

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Rain Kärner

**VÄIKESE TARBIMISEGA PUURKAEVUDE MÕJU
SÕLTUVUS PÕHJAVEEKIHTIDE
HÜDRODÜNAAMILISTEST PARAMEETRITEST EESTIS**
Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: PhD Andres Marandi

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Tartu 2013

SISUKORD

| | |
|---|----|
| SISSEJUHATUS..... | 3 |
| 2. PÕHJAVEE VOOLAMINE PINNASTES..... | 4 |
| 2.1. Põhimõisted..... | 4 |
| 2.2. Veekihi hüdrauliliste parameetrite määramine pumpamiskatsete põhjal..... | 5 |
| 2.2.1. Statsionaarne voolamine..... | 6 |
| 2.2.2. Mittestatsionaarne voolamine | 8 |
| 3. METOODIKA..... | 3 |
| 3.1. Põhjaveetaseme alanduse kujunemine | 10 |
| 3.2. Absoluutse mõjuraadiuse arvutamine ja interpretatsioon..... | 11 |
| 3.3. Alanduse sõltuvus õhurõhust ning alandus suurusega 10 cm. | 12 |
| 3.4. Lisaeldused ning põhjendused | 13 |
| 4. PÕHJAVEEKIHTIDE KIRJELDUSED..... | 14 |
| 4.1. Eesti põhjaveekihid | 14 |
| 4.2. Kvaternaari põhjaveekompleks | 14 |
| 4.3 Aluspõhja veekompleksid | 16 |
| 4.3. Filtratsioonikoefitsiendi väärtuse tõlgendamine..... | 19 |
| 5. TULEMUSED..... | 21 |
| 5.1. Kesk-Devoni põhjaveekompleks (D_2)..... | 21 |
| 5.2. Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleks (D_{2-1}) | 24 |
| 5.3. Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekompleks (S-O) | 27 |
| 5.4. Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleks (O-Cm) | 30 |
| 5.5. Kambriumi-Vendi põhjaveekompleks (Cm-V)..... | 37 |
| 5.5.1. Voronka (V_{2vr}) ja Gdovi (V_{2gd}) põhjaveekihid..... | 39 |
| 6. JÄRELDUSED JA ARUTELU..... | 41 |
| 6.1. Pumpamise mõju sõltuvus hüdrogeoloogilistest parameetritest..... | 41 |
| 6.2. Pumpamise mõju erinevate põhjaveekihtide läbilõikes | 42 |
| KOKKUVÕTE..... | 44 |
| VIIDATUD ALLIKAD..... | 46 |
| SUMMARY..... | 48 |

SISSEJUHATUS

Käesoleva töö eesmärkideks on arvutada Eestis rajatavate tüüpiliste erapuurgaevude tekitatavad mõjuraadiused ning leida mõjuraadiuste ulatuse sõltuvus põhjaveekihi veejuhtivusparameetritest. Samuti arvutada pumpamise mõju levi kiirus erineva veejuhtivuse ja veemahtuvusega põhjaveekihtides ning anda üldine kirjeldus Eesti põhjaveekihtide hüdrogeoloogilistest parameetritest.

Kõikidel suurematel veehaaretel on vaja vee erikasutusluba. Lähtudes Veeseaduse §8 lõikest 2 (Veeseadus, 1994), ei ole vee erikasutusluba vaja, kui võetakse vett vähem kui 5 m³ ööpäevas. Enamikel erapuurgaevudel jääb veevõtt alla 5 m³ ööpäevas ning ei ole täpselt teada, kui ulatuslikke tagajärgi need erinevates veekihtides põhjustavad. Samas on KKM oma määruses (KKM määrus nr 37) sätestanud, et puurkaev ja -auk ei tohi põhjustada põhjavee seisundi halvenemist ega avaldada negatiivset mõju läheduses asuvatele puurkaevudele ja -aukudele, maakasutusele ning veeökosüsteemidele.

Erapuurkaevudest pumpamise tekitatavate mõjuraadiuste arvutamiseks on oluline teada pumbatava põhjaveekihi lasumistingimusi ning hüdraulilisi parameetreid. Seda põhjusel, et erinevatel tingimustel ja erinevatest kihtidest pumpamisel on puurkaevude mõju ümbritsevale erinev.

Töö on oluline, kuna teades pumpamise mõju ulatust lähtuvalt konkreetsetest hüdrogeoloogilistest tingimustest, on puurkaevu projekteerides võimalik hinnata selle mõju põhjaveele ja keskkonnale.

2. PÕHJAVEE VOOLAMINE PINNASTES

2.1. Põhimõisted

Lõputöös on teemade käsitlemisel kasutatud rida spetsiifilisi mõisteid, mis teksti paremaks arusaamiseks on järgnevalt defineeritud (Kruseman, 1994):

- veekiht– poorne, tahke materjali kiht, mis on veega küllastunud ning kus vesi saab vabalt voolata;
- surveta ehk vabapinnaline põhjaveekiht– kõige ülemine, vabapinnaline põhjaveekiht;
- survealine põhjaveekiht– veekiht, mis paikneb kahe veepideme vahel. Kihi poorid on veega küllastunud ning vesi on surve all (põhjavee survetase asub veekihi ülemisest piirist kõrgemal);
- veepide–poorne tahke materjali kiht, mis võib olla küll veega küllastunud, kuid vesi ei pääse suletud ja/või liialt väikeste pooride tõttu liikuma, või teeb seda väga aeglaselt;
- depressioonilehter–pumpamise tagajärjel puurkaevu ümber tekkiv põhjavee taseme või survetaseme lehterjas alandus;
- filtratsioonikoefitsient K –näitab vahemaad, mida on vesi võimeline poorses keskkonnas ajaühikus läbima (m/d), arvestamata kihi paksust;
- põhjaveekihi veejuhtivus (*transmissivity*) T – näitab, kui palju vett saab kihis horisontaalselt ajaühikus edasi kanduda (m^2/d - ruutmeetrit ööpäevas);
- põhjaveekihi veemahtuvuskoefitsient (*storage coefficient/storativity*) S –näitab vee mahtu, mida veekiht suudab väljutada vee paisumise või pooriruumi vähenemise kaudu, jäädes ise veega küllastunuks;

2.2. Veekihi hüdrauliliste parameetrite määramine pumpamiskatsete põhjal

Pumpamiskatsetega saab määrata põhjaveekihi hüdraulilisi parameetreid. Pumpamiskatsetel pumbatakse konstantsel hulgal kaevust vett ning samal ajal jälgitakse lähedal asuvates vaatluskaevudes põhjaveetasemete muutusi (depressioonilehtri kujunemist). Katsetel kogutud andmeid kasutatakse veekihi hüdrauliliste parameetrite arvutamisel.

Darcy seadusest tuletatuna on vee voolamine veekihi läbi ringikujulise ala (kaevu) võrdne ringikujulise sektsiooni pindala ($2\pi rb$ – klassikaline silindri külgpindala leidmise valem), veekihi hüdraulilise juhtivuse K ja hüdraulilise gradiendi korrutis. Hüdrauliline gradient on veetaseme muutus radiaalsel kaugusel kaevust dh/dr . (Fetter, 2001)

$$Q = (2\pi rb)K \frac{dh}{dr} \quad (2.1)$$

Selleks, et teha põhjavee pumpamiskatsete mõõtmistulemuste põhjal erinevaid parameetrite arvutusi ning anda hinnangut pumpamise mõju leviku kiirusest, kasutatakse analüütilisi meetodeid, mille puhul tehakse rida lihtsustavaid eeldusi (Fetter, 2001):

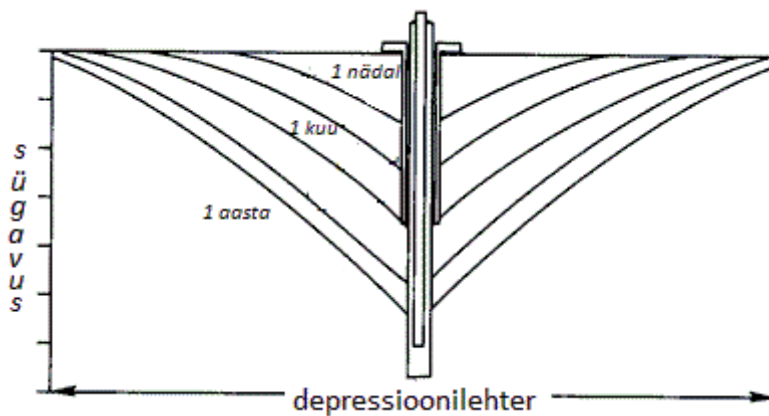
- Veekiht on altpoolt piiratud veepidemega.
- Kõik geoloogilised formatsioonid on horisontaalsed ja kulgevad horisontaalsuunal lõputult kaugele.
- Veetase või põhjavee survetase on enne pumpamise algust horisontaalne.
- Veetase või põhjavee survetase on enne pumpamise algust ajas muutumatu ning hilisema muutumise ainukeseks põhjuseks on pumpamine.
- Veekiht on homogeenne ja isotroopne.
- Põhjavee voolamine puurkaevu on radiaalne.
- Põhjavee voolamine on horisontaalne.
- Darcy seadus kehtib.
- Põhjaveel on konstantne tihedus ja viskoossus.

- Pumbatav kaev ja vaatluskaevud läbistavad ja avavad kogu põhjaveekihi.
- Pumbatav kaev on 100% efektiivne ning kaevul on lõpmata väike diameeter.

Kuigi reaalsete katsete puhul kõik üleval loetud tingimused ei kehti, on tulemused siiski enamasti kasutatavad ning vaid harva juhtub, et vead muutuvad liiga suureks (Theis, 1935).

2.2.1. Statsionaarne voolamine

Kaevust vee pumpamisel tekib selle ümber depressioonilehter (Joonis 2.1), mis edasisel pumpamisel järjest laieneb.



Joonis 2.1. Depressioonilehtri laienemine ajas (Kansas Ground Water 1993 järgi)

Kui aga depressioonilehtri serv jõudnud mingi vee allikani, siis laienemine peatub ja süsteemis on tekkinud tasakaal, mis tähendab, et juurdetuleva vee maht võrdub väljapumbatava vee mahuga. Sellisel juhul on tegemist statsionaarse voolamisega.

Statsionaarne radiaalne voolamine survekeses veekihis

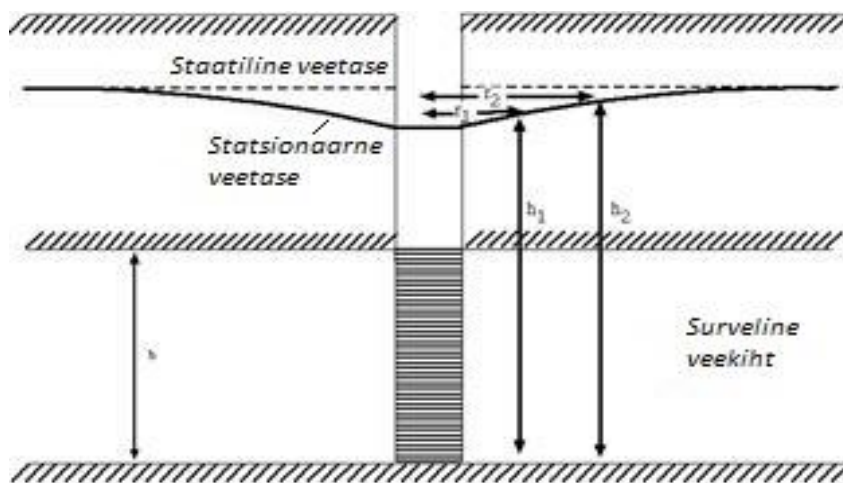
Survelise kihi puhul on vajalikud mõningad lisaeldused (Fetter, 2001):

- Veekiht on ülevalt ja alt ümbritsetud veepidemetega.
- Pumbatakse konstantsel hulgal.
- On saavutatud tasakaal (depressioonilehter ei muutu ajas).

Statsionaarset radiaalset voolamist survekeses veekihtis kirjeldab Thiemi võrrand (Joonis 2.2):

$$T = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.2)$$

kus T on kihi veejuhtivus, Q on pumbatava vee hulk, h_2 on veetase kaugusel r_2 ja h_1 veetase kaugusel r_1 ; r_1 ja r_2 on kaugused pumbatavast kaevust, kusjuures alaindeks 1 tähendab lähemal asuvat vaatluskaevu.



Joonis 2.2. Thiemi võrrandi illustratsioon (Fetter 2001 järgi)

Kui pumpamisel jõutakse tasakaalulise seisundini, siis mõõdetakse veetasemed mõlemas vaatluskaevus, mis asuvad pumbatavast kaevust erinevatel kaugustel. Pumbatava vee mahu ning teatud kaugustel mõõdetud veetasemete põhjal määratakse ülaltoodud valemi (Valem 2.2) põhjal kihi veejuhtivus. Oluline on tähele panna, et Thiemi valem ei sisalda veekihi väga olulist parameetrit - veemahtuvuskoefitsienti. Seda põhjusel, et statsionaarsetel tingimustel ei esine vee koguse muutusi pinnases, kuna kõik väljapumbatav vesi asendatakse lõpmata kaugel asuval piiril sissevoolava veega. Seega ei saa Thiemi valemit kasutada põhjaveekihi veemahtuvuse määramiseks. (Fetter, 2001)

Statsionaarne radiaalne voolamine surveta põhjaveekihis

Kehtivad samad lisaolettused, mis surveleise kihi puhul, ainult esimeses punktis kirjeldatud veepide asub ainult veekihi all (Fetter, 2001). Siinkohal kehtib samuti Thiemi tuletatud võrrand:

$$K = \frac{Q}{\pi(b_2^2 - b_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.3)$$

kus K on veekihi filtratsioonikoefitsient ning b_1 ja b_2 vastavalt veekihi paksused kaugustel r_1 ja r_2 .

