligipääsu puurkaevudele ning kogu AS Viimsi Veele, võimaldamast nende kaevudest andmeid koguda. Samuti tänan kõiki teisi puurkaevude omanikke, kust andmeid kogutud sai.

Ja muidugi tänan ka oma juhendajat Argot, kelle suurepärasest mõttest asi alguse sai ning tänu kellele olen ma väga paljude kogemuste võrra rikkam.

Kasutatud kirjandus

Arold, I. 2005. Eesti maastikud. Tartu Ülikooli Kirjastus, Tartu.

Bear, J. 1979. Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, New York.

Bredehoeft, J. D. 1967. Response of well-aqifer systems to earth tides. *Journal of Geophysical Research.*, 72(12): 3075-3087.

Clark, W.E., 1967, Computing the barometric efficiency of a well. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers.*, 93(4):93-98.

Courtney, E., Courtney, M. 2015. A more accurate Fourier transform. arXiv:1507.01832

Davis, J. C. 1986. Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons, New York.

Dong, L., Chen, J., Congsheng, F., Huabo, J. 2012. Analysis of groundwater-level fluctuation in a coastal confined aquifer induced by sea-level variation. *Hydrogeology Journal.*, 20: 719-726.

Fetter, C. W. 2001. Applied Hydrogeology. Prentice-Hall Inc, New Jersey.

Freeze, R. A., Cherry, J. A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall.

Furbish, D. J. 1991. The response of water level in a well to a time series of atmospheric loading under confined conditions. *Water Resources Research.*, 27(4): 557-568.

Hammer, O. 2018. Past, paleontological statistics, reference manual. University of Oslo.

Hsieh, P. A., Bredehoeft, J. D., Farr, J.M. 1987. Determination of aquifer transmissivity from earth tide analysis. *Water Resources Research.*, 23(10): 1824-1832.

Jõeleht, A., Kirsimäe, K., Shogenova, A., Šliaupa, S., Kukkonen, I.T., Rasteniene, V., Zabele, A. 2002. Thermal conductivity of Cambrian siliclastic rocks from the Baltic basin. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Geology.*, 51(1): 5-15.

Jõeleht, A., Kukkonen, I. T. 2002. Physical properties of Vendian to Devonian sedimentary rocks in Estonia. *GFF.*, 124(2): 65-72.

Marine, I. W. 1975. Water level fluctuations due to earth tides in a well pumping from slightly fractured crystalline rock. *Water Resources Research.*, 11(1): 165-173.

- Merrit, M. L. 2004. Estimating hydraulic properties of the Floridan aquifer system by analysis of earth-tide, ocean-tide, and barometric effects, Collier and Hendry counties, Florida. U.S. Geological Survey, Tallahassee, Florida.
- Munk, W.H., McDonald, G.J.F. 1960. The rotation of the earth: London, Cambridge University Press.
- Rahi, K., Halihan, T. 2009. Estimating selected hydraulic parameters of the Arbuckle-Simpson aquifer from the analysis of naturally-induced stress. Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
- Raidla, V., Kirsimäe, K., Vaikmäe, R., Jõelet, A., Karro, E., Marandi, A., Savitskaja, L. 2009. Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian-Vendian aquifer system of the Baltic Basin. *Chemical Geology.*, 258: 219-231.
- Rasmussen, T. C., Crawford, L. A. 1997 Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers. *Ground Water.*, 35(3): 502-511.
- Raukas, A., Teedumäe, A. (eds). 1997. *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn.
- Savitskaja, L., Savva, V. 2008. Viimsi valla põhjaveevaru optimaalne kasutusvariant. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.
- Savitski, L., Savva, V. 1994. Kambrium-Vendi veekompleksi põhjavee tarbevaru ümberhindamine Tallinnas. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn. EGF 4784.
- Savitski, L., Viigand, A., Belkina, V., Jaštšuk, S., 1993. Põhjaveevaru hinnang Tallinna veehaaretel. Põhjavee otsing Tallinna ja ümbruse veevarustuseks. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn. EGF 4652.
- Shogenova, A., Sliupa, S., Vaher, R., Shogenov, K., Pomeranceva, R. 2009. The Baltic Basin: structure, properties of reservoir rocks, and capacity for geological storage of CO₂. *Estonian Journal of Earth Sciences.*, 58(4): 259-267.
- Suuroja, K., All, T., Kaljuläte, K., Kõiv, M., Morgen, E., Ploom, K. 2003. Baaskaardi Tallinna (6334) ja Rohuneeme (7312) lehe geoloogilis-geofüüsikalise kaardikomplekti koostamine ja digitaalse andmebaasi loomine. Aruanne. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.

Suuroja, K., All, T., Kõiv, M., Mardim, T., Morgen, E., Ploom, K., Vahtra, T., 2002. Eesti geoloogiline baaskaart (mõõtkavas 1:50 000). 6343 Maardu. Seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.