2.2.2. Mittestatsionaarne voolamine

Paljudes pumpamiskatsetes ei jõuta tasakaalulise olekuni. See tähendab, et depressioonilehter jääb ajas kasvama. Sellist olukorda nimetatakse mittestatsionaarseks seisundiks. Depressioonilehtri kuju muutuse analüüsil ajas, kui lisaks pumbatavale kaevule on olemas ka vaatluskaev, saab määrata nii kihi veejuhtivuse kui ka veemahtvuskoeffitsiendi. Vaatluskaevu puudumisel saab määrata ainult kihi veejuhtivust nagu Thiemi valemi puhulgi statsionaarse voolamise tingimustes. (Fetter, 2001)

Mittestatsionaarne radiaalne voolamine surveleises veekihi

Antud tingimustes on veekihi parameetrite määramiseks mitmed meetodid. Käesolevas töös käsitleme Theisi meetodit. Arvutustel kehtivad samad eeldused, mis statsionaarse voolamise puhul surveleises veekihi.

Depressioonilehti kujunemise matemaatilisel analüüsimisel mittestatsionaarsetes tingimustes jõudis Theis valemieni:

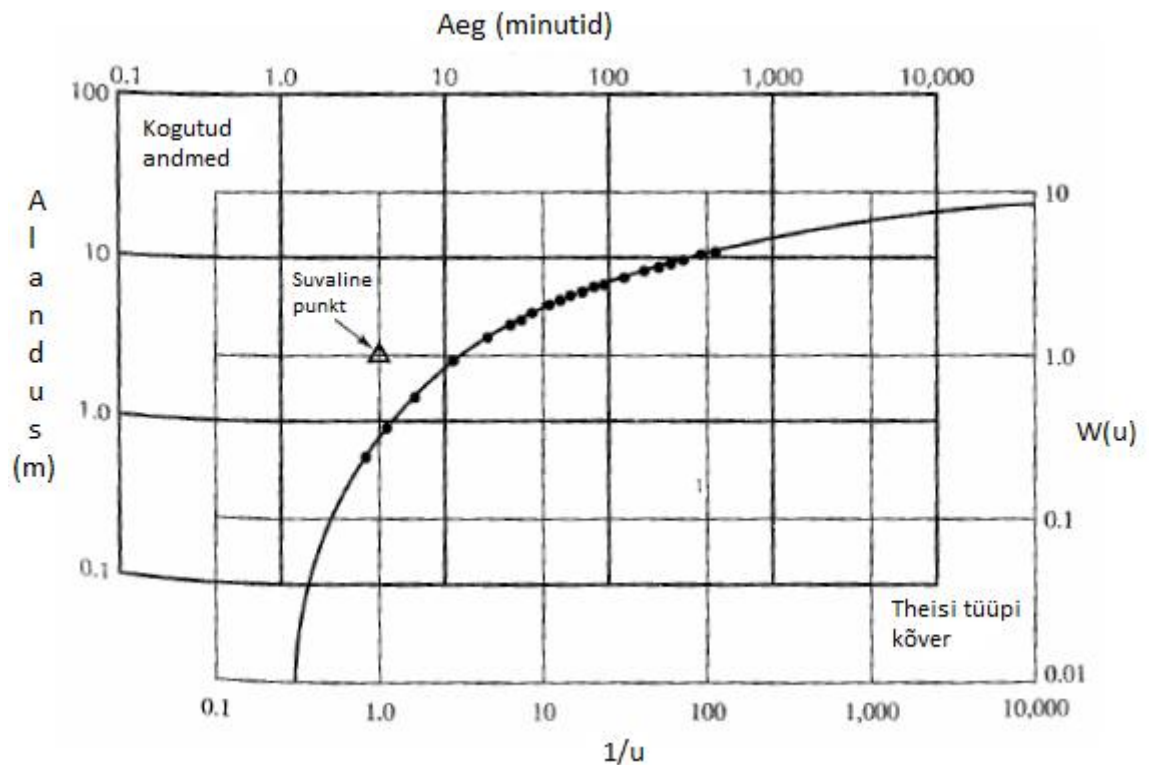
$$T = \frac{Q}{4\pi(h_0 - h)} W(u) \quad (2.4)$$

kus $W(u)$ on kaevu funktsioon $1/u$ -st. Argument u on antud valemiga:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2.5)$$

Antud valemist saab avaldada ka põhjaveekihi veemahtvuskoeffitsiendi S .

Theis töötas oma valemitele välja graafilised lahendused. Kõigepealt näeb see ette $W(u)$ -st kui kaevu funktsioonist $1/u$ joonise tegemist. Joonis omab depressioonilehtri kuju ning seda kutsutakse Theisi tüüpi kõveraks. Samuti tuleb teha joonis pumpamiskatsel mõõdetud veetaseme langusest h_0-h vaatluskaevus funktsioonina ajast t . Saadud kaks joont ühendatakse nii, et jooniste teljed jäävad paralleelseks ning valitakse suvaline punkt joonisel (Joonis 2.3). Sellest punktist saab määrata nii $W(u)$, $1/u$, h_0-h ja t . Saadud väärtused asendatakse valemisse (Valem 2.4) ja arvutatakse kihi veejuhtivus T . Teades kihi veejuhtivust, saab teise valemi kaudu (Valem 2.5) leida põhjaveekihi veemahtvuse. (Fetter, 2001)



Joonis 2.3. Graafiline lahend Theisi meetodile (Fetteri 2001 järgi)

3. METOODIKA

3.1. Põhjaveetaseme alanduse kujunemine

Käesolevas töös on kõik arvutused tehtud mittestatsionaarse radiaalse voolamise tingimustes survekeselise veekihi, kuna see annab veetarbimise maksimaalse mõju, sest ei eelda mingit põhjaveekihi lisatoitumist. Alanduse arvutamiseks on kasutatud Theisi (1935) tuletatud valemeid (Valemid 2.4 ja 2.5).

Kaevu funktsioon (Valem 2.5), või teisisõnu selle eksponentsiaalne integraal on saadud järgmisest seeriast (Bear, 1979):

$$W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2} * 2! + \frac{u^3}{3} * 3! - \frac{u^4}{4} * 4 + \dots$$

Väikeste väärtuste korral, kui $u < 0,001$ (vaatluse all olevatel tingimustel see nii ka on) on võimalik tuletada üldistatud valem, mida on käesolevas töös kasutatud kaevust väljapoole jäävate alanduste arvutamiseks (Bear, 1979):

$$S_v = \frac{Q}{4\pi Km} \times \ln \frac{2,25at}{r^2} \quad (2.6)$$

Kuna Beari (1979) üldistatud valem käsitleb ainult kaevust väljapoole jäävaid alandusi, siis on sarnaseid üldistusi tehes tuletatud ka valem, millega on sobilik arvutada kaevus sees tekkivaid alandusi (Бочевер, 1968):

$$S_E = \frac{Q}{4\pi Km} \times \ln \frac{6,12at}{r_0^2} \quad (2.7)$$

Kus S_v on alandus (m) kaugusel r (m) kaevust,

S_E on alandus (m) kaevus,

r_0 on kaevu raadius (m),

Q on välja pumbatava vee hulk (m^3/d),

K on filtratsioonikoefitsient (m/d),

m on kihi paksus (m),

a on piesojuhtivus (m^2/d),

t on aeg kaua pumpamine on kestnud (ööpäeva (d)).

Kihi veemahtuvuskoeffitsient S on avaldatav valemiga (Cherry & Freeze, 1979):

$$S = \frac{T}{a} \quad (2.8)$$

kui on teada lisaks kihi veejuhtivusele ka piesojuhtivus a . Antud valemit on töös kasutatud Kambriumi-Vendi (sealhulgas Voronka ja Gdovi) veemahtuvuskoeffitsiendi S leidmiseks.

3.2. Absoluutse mõjuraadiuse arvutamine ja interpretatsioon

Absoluutsete mõjuraadiuste arvutamiseks on töös kasutatud valemit (Bear, 1979):

$$R = 1,5 \sqrt{\frac{T \times t}{S}} \quad (2.9)$$

kus t on aeg (d), T on kihi veejuhtivus (m^2/d) ja S on veemahtuvuskoeffitsient.

Valemi ees olev koeffitsient 1,5 võib varieeruda vahemikus 1,5-4,3 (Bear, 1979). Antud töös lähtume koeffitsiendi väärtusest 1,5, mis on levinuim.

Pumpamise absoluutsete arvutuslike mõjuraadiuse all peetakse silmas kaugust kaevust, kus tekib mingisugunegi alandus vee nulltaseme suhtes. Absoluutsetest mõjuraadiusest kaugemal ei ole veetase mõjutatud vee pumpamisest. See tähendab, et alandus on 0. Kuna absoluutse mõjuraadiuse alla kuulub ka piirkond, kus tekkiv alandus on nii väike kui näiteks 1 mm, mis ei oma keskkonna seisukohalt erilist tähendust, on pumpamise mõju paremaks interpreteerimiseks toodud välja ka mõjuraadius, kus tekib alandus sügavusega 10 cm.

3.3. Alanduse sõltuvus õhurõhust ning alandus suurusega 10 cm.

Väärtus 10 cm on valitud võttes arvesse õhurõhu varieerumisega kaasnevat põhjaveetaseme muutust. Järgnevalt on põhjendatud antud valikut ning selleks leitud õhurõhkude standardhälve.

Õhurõhu muutlikkuse arvutamiseks on kasutatud Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi Tõravere vaatlusjaama andmestikku 2012 aasta seisuga (EMHI). Õhurõhu muutused on esitatud ühe tunnise täpsusega terve 2012 aasta kohta. Väärtused on taandatud merepinna. Andmete analüüsil (Microsoft Excel 2010) saadi 2012. aasta igatunnise õhurõhu standardhälbeks 11,9 hPa.

Kasutades hüdrostaatika valemit (Halliday jt, 2008):

$$p = \rho \times g \times h \quad (2.10)$$

Kus p on õhurõhk (Pa)

g on raskuskiirendus konstant (m/s^2)

h on veetaseme kõrgus (m)

Leian veetaseme kõrguse muutuse Δh , kui õhurõhk muutub 1 hPa:

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho * g} \approx 1 \text{ cm} .$$

Seega õhurõhu standardhälve 11,9 hPa tähendaks veetaseme kõikumist 11,9 cm. Kuna aga baromeetiline efektiivsus (veetaseme ja õhurõhu muutuste suhe) pole alati 100% efektiivne (Fileccia, 2011), siis on ka teatud lihtsust silmas pidades valitud alanduseks 10 cm. Alandus 10 cm on väärtus, mida ei põhjusta enam pelgalt igapäevane õhurõhu muutumine, jättes välja ekstreemsed olukorrad.

3.4. Lisaeeldused ning põhjendused

Lisaks kasutatavate valemite poolt loodud eeldustele kasutatakse käesoleva töö arvutustes puurkaevude rajamisest ning veetasemete mõõtmisest tulenevaid eeldusi:

1. Kaevu diameeter on arvutustes 15 cm;
2. alanduse piir suurusega 10 cm (Valem 2.10);
3. pumbatakse maksimaalselt 5 m³ ööpäevas (Veeseadus, 1994);
4. alandus väikesema tarbimisega kui 10 m³/d puurkaevu hooldusala piiril, ehk 10 m kaugusel kaevust;
5. vett pumbatakse 10 000 ööpäeva vältel, kuna Eestis kehtivate nõuete kohaselt (Põhjaveevaru, 2003) arvutatakse veevarusid 10 000 ööpäeva tarbeks.

Tulemuste kirjeldamisel on arvestatud pumpamise määra 5 m³/d, kui ei ole öeldud teisiti. See väärtus on võetud ka arvutustel aluseks, kuna annab ülevaate veevõtmise suurimast võimalikust mõjust, kui eriluba ei taotleta. Samas ei toimu pumpamine alati maksimaalsel võimalikul määral ning mõistlik on tuua võrdluseks tulemused ka väiksema pumpamise määraga. Enamikel juhtudel on väiksema pumpamise määra korral mõjud piisavalt väikesed, et ei ole otstarbekas kõikide kihtide kohta eraldi arvutusi läbi viia. Seega on välja toodud pumpamise määrad 3 m³/d ja 1 m³/d ainult Ordoviitsiumi-Kambriumi veekompleksi kohta. Seda põhjusel, et Ordoviitsiumi-Kambriumi veekompleksil on väike veejuhtivus ning sellest tulenevalt on veevõtmise mõjud küllaltki suured. Samuti on sellesse veekihti rajatud palju registreerimata puurkaeve, mistõttu vajab see suuremat tähelepanu (Karise jt, 2004).

Kvaternaari põhjavesi esineb enamjaolt pinnaseveena. Pinnasevee probleemiks on selle kerge reostatavus ning sellest tingitud võimalik halb kvaliteet, mistõttu on enamik tarbijaid läinud üle sügavamatele veekihtidele (Perens, 2005). Seeläbi ei ole nende kohta ka arvutusi teostatud. Ühe erandina Kvaternaari põhjaveest, mis leiab suuremat kasutust, võib välja tuua Vasavere ja Meltsiveski glatsiofluviaalsete setete veehaarded, kuid nende kohta puudusid vajalikud andmed. Ülem-Devoni põhjaveekompleks on jäänud suurema tähelepanuta, kuna selle levila on väike ning andmed samuti puudulikud.

4. PÕHJAVEEKIHTIDE KIRJELDUSED

Peatükk on koostatud raamatu „Geology and Mineral Resources of Estonia“ (1997) põhjal, kui ei ole väidetud vastupidist.

4.1. Eesti põhjaveekihid

Eestis kannavad põhjavett settelised pealiskorra kivimid (kristlase aluskorra kivimite põhjaveel praktiline tähtsus puudub, Marandi 2010). Settimine on toimunud pika aja vältel erinevates keskkonnatingimustes ning seetõttu lasub pealiskord kihtidena. Kihid on erineva koostise, struktuuri ja paksusega ning sellest tulenevalt ka erinevate hüdrauliliste omadustega. Kihtide nimetused vastavad nende tekkimise ajastule ning alamnimetused vastavalt asukohale. Kihid on 6-13 minutilise nurga all lõuna poole kaldu (Isakar, 2013). Eesti põhjapoolne osa on allunud geoloogilistele kulutusprotsessidele kauem, millest tulenevalt on Lõuna-Eestis paljanduv paks Devoni liivakivikiht Põhja-Eestis ära kulutatud ja paljanduvad hoopis karbonaatsed kivimid (Marandi, 2010). Seega on ka vett kandev setteline pealiskord Põhja-Eestis tunduvalt õhem.

4.2. Kvaternaari põhjaveekompleks

Kvaternaari setete levik, paksus, koostis ja genees on Eestis suuresti varieeruvad, seega ka veejuhtivus. Suurest veejuhtivuse erinevustest tingituna võivad setted toimida nii veelademe kui ka veepidemena. Järgnevalt ülevaade mõnedest levinuimast Kvaternaari setetest/pinnavormidest Eestis:

Soised pinnased, mida katab peamiselt turvas. Looduslikel tingimustel lasub vesi tavaliselt 0,1-0,5 meetri sügavusel. Turba veejuhtivus on 0,3-1 m/d. Toituvad peamiselt sademetest. Veel on halb kõrvalmaitse ja iseloomulik lõhn ning seetõttu joogiveena praktiliselt ei kasutata.

Tuulesetted, hästi sorteeritud peeneteralised liivad, mis asuvad Eestis peamiselt Läänemere kallastel ja Peipsi järve põhjakaldal. Vesi asub tavaliselt 10-15 m sügavusel ning kaevude tootlikkus ei ületa 1-5 m³/d.

Järvesetted, mis esinevad vaid piiratud aladel nagu Alutaguse ja Võrtsjärve madalikud ning koosnevad liivsavidest, saviliivadest ja sapropeelist. Pinnas on halvasti läbitav ja mittesobilik veevõtmiseks.

Merelised setted, mis on 6 ning vahel rohkemgi meetrit paksud ning koosnevad peamiselt liivast ja kruusast. Kohati võib esineda savikaid vahekihte, mis muudavad kihi halvasti läbitavaks. Potentsiaalne väljavõetava vee hulk 2-4 m sügavuses kaevus jääb vahemikku 10-60 m³/d ning seda vett kasutatakse paljudes majapidamistes.

Mandrijää-järvelised setted kogupaksusega 5-10 m katavad suurt maa-ala ja koosnevad peeneteralistest liivadest, saviliivadest ja viirsavidest. Liivade ja saviliivade veejuhtivus varieerub 0,1-5 m/d. On näiteid kaevudest, millede veevõtt varieerub 0,5 kuni 20 m³/d. Viirsavide ristipidine veejuhtivus jääb aga alla 10⁻⁴ m³/d moodustades sellega keskmisi ja tugevaid veepidemeid, kaitstes sellega efektiivselt alumisi veekihte potentsiaalse reostuse eest.

Glatsiofluviaalsed setted moodustavad oose, sandureid, deltasid ja esinevad ka mõnedes mattunud orgudes. Koosnevad enamasti liivast ja kruusast veejuhtivusega 5-10 m/d, kuid ekstreemsematel juhtudel ka kuni 100 m/d.

Mandrijäätekkelised setted katavad 2/3 Eesti pindalast. Vähesel või mõõdukal määral tootlikud on liiva ja saviliiva koostisega moreenid ja paiguti levivad mõne meetri paksused kruusa ja liiva vahekihid. Nende juhtivus varieerub 0,01-1 m/d. Enamik kuni 10 m sügavatest salvkaevudest Eestis saavad oma vee moreenist. Nende kaevude vee andvus on umbkaudu 0,2-2 m³/d.

4.3. Aluspõhja veekompleksid

Ülem-Devoni põhjaveekompleks (D₃) koosneb karbonaatsetest kivimitest paksusega 17-25 m ja katab umbes 500 km² suuruse ala Kagu-Eestis. Kivimites võib esineda tugevat karstumist ja lõhelisust. Lõhelisus on valdavalt loode-kagusuunaline (Marandi, 2010). Karstunud kivimite veejuhtivus (filtratsioonikoefitsient) on 1-50 m/d. Kaevude erideebit kõigub 0,1-6 l/(s*m) vahel, jäädes valdavalt siiski 1 l/(s*m) juurde. Ülem-Devoni veekompleksi katab keskmiselt 40 m paksune settekiht (Marandi, 2010). Veüsteemi lamamiks on Plavinase lademe argilliidid koos savi vahekihtidega, moodustades keskmise isolatsioonivõimega veepideme. Põhjaveekiht on enamjaolt suletud ning survetase võib osades arteesiakaevudest tõusta 4,6 m kõrgusele üle maapinna. Ühiskondlikuks veetarbeks kasutatakse seda kihti vaid vähestes kohtades.

Kesk-Devoni põhjaveekompleks (D₂) levib Hädemeeste-Mustvee joonest lõuna pool ja koosneb valdavalt liivakividest ja aleuroliitidest. Kolmandikul veekihi mahust esinevad suurenenud savisisaldusega kivimid, moodustades regionaalseid nõrku või keskmisi veepidemeid. Põhjaveekihti moodustavate kivimite paksus on 50-250 m, suurenedes kagu suunas (Marandi, 2010). Veekompleks paljandub vaid sügavamates jõeorgudes, mujal katab seda 5-80 m paksune Kvaternaari settekiht ja levila kaguosas ka Ülem-Devoni karbonaatkivimid. Lamamiks on Narva lademe savidest moodustunud veepide. Kesk-Devoni pealispinna reljeef on tugevasti liigestatud: suuremateks aluspõhja kõrgendikeks on Haanja, Otepää ja Sakala ning alandusteks Peipsi järv, Võrtsjärv, Emajõgi ja Võhandu jõgi (Marandi, 2010). Põhjaveekihi toitealaks on Lõuna-Eesti kõrgustikud. Kõrgustikel võib kihi veejuhtivus tõusta 200-500 m²/d, üldjuhul jääb see siiski alla 100 m²/d. Kivimite veejuhtivus on 1-3 m/d ja puurkaevude erideebit valdavalt 0,4-1 l/(s*m). Põhjavesi on survealine. Kõrgematel aladel jääb põhjaveetase 20 m sügavusele, samal ajal, kui madalamatel võib kohata ka arteesiakaeve. Veemahtuvuskoeffitsient jääb 5*10⁻⁵–10⁻³ vahele.

Narva veepide (D_{2nr}) koosneb Narva lademe aleuroliidi, domeriidi, mergli ja savi kihtidest kogupaksusega kuni 100 meetrit (Marandi, 2010). Narva lademe savikad kihid on regionaalseks veepidemeks terves Balti arteesiabasseinis (Perens, 2005). Lõuna-

Eestis moodustavad need esimese tõhusa aluspõhja veepideme, veejuhtivusega enamasti 10^{-4} - 10^{-5} m/d ning kohati veel väiksem. Kaevude erideebit on 0,06-0,2 l/(m*s).

Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleks (D₂₋₁) levib Pärnu-Mustvee joonest lõuna pool ja koosneb nõrgalt tsementeerunud peeneteralistest liivakividest, mis sisaldavad savikaid ja dolomiidistunud liivakivi vahekihte. Lasuvaks kihiks on Narva veepide. Veekompleksi alumist piiri on raske määrata, kuna puudub seda alumistest Siluri kivimitest eraldav veepide (Marandi, 2010). See kahe kihi kooslus moodustab ühtse vett kandva süsteemi (Kesk-Devoni-Siluri veesüsteemi), mida kasutatakse veevõtuks Tartus, Viljandis ja Pärnus. D₂₋₁ liivakivide kogupaksus on kuni 100 meetrit, lasudes Lõuna-Eestis 200 m allpool merepinda. Liivakivi veejuhtivus on 2-6 m/d, harva ka 8-10 m/d ja on suhteliselt kõrge deebitiga (veetootlikkus): 4-10 meetrise alanduse juures on puurkaevu deebit 260-700 m³/d. Puurkaevude erideebit on 0,7-1 l/(s*m). Kihi veejuhtivus on 50-500 m²/d ja veemahtuvuskoeffitsient 0,001-0,15. Põhjavesi on survealine.

Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekompleks (S-0) levib Pärnu-Põlva joonest põhja pool ja Lääne-Eesti saartel (Marandi, 2010), olles Eestis kõige laialdasema levikuga ning leides kasutust ühiskondlikuks veevõtuks Kuressaares, Paines, Jõgeval, Põltsamaal ja Tapal (Marandi, 2010). Veekompleks koosneb Siluri ja Ordoviitsiumi erineva koostisega lubja- ja dolokividest, kus esineb savikamaid vahekihte. S-O kogupaksus on ligikaudu 400 m (Marandi, 2010). Põhjaveekihi ülemises 30 m paksuses osas esineb tugevat karstumust ning hulgaliselt pragusid ja lõhesid, mis tingib suure filtratsioonikoeffitsiendi varieeruvuse 1-50 m/d. Sügavamal kivimite karstumus ja lõhenevus vähenevad ning seega ka veejuhtivus. Karstunud aladel on kihi veejuhtivus ülemises 15 m paksuses osas keskmiselt 400 m²/d, kust edasi absoluutne kihi veejuhtivus kasvab ühtlaselt (kihi veejuhtivus võrdub kihi paksuse ja filtratsioonikoeffitsiendi korrutisega), olles 50 m ja 75 m sügavusel vastavalt 630 m²/d ja 700 m²/d. 75 meetrit loetakse ka viimaseks piiriks, mil S-O suudab küllaldaselt vett toota. Enamikel juhtudel jääb kihi veejuhtivus 100-500 m²/d vahele. Kaevude erideebit veekompleksi ülemises osas varieerub 3-5 l/(s*m), alumises osas ei ületa see 1 l/(s*m). Kaevude keskmine deebit aladuse 5-10 m juures on 400-900 m³/d ja veemahtuvuskoeffitsient varieerub 10^{-6} - 10^{-3} .

Siluri-Ordoviitsiumi regionaalne veepide (S-O) koosneb lubjakividest, merglitest, aleuroliitidest, savidest ja argilliitidest ning levib Põhja-Eesti klindist 30 km lõuna poole. Sealt edasi kuuluvad veepideme koosseisu kõik Siluri ja Ordoviitsiumi karbonaatsed kivimid. Veepideme paksus kasvab mõnest meetrist klindil kuni 200-350 meetrini Eesti lõunapiiril. Veejuhtivus on horisontaal- ja vertikaalsuunas täiesti erinev: horisontaalsel voolamisel on see vahemikus 0,001-1 m/d ja ulatudes mõnikord isegi väärtuseni 2-5 m/d, kuid vertikaalsel voolamisel jääb vahemikku 10^{-9} - 10^{-4} m/d.

Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleks (O-Cm) lamab Siluri-Ordoviitsiumi regionaalse veepideme all ja levib kogu Eestis, välja arvatud Põhja-Eesti klindiesisel madalikul. Põhjaveekiht koosneb peeneteralistest liivakividest ja aleuroliitidest ning selle alla jääv veepide savist (Marandi, 2010). Veekompleksi paksus on 20-60 m ja sügavus maapinnast varieerub 10-20 meetrist Põhja-Eesti klindil kuni 500 meetrini Eesti lõunapiiril. Kivimite filtratsioonikoefitsient jääb peamiselt 1-3 m/d vahele. Kihi veejuhtivus väheneb lõuna suunal, kuid vettandva kihi paksusest sõltuvalt on veejuhtivus Kesk- ja Lõuna-Eestis 80-130 m²/d ning Põhja-Eestis ainult 25-50 m²/d. Kaevude deebit on valdavalt 430-600 m³/d 10-15 m alanduse kohta. Erideebit on vahemikus 0,1-0,3 l/(s*m) (Perens, 2005). Põhjaveekihi veemahtuvuskoefitsient on $2,5 \cdot 10^{-5}$ - $6 \cdot 10^{-3}$. Madalamatel aladel ulatub põhjavee survepind üle maapinna.

Lükati-Lontova veepide (Cm₁lk-ln) levib suuremas osas Eestis mandriosast ning koosneb Alam-Kambriumi sinisavidest, mille paksus ulatub Kirde-Eestis 100 meetrini (Marandi, 2010). Edela-Eestis Mõisaküla-Vastseliina joonest lõuna pool kiildub savilasund välja. Lääne-Eesti saartel asendub vähem savikate aleuroliitidega (Marandi, 2010). Sinisavide vertikaalne veejuhtivus on 10^{-7} - 10^{-5} m/d, olles sellega tugevaks veepidemeks.

Kambriumi-Vendi põhjaveekompleks (Cm-V) levib üle kogu Eesti, välja arvatud Mõniste-Lonko kerkealal. Põhjaveekiht koosneb Lääne- ja Põhja-Eestis liivakividest ja aleuroliitidest kogupaksusega kuni 90 m (Perens, 2005). Kivimite filtratsioonikoefitsient varieerub peamiselt 1-6 m/d piires (järeltatud Voronka ja Gdovi veekihtide filtratsioonikoefitsientidest). Rakvere-Põltsamaa-Otepää joonest ida pool jaotab kuni 53 m paksune Kotlini savikiht veekompleksi kaheks: savilasundi peale jäävaks Voronka veekihiks ja savilasundi alla jäävaks Gdovi veekihiks. Seega on

Lääne- ja Põhja-Eestis mõistlik Cm-V veekompleksi vaadelda tervikuna, ülalmainitud joonest ida pool aga eraldi Voronka ja Gdovi veekihtidena. Rannikuäärsetel aladel on Cm-V veekompleks tihtipeale ainus ühisveevarustuses kasutatav joogiveeallikas ning seetõttu tingib liigne veevõtt merevee sissetungi (Karise jt, 2004). Cm-V piesojuhtivus on $5 \cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{d}$ (Savitski & Savva, 2004). Veemahtuvuskoeffitsient jääb vahemikku 10^{-3} - 10^{-4} (Tabel 4.1).