Tamm, I., 1998. Tallinna piirkonna Kambriumi–Vendi veekompleksi tarbevaru ümberhindamine kuni aastani 2030. AS Maves, Tallinn. EGF 6154.

Vatalin, I., 1998. Loo aleviku ja ümbruse Ordoviitsiumi–Kambriumi ja Kambriumi–Vendi veekomplekside põhjaveevaru hinnang. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn. EGF 6079.

Keskkonnaagentuur. 2018. Mereveetasemed Rohuneeme seirejaamast.

Maa- amet. 2013. Geoloogiline baaskaart.

Van Essen Instruments. 2017. Product manual.

Veeteede- amet. 2018. WMS- teenus. <http://his.vta.ee:8080/HIS/WMS> [28.05.2018]

Lisa 1. Kaevude andmete ning arvutatud parameetrite koondtabel

Kat. nr.	Sügavus (m)	Laiuskraad (°)	Pikkuskraad (°)	Avatud intervall H (m)		b	f(θ)	A ₂ (τ) (m ² /s ²)	A _h (τ) (m)	S _s (m ⁻¹)	α (%)	n (%)	S=S _s ·H
179	90	59,500152	24,897969	33,1	O ₁	0,377	0,437	0,867	0,0015	4,5·10 ⁻⁶	46	44	1,5·10 ⁻⁴
					M ₂	0,908	0,129	0,615	0,0017	2,9·10 ⁻⁶	46	28	9,6·10 ⁻⁵
157	120	59,541598	24,798343	55,0	O ₁	0,377	0,437	0,866	0,0026	2,6·10 ⁻⁶	41	23	1,4·10 ⁻⁴
					M ₂	0,908	0,129	0,613	0,0016	3,0·10 ⁻⁶	41	26	1,7·10 ⁻⁴
158	110	59,521848	24,807410	38,8	O ₁	0,377	0,437	0,866	0,0020	3,3·10 ⁻⁶	39	28	1,3·10 ⁻⁴
					M ₂	0,908	0,129	0,614	0,0016	3,1·10 ⁻⁶	39	25	1,2·10 ⁻⁴
187	70	59,555481	24,796219	18,7	O ₁	0,377	0,437	0,866	0,0052	1,3·10 ⁻⁶	40	11	2,4·10 ⁻⁵
					M ₂	0,908	0,128	0,613	0,0016	3,0·10 ⁻⁶	40	26	5,6·10 ⁻⁵
509	75	59,509671	24,815848	15,0	O ₁	0,377	0,437	0,867	0,0038	1,8·10 ⁻⁶	39	15	2,7·10 ⁻⁵
					M ₂	0,908	0,129	0,615	0,0018	2,7·10 ⁻⁶	39	22	4,1·10 ⁻⁵
14310	124	59,494621	24,882164	34,0	O ₁	0,377	0,437	0,615	0,0039	1,7·10 ⁻⁶	43	16	5,8·10 ⁻⁵
					M ₂	0,908	0,129	0,867	0,0015	3,3·10 ⁻⁶	43	30	1,1·10 ⁻⁴
16557	110	59,546781	24,875984	30,0	O ₁	0,377	0,437	0,866	0,0047	1,5·10 ⁻⁶	37	11	4,5·10 ⁻⁵
					M ₂	0,908	0,128	0,613	0,0013	3,7·10 ⁻⁶	37	30	1,1·10 ⁻⁴
172	136	59,523528	24,850341	41,4	O ₁	0,377	0,437	0,866	0,0047	1,5·10 ⁻⁶	71	22	6,2·10 ⁻⁵
					M ₂	0,908	0,129	0,614	0,0027	1,8·10 ⁻⁶	71	27	7,5·10 ⁻⁵
188	90	59,561238	24,805211	18,9	O ₁	0,377	0,437	0,866	0,0057	1,2·10 ⁻⁶	40	10	2,3·10 ⁻⁵
					M ₂	0,908	0,128	0,613	0,0016	3,1·10 ⁻⁶	40	26	5,9·10 ⁻⁵
412	156	59,500361	24,841871	12,9	O ₁	0,377	0,437	0,867	0,0016	4,2·10 ⁻⁶	38	35	5,4·10 ⁻⁵
					M ₂	0,908	0,129	0,615	0,0013	3,8·10 ⁻⁶	38	31	4,9·10 ⁻⁵

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Raul Paat

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Põhjaveekihi hüdrauliliste parameetrite määramine kasutades maa-loodete, õhurõhu ning meretaseme muutumistest põhjustatud kõikumisi põhjaveetasemetes“, mille juhendaja on Argo Jõelet,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni,

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile,

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi,

Tartus 31.05.2018