Voronka veekiht (V_{2vr}) koosneb kvartslüüvakividest ja aleuroliitidest kogupaksusega kuni 50 m (Marandi, 2010). Kivimite filtratsioonikoeffitsient varieerub vahemikus 0,6-12,5 m/d, olles keskmiselt 2-6 m/d (Perens, 2005). Puurkaevude erideebit on 4-5 l/(s*m) (Marandi, 2010). Kihi veejuhtivus kahaneb 100-150 m^2/d Põhja-Eestis kuni 50 m^2/d Lõuna-Eestis. Looduslikel tingimustel on vee survepind Soome lahe rannikul 1,5-5,5 m üle merepinna. Piesojuhtivus on $5,6 \cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{d}$ (Savitski & Savva, 2005). Veemahtuvuskoeffitsient varieerub vahemikus $9 \cdot 10^{-5}$ - $3 \cdot 10^{-4}$ (Tabel 4.1).

Kotlini veepide (V_{2kt}) koosneb Vendi aegsetest savidest, mille vertikaalne veejuhtivus on 10^{-7} - 10^{-5} m/d (Marandi, 2010).

Gdovi veekiht (V_{2gd}) koosneb eriteralistest liivakividest ja aleuroliitidest paksusega 40-65 m ning lasub kristasel aluskorral. Kivimite filtratsioonikoeffitsient varieerub vahemikus 0,5-9,2 m/d, jäädes keskmiselt 5-6 m/d juurde. Puurkaevude erideebit on 2-4 l/(s*m) (Marandi, 2010). Kihi veejuhtivus on Kirde-Eestis 300-350 m^2/d ning kahaneb lääne ja lõuna suunal kuni 100 m^2/d . Looduslikel tingimustel on vee survetase Põhja-Eesti rannikul 3-5 m üle merepinna. Kihi piesojuhtivus on $5 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{d}$ (Savitski & Savva, 2005) ning veemahtuvuskoeffitsient jääb $2 \cdot 10^{-5}$ - $7 \cdot 10^{-5}$ vahele (Tabel 4.1).

4.3. Filtratsioonikoeffitsiendi väärtuse tõlgendamine

Suhteline hinnang veekihi hüdraulilisele läbitavusele ehk filtratsioonikoeffitsiendile, mis tähistatakse tähega K, on järgmine: (Perens & Vallner, 2004)

| | |
|----------------------|------------|
| $10^{-2} \leq K < 1$ | väga väike |
| $1 \leq K < 3$ | väike |
| $3 \leq K < 10$ | keskmise |
| $10 \leq K < 30$ | kõrge |

$30 \leq K < 70$ väga kõrge
 $K > 70$ ekstreemne

Kusjuures vee liikumine kivimites võib külgpõidises suunas olla kuni 100 korda kiirem kui ristipõidises. Veepidemeteks peetakse kihte, mille ristisuunaline vee liikumise kiirus jääb alla 10^{-2} m/d. Veepidemeid saab eristada kui:

$10^{-2} > K > 10^{-4}$ nõrk
 $10^{-4} \geq K > 10^{-6}$ keskmine
 $10^{-6} \geq K > 10^{-8}$ tugev
 $K < 10^{-8}$ väga tugev

Mitte ükski ülalkirjeldatud veepide ei ole absoluutne, st ei oma K väärtust 0.

Tabel 4.1. Eestis levivate põhjaveekihtide hüdrodünaamilised parameetrid

| Põhjavee-süsteemid | Veekihid | Veekihi paksus (m) | Filtratsiooni-koefitsient (m/d) | Veemahtuvus-koefitsient | Erideebit (l/(s*m)) |
|--|----------|--------------------|---------------------------------|---|---------------------|
| Ülem-Devoni veekompleks (D ₃) | | 17-25 | 1-50 | andmed puuduvad | 0,1-6 |
| Kesk-Devoni veekompleks (D ₂) | | 50-250 | 1-3 | $5 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-3} | 0,4-1 |
| Narva veepide (D _{2nr}) | | <90 | 10^{-4} - 10^{-5} | - | - |
| Kesk-Alam-Devoni veekompleks (D ₂₋₁) | | <100 | 2-10 | 0,001-0,15 | 0,7-1 |
| Siluri-Ordoviitsiumi veekompleks (S-O) | | 75 | 1-50 | 10^{-6} - 10^{-3} | 1-5 |
| Siluri-Ordoviitsiumi regionaalne veepide | | 1-350 | 0,001-1 | - | - |
| Ordoviitsiumi-Kambriumi veekompleks (O-Cm) | | 20-60 | 1-3 | $2,5 \cdot 10^{-5}$ - $6 \cdot 10^{-3}$ | 0,1-0,3 |
| Lükati-Lontova veepide (Cm ₁ lk-In) | | <100 | 10^{-7} - 10^{-5} | - | - |
| Kambriumi-Vendi veekompleks (Cm-V) | | >90 | 2-6 | 10^{-4} - 10^{-3} | andmed puuduvad |
| | Voronka | <50 | 2-6 | $9 \cdot 10^{-5}$ - $3 \cdot 10^{-4}$ | 4-5 |
| | Kotlin | <53 | 10^{-7} - 10^{-5} | - | - |
| | Gdov | 40-65 | 5-6 | $2 \cdot 10^{-5}$ - $7 \cdot 10^{-5}$ | 2-4 |

5. TULEMUSED

5.1. Kesk-Devoni põhjaveekompleks (D₂)

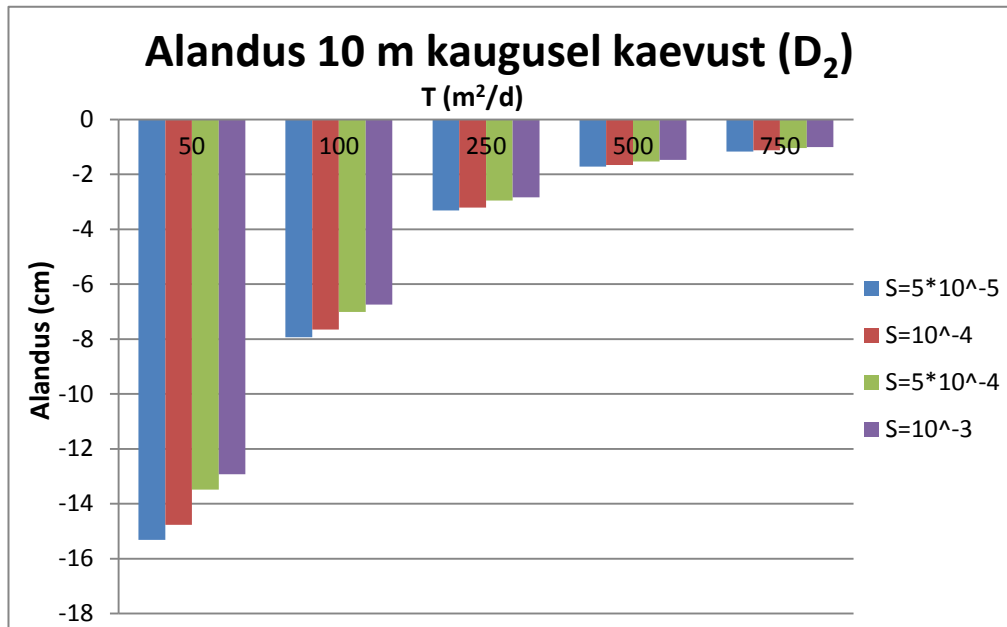
D₂ filtratsioonikoefitsient varieerub 1-3 m/d ning paksus on kuni 250 m (Tabel 4.1), kuid kuna maksimaalsed juhud kokku ei lange (Perens & Vallner, 2007), siis on arvutustes kasutatud suurimat kihi veejuhtivust 500 m²/d (Tabel 5.1).

Tabel 5.1. D₂ põhjaveekihi veejuhtivus, veemahtuvus ning nendele vastavad pumpamisest põhjustatud põhjavee survetaseme alandused

| Kesk-Devon 5 m ³ /d | | | | | |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------|------|-----|-----|
| Uuritavad parameetrid | S | T (m ² /d) | | | |
| | | 50 | 100 | 250 | 500 |
| Alandus kaevus (cm) | 5*10 ⁻⁵ | 23,9 | 12,2 | 5,0 | 2,6 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 15,3 | 7,9 | 3,3 | 1,7 |
| Mõjuraadius (km) | | 150 | 212 | 335 | 474 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 250 | 1 | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻⁴ | 23,3 | 11,9 | 4,9 | 2,5 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 14,8 | 7,7 | 3,2 | 1,7 |
| Mõjuraadius (km) | | 106 | 150 | 237 | 335 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 200 | 0,8 | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 5*10 ⁻⁴ | 22,1 | 11,3 | 4,7 | 2,4 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 13,5 | 7,0 | 3,0 | 1,5 |
| Mõjuraadius (km) | | 47 | 67 | 106 | 150 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 75 | 0,5 | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻³ | 21,5 | 11,0 | 4,6 | 2,3 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 12,9 | 6,7 | 2,8 | 1,5 |
| Mõjuraadius (km) | | 34 | 47 | 75 | 106 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 50 | 0,3 | - | - |

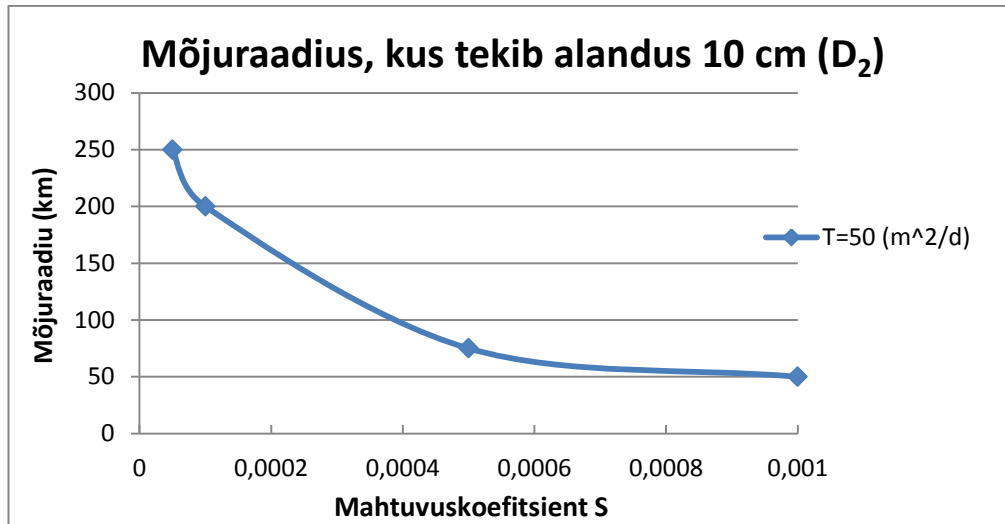
Veevõtmisel tekkiv maksimaalne alandus kaevus on 23,9 cm ja realiseerub minimaalsete kihi veejuhtivuse ja veemahtuvuskoeffitsientide korral (vastavalt 50 m²/d

ja $5 \cdot 10^{-5}$). Kaevust 10 m kaugusel on veetase 8,6 cm kõrgemal ning alanduseks on vaid 15,3 cm (Joonis 5.1.1). Maksimaalset alandust kaevus mõjutab veemahtuvuskoeffitsientide 150 kordne erinevus 2,4 cm piires, ehk vaid ~1,11 korda. Hooldusala piiril ehk 10 m kaugusel kaevust on vastav erinevus ~1,19 kordne.



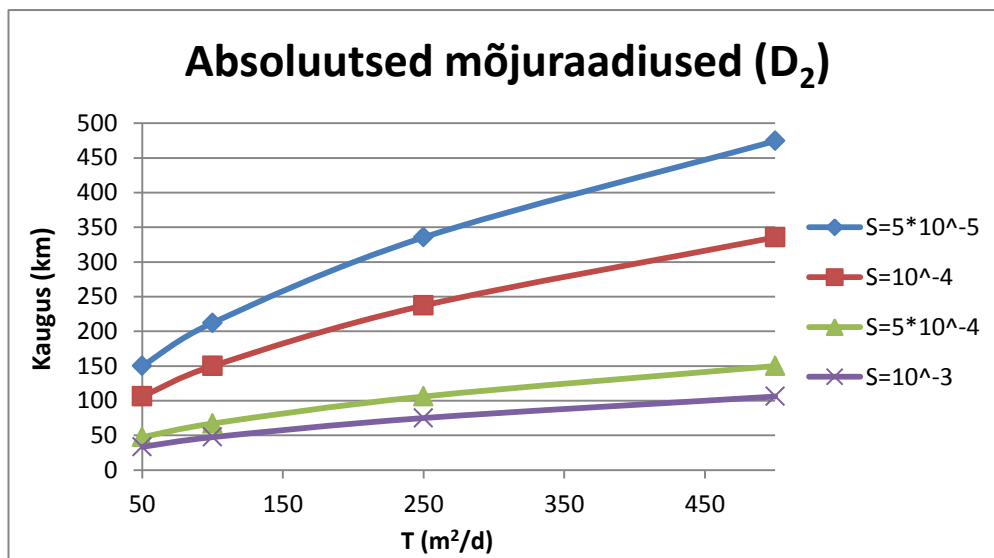
Joonis 5.1.1. D₂ põhjaveekihi põhjaveesurve alandus 10 m kaugusel erinevate veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide väärtuste korral 10 000 ööpäeva möödudes

Alandus vähemalt 10 cm tekib antud pumpamise määral kihi veejuhtivuste 50-120 m²/d korral ning maksimaalselt 250 m kaugusel (Joonis 5.1.2.). Kihi veejuhtivusel 120 m²/d tekib vastav alandus vaid kaevu vahetus läheduses. Suurematel veejuhtivuse väärtustel jääb alandus väiksemaks kui 10 cm.



Joonis 5.1.2. D_2 põhjaveekihi mõjuraadiused alandusega 10 cm erinevate veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide väärtustel 10 000 ööpäeva möödudes

Absoluutne arvutuslik mõjuraadius varieerub D_2 veekompleksis minimaalsest 34 km-st maksimaalselt 474 km-ni. Veekompleksi veemahtuvuskoeffitsientide 150 kordne erinevus tingib absoluutse mõjuraadiuse ~5 kordse erinevuse ning sarnaselt põhjustab veejuhtivuste 10 kordne muutumine absoluutse mõjuraadiuse ~3,2 kordse erinevuse (Joonis 5.1.3).



Joonis 5.1.3. Puurkaevu absoluutsete arvutuslike mõjuraadiuste ulatused D_2 põhjaveekihis erinevate kihi veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide väärtuste korral 10 000 ööpäeva möödudes

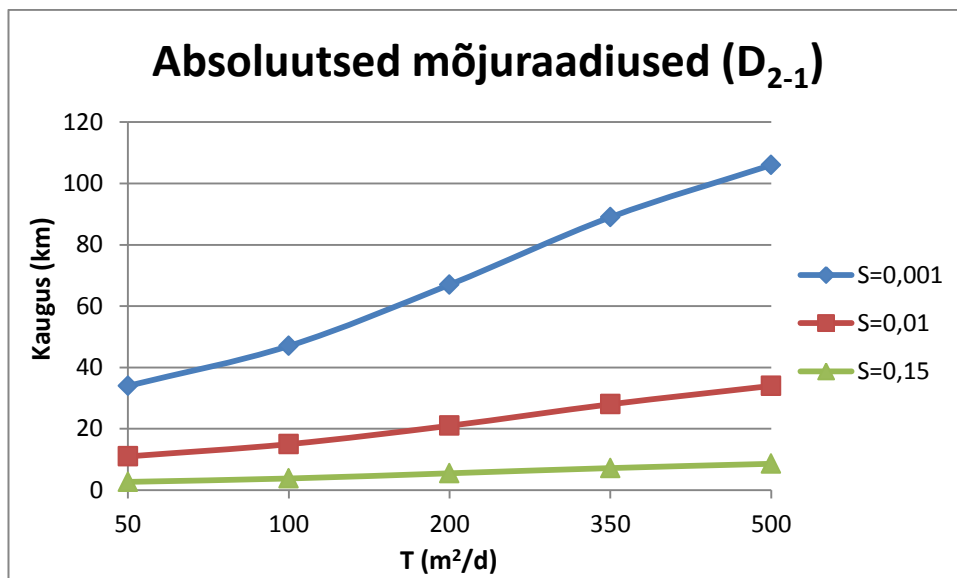
5.2. Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleks (D₂₋₁)

D₂₋₁ kihi veejuhtivus jääb vahemikku 50-500 m²/d ning veemahtvuskoeffitsiendid varieeruvad 0,001-0,15 (Perens & Vallner, 2007). Arvutused vastavate andmetega on toodud tabelis 5.2.1.

Tabel 5.2.1. D₂₋₁ põhjaveekihi veejuhtivus, veemahtvus ning nendele vastavad pumpamisest põhjustatud põhjavee survetaseme alandused

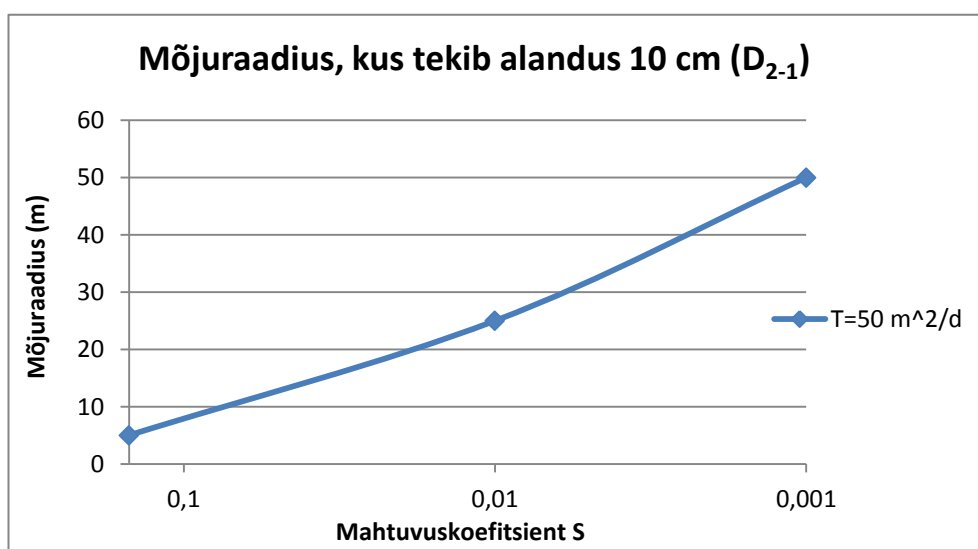
| Kesk-Alam-Devon (D ₂₋₁)-5 m ³ /d | | | | | | |
|---|-------|-----------------------|------|-----|-----|-----|
| Uuritavad parameetrid | S | T (m ² /d) | | | | |
| | | 50 | 100 | 200 | 350 | 500 |
| Alandus kaevus (cm) | 0,001 | 21,6 | 11 | 5,7 | 3,3 | 2,3 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 12,9 | 6,7 | 3,5 | 2,1 | 1,5 |
| Mõjuraadius (km) | | 34 | 47 | 67 | 89 | 106 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 50 | 0,5 | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 0,01 | 19,7 | 10,1 | 5,2 | 3,0 | 2,2 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 11,1 | 5,8 | 3,0 | 1,8 | 1,3 |
| Mõjuraadius (km) | | 11 | 15 | 21 | 28 | 34 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 25 | 0 | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 0,15 | 17,6 | 9,0 | 4,7 | 2,7 | 1,9 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 8,9 | 4,7 | 2,5 | 1,5 | 1,1 |
| Mõjuraadius (km) | | 2,7 | 3,8 | 5,5 | 7,2 | 8,6 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 5 | - | - | - | - |

Kihi veejuhtivuse ekstreemumid on D₂₋₁ puhul samad, mis D₂₋₁, kuid suuremate veemahtvuskoeffitsientide tõttu jääb absoluutne arvutuslik mõjuraadius vahemikku 2,7 – 106 km (Joonis 5.2.1).



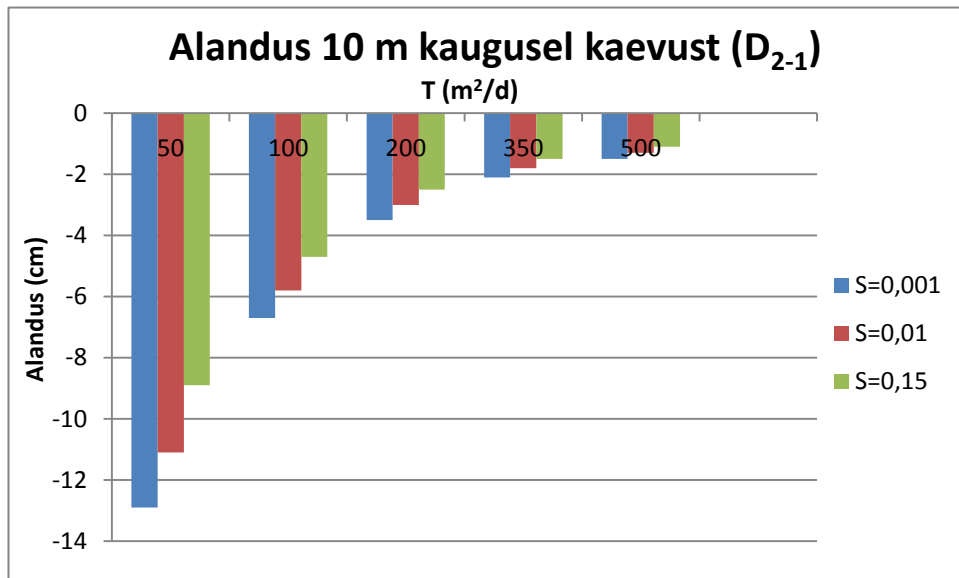
Joonis 5.2.1. Puurkaevu absoluutsete arvutuslike mõjuraadiuste ulatused D_{2-1} põhjaveekihi erinevate kihi veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide korral 10 000 ööpäeva möödudes

Vähemalt 10 cm suurune alandus kujuneb üksnes põhjaveekihtidel, mille veejuhtivus on 50-100 m²/d ning maksimaalselt 50 m kaugusel kaevust (Joonis 5.2.2) sõltuvalt kihi veemahtuvuskoeffitsiendist. Veejuhtivusel 100 m²/d jääb see 1 m raadiusesse kaevust. Suurematel veejuhtivuste väärtustel 10 cm suurust alandust enam ei teki.



Joonis 5.2.2. D_{2-1} põhjaveekihi mõjuraadiused alandusega 10 cm erinevate veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide väärtustel 10 000 ööpäeva möödudes

Veevõtmisel tekkiv suurim alandus kaevus on 21,6 cm ning 10 m kaugusel kahaneb see 12,9 cm-le. Minimaalsel juhul tekib alandus 1,9 cm, mis on 10 m kaugusel kahanenud 1,1 cm-le (Joonis 5.2.3).



Joonis 5.2.3. D_{2-1} põhjaveekihi põhjaveesurve alandus 10 m kaugusel erinevate veejuhtivuste ja veemahtuvuste korral 10 000 ööpäeva möödudes

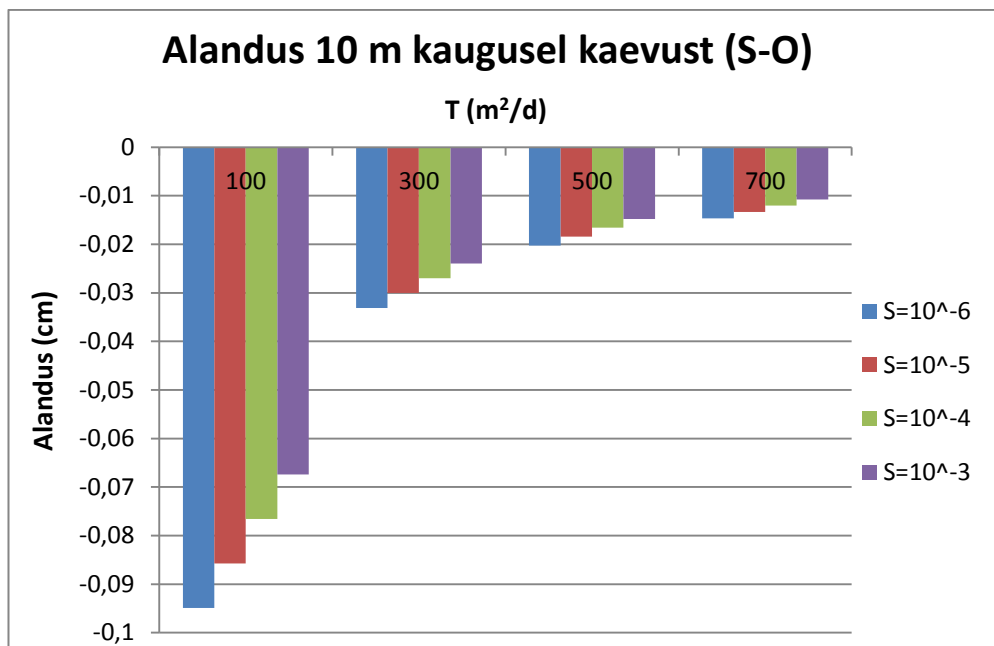
5.3. Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekompleks (S-O)

Tulenevalt lubjakivide karstumisest ning tekstuuri muutusest erinevatel sügavustel on kihi omadused väga kõikumad – veejuhtivused 100-700 m²/d (Perens & Vallner, 2007) ja veemahtuvused 10⁻⁶–10⁻³ (Tabel 5.3).

Tabel 5.3. S-O põhjaveekihi veejuhtivus, veemahtuvus ning nendele vastavad pumpamisest põhjustatud põhjavee survetaseme alandused

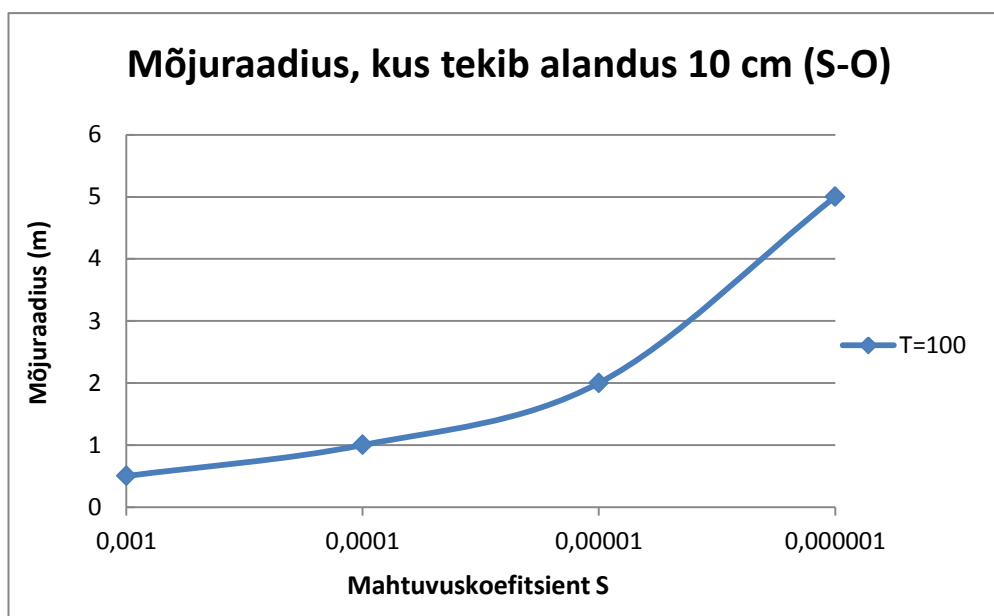
| Silur-Ordoviitsium 5 m ³ /d | | | | | |
|--|------------------|-----------------------|------|------|------|
| Uuritavad parameetrid | S | T (m ² /d) | | | |
| | | 100 | 300 | 500 | 700 |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻⁶ | 13,8 | 4,7 | 2,9 | 2,1 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 9,5 | 3,3 | 2,0 | 1,5 |
| Mõjuraadius (km) | | 1 500 | 2600 | 3350 | 3970 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 5 | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻⁵ | 12,9 | 4,4 | 2,7 | 1,9 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 8,6 | 3 | 1,8 | 1,3 |
| Mõjuraadius (km) | | 474 | 821 | 1060 | 1250 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 2 | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻⁴ | 11,9 | 4,1 | 2,5 | 1,8 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 7,7 | 2,7 | 1,7 | 1,2 |
| Mõjuraadius (km) | | 150 | 260 | 335 | 397 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 1 | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻³ | 11 | 3,8 | 2,3 | 1,7 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 6,7 | 2,4 | 1,5 | 1,1 |
| Mõjuraadius (km) | | 47 | 82 | 106 | 125 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 0,5 | - | - | - |

S-O veekompleksis pumpamisest tulenev maksimaalne alandus kaevus on 13,8 cm ja minimaalne 1,7 cm. Kaevust 10 m kaugusel on vastavad alandused vähenenud 9,5 cm ja 1,1 cm-ni (Joonis 5.3.1). Veemahtuvuskoeffitsiendi 1000 kordne erinevus mõjutab kaevus tekkivat alandust maksimaalselt 2,8 cm ulatuses.



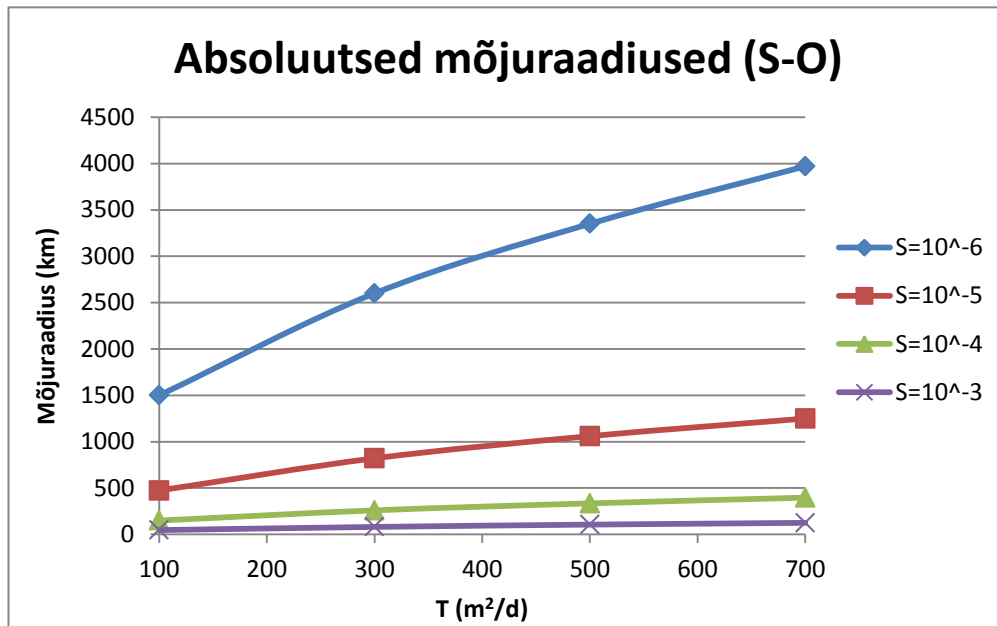
Joonis 5.3.1. S-O põhjaveekihi põhjaveesurve alandus 10 m kaugusel erinevate veejuhtivuste ja veemahtvuskoeffitsientide korral 10 000 ööpäeva möödudes

Maksimaalne tekkiv alandus on suurem kui 10 cm ainult minimaalsetel võimalikel veejuhtivustel (100 m²/d) ning ei levi kaugemale kui 5 meetrit kaevust (Joonis 5.3.2).



Joonis 5.3.2. S-O põhjaveekihi mõjuraadiused alandusega 10 cm erinevate veejuhtivuste ja eksponentsiaalsete veemahtvuskoeffitsientide korral 10 000 ööpäeva möödudes

S-O veekompleksi absoluutne arvutuslik mõjuraadius varieerub 47 km-st 3970 km-ni (Joonis 5.3.3).



Joonis 5.3.3. Puurkaevu absoluutsete arvutuslike mõjuraadiuste ulatused S-O põhjaveekihi erinevate kihi veejuhtivuste ja veemahtvuskoeffitsientide korral 10 000 ööpäeva möödudes

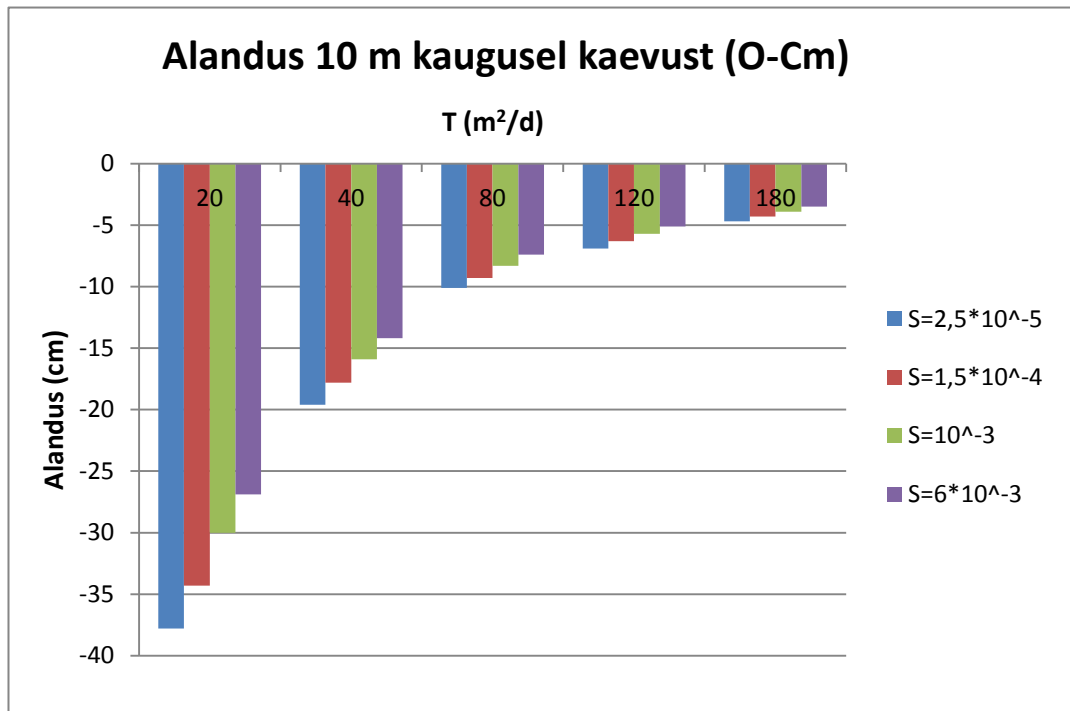
5.4. Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleks (O-Cm)

Kuna O-Cm filtratsioonikoefitsient varieerub 1-3 m/d ning paksus on 20-60 m (Tabel 4.1), siis on arvutustes kasutatud kihi veejuhtivusi 20-180 m²/d (Tabel 5.4).

Tabel 5.4.1. O-Cm põhjaveekihi veejuhtivus, veemahtuvus ning nendele vastavad pumpamisest põhjustatud põhjavee survetaseme alandused

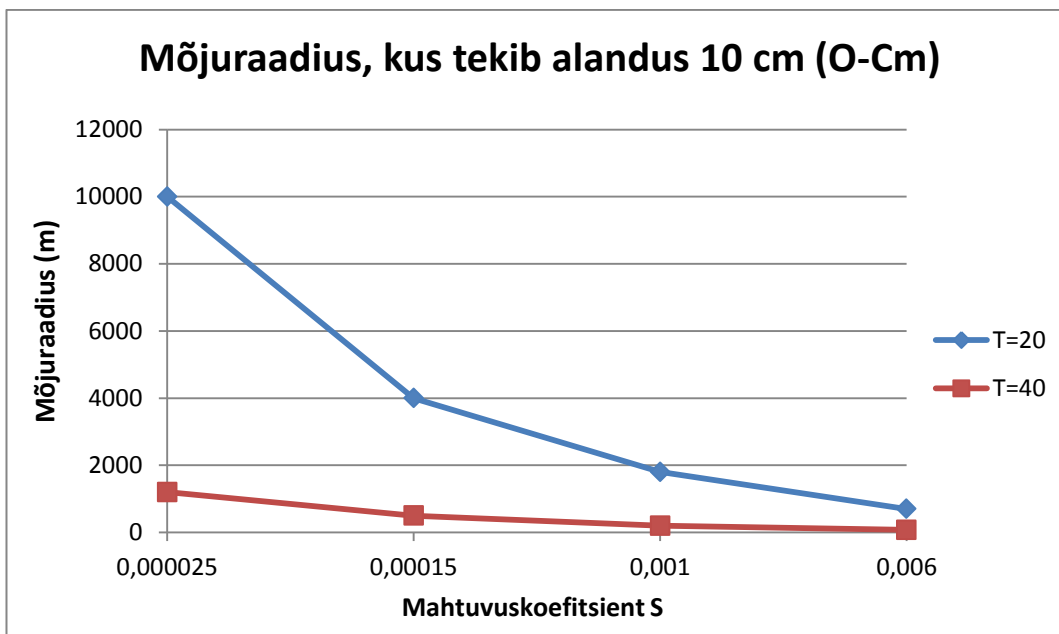
| Ordoviitsium-Kambrium 5 m ³ /d | | | | | | |
|---|----------------------|-----------------------|------|------|------|------|
| Uuritavad parameetrid | S | T (m ² /d) | | | | |
| | | 20 | 40 | 80 | 120 | 180 |
| Alandus kaevus (cm) | 2,5*10 ⁻⁵ | 59,3 | 30,3 | 15,6 | 10,5 | 7,1 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 37,8 | 19,6 | 10,1 | 6,9 | 4,7 |
| Mõjuraadius (km) | | 134 | 190 | 268 | 329 | 402 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 10000 | 1200 | 10 | 0 | - |
| Alandus kaevus (cm) | 1,5*10 ⁻⁴ | 55,7 | 28,6 | 14,6 | 9,9 | 6,7 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 34,3 | 17,8 | 9,3 | 6,3 | 4,3 |
| Mõjuraadius (km) | | 55 | 77 | 110 | 134 | 164 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 4000 | 500 | 5 | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻³ | 52,0 | 26,7 | 13,7 | 9,3 | 6,2 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 30,0 | 15,9 | 8,3 | 5,7 | 3,9 |
| Mõjuraadius (km) | | 21,0 | 30,0 | 42,4 | 52,0 | 63,6 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 1800 | 200 | 2 | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 6*10 ⁻³ | 48,4 | 24,9 | 12,8 | 8,7 | 5,9 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 26,9 | 14,2 | 7,4 | 5,1 | 3,5 |
| Mõjuraadius (km) | | 8,6 | 12,2 | 17,3 | 21,2 | 26,0 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 700 | 75 | 0,5 | - | - |

Suurim veevõtmisel kujunev alandus O-Cm põhjaveekihi on 59,3 cm ja väikseim 5,9 cm. Kaevust 10 m kaugusel väheneb alandus vastavalt väärtusteni 37,8 cm ja 3,5 cm (Joonis 5.4.1).

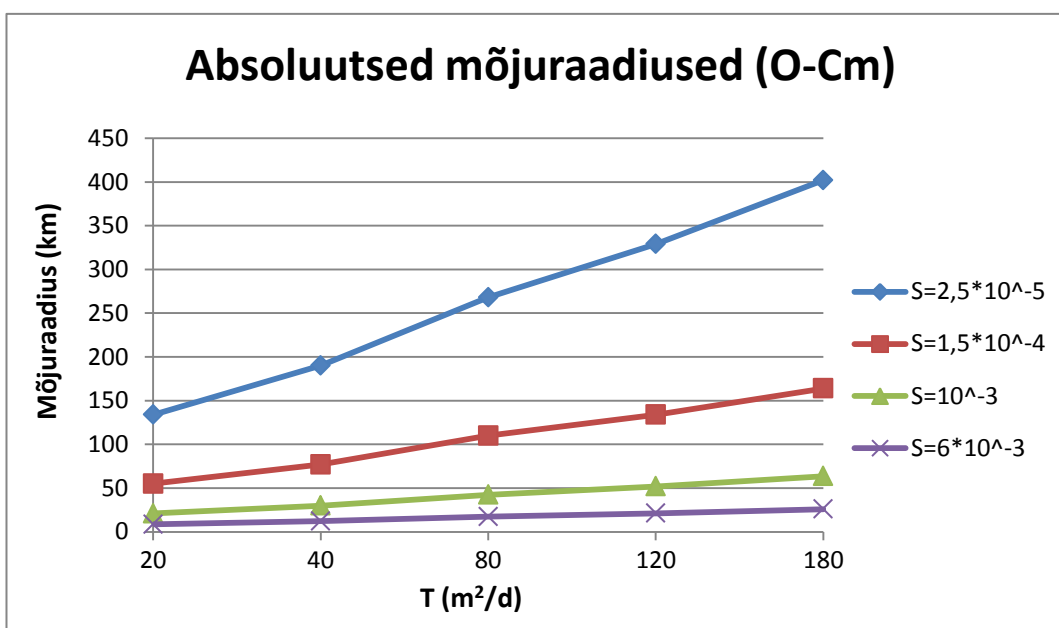


Joonis 5.4.1. O-Cm põhjaveekihi põhjaveesurve alandus 10 m kaugusel erinevate veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide korral 10 000 ööpäeva möödudes

Pumpamisel tekkiv alandus suurusega vähemalt 10 cm kujuneb valdavas osas veekompleksi veejuhtivuste vahemikus (20-120 m²/d). Vastav alandus ulatub kuni 10 km kaugusele kaevust (Joonis 5.4.2). Võimalik veemahtuvuskoeffitsientide vahemik võib muuta raadiust, kus kujuneb 10 cm suurune alandus 20 kordselt. Absoluutsed arvutuslikud mõjuraadiused võivad ulatuda kuni 402 km-ni (Joonis 5.4.3).



Joonis 5.4.2. O-Cm põhjaveekihi absoluutsed arvutuslikud mõjuraadiused alandusega 10 cm erinevate veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide väärtustel 10 000 ööpäeva möödudes



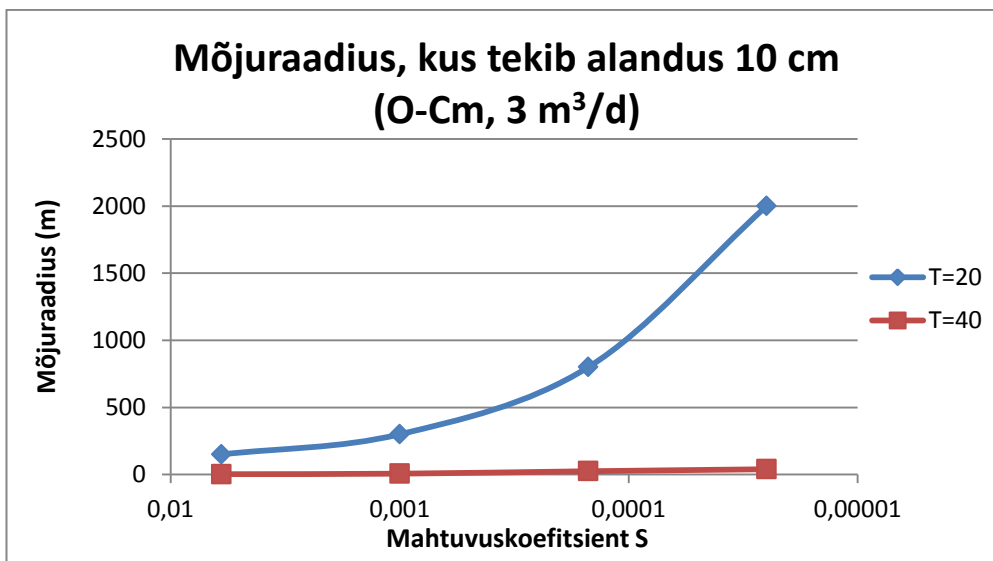
Joonis 5.4.3. Puurkaevu absoluutsete arvutuslike mõjuraadiuste ulatused O-Cm põhjaveekihis erinevate kihi veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide korral 10 000 ööpäeva möödudes

O-Cm veekompleksi puhul on väga olulised ka väiksemad pumpamise mahud kui 5 m³/d. Arvutused pumpamise määraga 3 m³/d on esitatud tabelis 5.4.2 ja pumpamise määraga 1 m³/d tabelis 5.4.3.

Tabel 5.4.2. O-Cm põhjaveekihi veejuhtivus, veemahtuvus ning nendele vastavad pumpamisest põhjustatud põhjavee survetaseme alandused veevõtul 3 m³/d

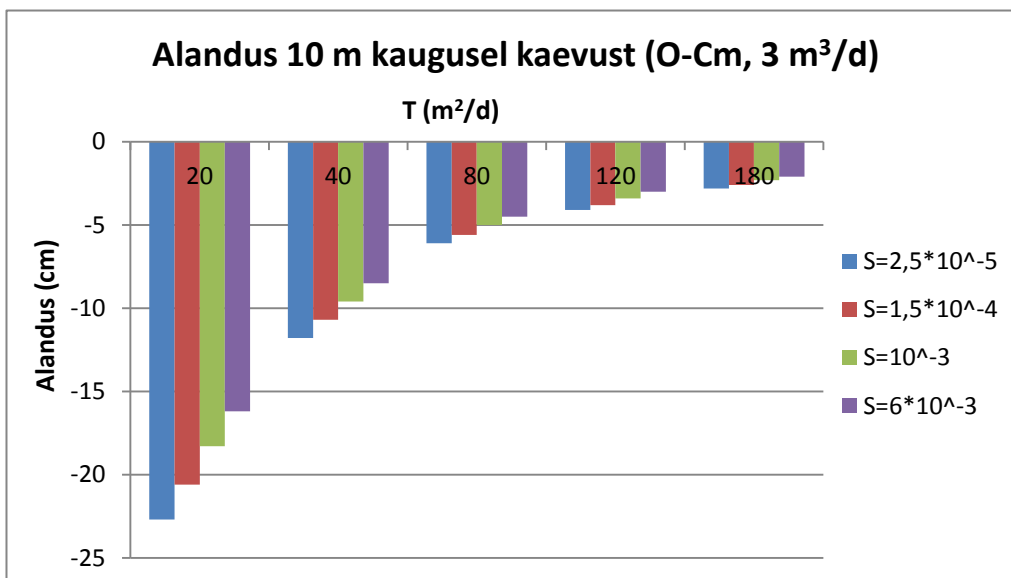
| Ordoviitsium-Kambrium (O-Cm) 3 m ³ /d | | | | | | |
|--|----------------------|-----------------------|------|------|------|------|
| Uuritavad parameetrid | S | T (m ² /d) | | | | |
| | | 20 | 40 | 80 | 120 | 180 |
| Alandus kaevus (cm) | 2,5*10 ⁻⁵ | 35,6 | 18,2 | 9,3 | 6,3 | 4,2 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 22,7 | 11,8 | 6,1 | 4,1 | 2,8 |
| Mõjuraadius (km) | | 134 | 190 | 268 | 329 | 402 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 2000 | 40 | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 1,5*10 ⁻⁴ | 33,4 | 17,1 | 8,8 | 5,9 | 4,0 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 20,6 | 10,7 | 5,6 | 3,8 | 2,6 |
| Mõjuraadius (km) | | 55 | 77 | 110 | 134 | 164 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 800 | 25 | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻³ | 31,2 | 16,0 | 8,2 | 5,6 | 3,8 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 18,3 | 9,6 | 5,0 | 3,4 | 2,3 |
| Mõjuraadius (km) | | 21,0 | 30,0 | 42,4 | 52,0 | 63,6 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 300 | 7 | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 6*10 ⁻³ | 29,0 | 14,9 | 7,7 | 5,2 | 3,5 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 16,2 | 8,5 | 4,5 | 3,0 | 2,1 |
| Mõjuraadius (km) | | 8,6 | 12,2 | 17,3 | 21,2 | 26,0 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 150 | 3 | - | - | - |

Absoluutsed arvutuslikud mõjuraadiused jäävad pumpamismahtude muutudes samaks (Joonis 5.4.1). Alanduse suurusega 10 cm ulatub kihi veejuhtivusel 20 m²/d kuni 2000 m kauguseni ning veejuhtivusel 40 m²/d kuni 40 m kauguseni kaevust (Joonis 5.4.4).



Joonis 5.4.4. O-Cm põhjaveekihi mõjuraadiused alandusega 10 cm erinevate veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide väärtustel ja pumpamise määral 3 m³/d 10 000 ööpäeva möödudes

Suurim alandus veevõtul 3 m³/d korral on 35,6 cm, mis on suurem kui enamikel veekihtidel veevõtul 5 m³/d. Hooldusala piiril (10 m kaugusel kaevust) on vastav alandus vähenenud 22,7 cm-ni (Joonis 5.4.5).



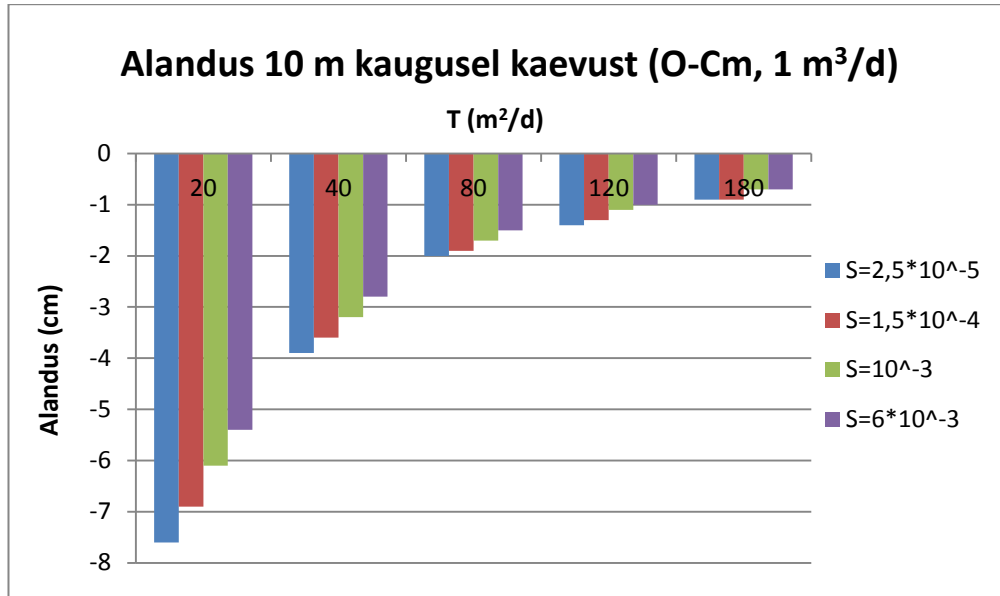
Joonis 5.4.5. O-Cm põhjaveekihi põhjaveesurve alandus 10 m kaugusel kaevust erinevate kihi veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide korral ja pumpamise määral 3 m³/d 10 000 ööpäeva möödudes

Mõjude ulatust pumpamise määral $1 \text{ m}^3/\text{d}$ kirjeldab tabel 5.4.3:

Tabel 5.4.3. O-Cm põhjaveekihi veejuhtivus, veemahtuvus ning nendele vastavad pumpamisest põhjustatud põhjavee survetaseme alandused veevõtul $1 \text{ m}^3/\text{d}$

| Ordoviitsium-Kambrium $1 \text{ m}^3/\text{d}$ | | | | | | |
|--|---------------------|-----------------------------|------|------|------|------|
| Uuritavad parameetrid | S | T (m^2/d) | | | | |
| | | 20 | 40 | 80 | 120 | 180 |
| Alandus kaevus (cm) | $2,5 \cdot 10^{-5}$ | 11,9 | 6,1 | 3,1 | 2,1 | 1,4 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 7,6 | 3,9 | 2,0 | 1,4 | 0,9 |
| Mõjuraadius (km) | | 134 | 190 | 268 | 329 | 402 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 1 | - | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | $1,5 \cdot 10^{-4}$ | 11,1 | 5,7 | 2,9 | 2,0 | 1,3 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 6,9 | 3,6 | 1,9 | 1,3 | 0,9 |
| Mõjuraadius (km) | | 55 | 77 | 110 | 134 | 164 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 0,5 | - | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 10^{-3} | 10,3 | 5,3 | 2,7 | 1,8 | 1,2 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 6,1 | 3,2 | 1,7 | 1,1 | 0,7 |
| Mõjuraadius (km) | | 21,0 | 30,0 | 42,4 | 52,0 | 63,6 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 0 | - | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | $6 \cdot 10^{-3}$ | 9,6 | 5,0 | 2,6 | 1,7 | 1,2 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 5,4 | 2,8 | 1,5 | 1,0 | 0,7 |
| Mõjuraadius (km) | | 8,6 | 12,2 | 17,3 | 21,2 | 26,0 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | - | - | - | - | - |

Vähemalt 10 cm suurune alandus eksisteerib O-Cm veekompleksis ka veevõtul $1 \text{ m}^3/\text{d}$, kuid jääb 1 m raadiusele kaevust. Suurim tekkiv alandus veevõtul $1 \text{ m}^3/\text{d}$ on 11,9 cm ning 10 m raadiusel on see vähenenud 7,6 cm-le (Joonis 5.4.6).



Joonis 5.4.6. O-Cm põhjaveekihi põhjaveesurve alandus 10 m kaugusel kaevust erinevate kihi veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide korral ning pumpamise määral $1 \text{ m}^3/\text{d}$ 10 000 ööpäeva möödudes

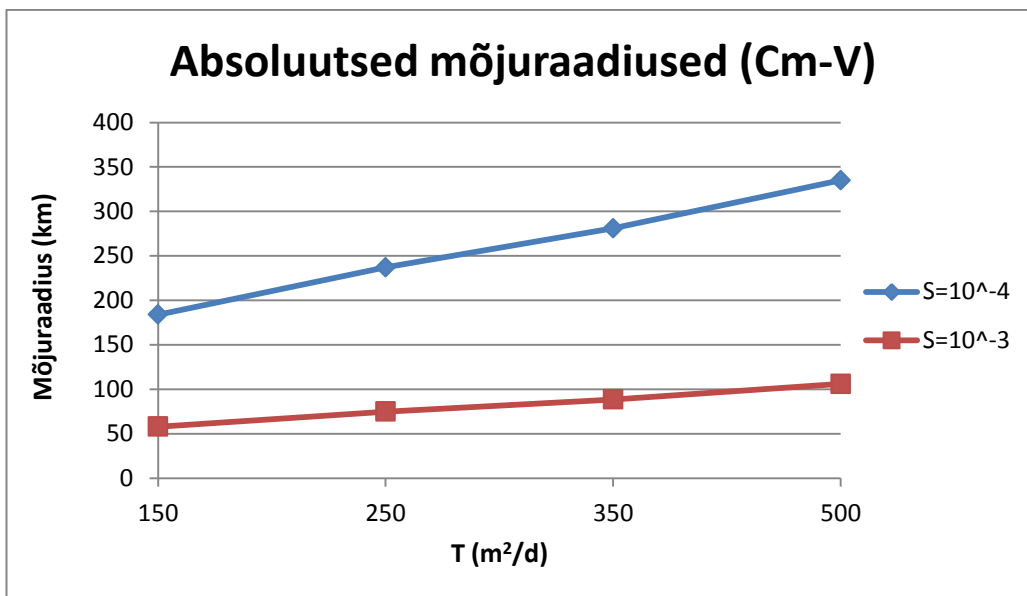
5.5. Kambriumi-Vendi põhjaveekompleks (Cm-V)

Kambriumi-Vendi veekompleksi suured veejuhtivused tulenevad selle küllaltki suurest paksusest, ulatudes 90 m-ni (Tabel 4.1). Vastavad arvutused Cm-V veekompleksi kohta on toodud tabelis 5.5.1.

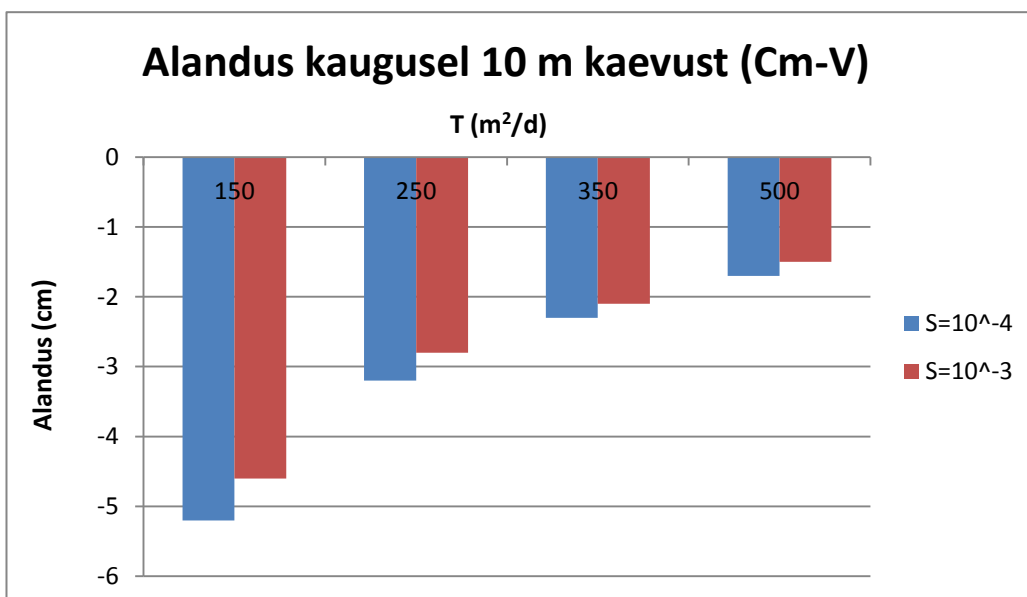
Tabel 5.5.1. Cm-V põhjaveekihi veejuhtivus, veemahtuvus ning nendele vastavad pumpamisest põhjustatud põhjavee survetaseme alandused

| Kambrium-Vend (Cm-V) 5 m ³ /d | | | | | |
|--|------------------|-----------------------|------|------|-------|
| Uuritavad parameetrid | S | T (m ² /d) | | | |
| | | 150 | 250 | 350 | 500 |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻⁴ | 8,1 | 4,9 | 3,6 | 2,5 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 5,2 | 3,2 | 2,3 | 1,7 |
| Mõjuraadius (km) | | 184 | 237 | 281 | 335 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | - | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻³ | 7,5 | 4,6 | 3,3 | 2,4 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 4,6 | 2,8 | 2,1 | 1,5 |
| Mõjuraadius (km) | | 58,1 | 75,0 | 88,7 | 106,0 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | - | - | - | - |

Veekompleksi osas, kus Kotlini savilasund pole Cm-V veekompleksi kaheks jaotanud, on veejuhtivused piisavalt suured, et 10 cm suurust alandust ei teki. Absoluutne arvutuslik mõjuraadius ulatub minimaalsest 58 km-st maksimaalselt 335 km kaugusele (Joonis 5.5.1). Pumpamisel tekkiv suurim alandus on 8,1 cm ning 10 m raadiusel kaevust on see vähenenud 5,2 cm-ni (Joonis 5.5.2).



Joonis 5.5.1. Puurkaevu absoluutsete arvutuslike mõjuraadiuste ulatused Cm-V põhjaveekihi erinevate kihi veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide korral 10 000 ööpäeva möödudes



Joonis 5.5.2. Cm-V põhjaveekihi põhjaveesurve alandus 10 m kaugusel kaevust erinevate kihi veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide korral 10 000 ööpäeva möödudes

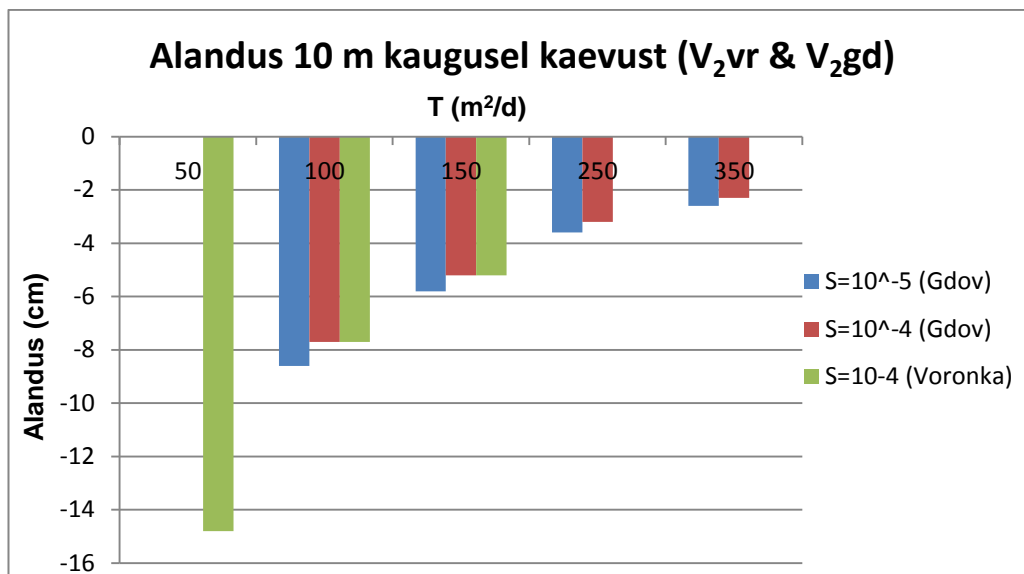
5.5.1. Voronka (V_{2vr}) ja Gdovi (V_{2gd}) põhjaveekihtid

Rakvere-Põltsamaa-Otepää joonest ida pool jaotab Kotlini savilasund Cm-V veekompleksi kaheks: Voronka ja Gdovi veekihtideks (Perens & Vallner, 1997). Kuna nende veekihtide hüdrogeoloogilised tingimused suures osas ühtivad, on arvutused lihtsuse mõttes esitatud ühe tabelina. Voronka veejuhtivused on vahemikus 50-150 m²/d ja veemahtuvus 10⁻⁴, Gdovil vastavalt 100-350 m²/d ja 10⁻⁵-10⁻⁴ (Tabel 5.5.2)

Tabel 5.5.2. Voronka ja Gdovi põhjaveekihtide veejuhtivused, veemahtuvused ning nendele vastavad pumpamisest põhjustatud põhjavee survetaseme alandused

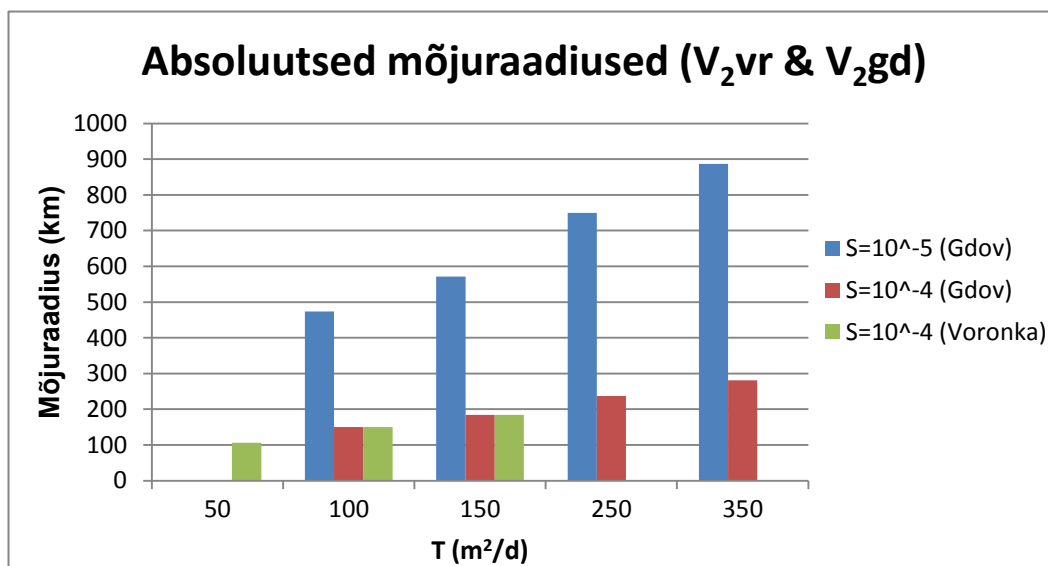
| Voronka (V_{2vr}) & Gdov (V_{2gd}) - 5 m ³ /d | | | | | | |
|--|---|-----------------------|-----------------------|-------|-----------|-------|
| Uuritavad parameetrid | S | V_{2vr} | V_{2vr} & V_{2gd} | | V_{2gd} | |
| | | T (m ² /d) | | | | |
| | | 50 | 100 | 150 | 250 | 350 |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻⁵ (V_{2gd}) | - | 12,9 | 8,7 | 5,3 | 3,8 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | - | 8,6 | 5,8 | 3,6 | 2,6 |
| Mõjuraadius (km) | | - | 474 | 571 | 750 | 887 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | - | - | - | - | - |
| Alandus kaevus (cm) | 10 ⁻⁴ (V_{2vr} & V_{2gd}) | 23,3 | 11,9 | 8,1 | 4,9 | 3,6 |
| Alandus kaugusel 10 m (cm) | | 14,8 | 7,7 | 5,2 | 3,2 | 2,3 |
| Mõjuraadius (km) | | 106,0 | 150,0 | 184,0 | 237,0 | 281,0 |
| Kaugus, kus alandus 10 cm (m) | | 200 | 0,6 | - | - | - |

Voronka ja Gdovi veekihte eraldi vaadeldes võivad sealsed maksimaalsed alandused ulatuda vastavalt 23,3 cm ja 12,9 cm sügavuseni algsest survetasemest. 10 m kaugusel kaevust on vastavad alandused vähenenud 14,8 cm ja 8,6 cm-ni (Joonis 5.5.3).



Joonis 5.5.3. Voronka ja Gdovi põhjaveekihtide põhjaveesurve alandus 10 m kaugusel kaevust erinevate kihi veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide korral 10 000 ööpäeva möödudes

Voronka veekihist pumpamisel tekib alandus 10 cm maksimaalselt 200 m kaugusel. Gdovi puhul jääb see 1,5 m kaugusele kaevust. Absoluutne arvutuslik mõjuraadius varieerub Voronkal vahemikus 106-571 km ning Gdovil 150-887 km (Joonis 5.5.4).



Joonis 5.5.4. Voronka ja Gdovi põhjaveekihtide absoluutsed arvutuslikud mõjuraadiused erinevate veejuhtivuste ja veemahtuvuskoeffitsientide väärtustel 10 000 ööpäeva möödudes

6. JÄRELDUSED JA ARUTELU

6.1. Pumpamise mõju sõltuvus hüdrogeoloogilistest parameetritest

Suuremad veemahtvuskoeffitsientide väärtused tingivad suurema veehulga, mis ühikulisel veetaseme langusel sealt kätte on võimalik saada (Kruseman,1994). Sellest tulenevalt on kujunev depressioonilehter järsema langusega ja väiksema absoluutse arvutusliku mõjuraadiusega, kui see oleks väiksema mahtvuskoeffitsiendi puhul. Seevastu, mida suurem kihi veejuhtivus, seda lamedam, madalam ja kaugemale ulatavam on tekkiv depressioonilehter.

Võrreldes mõjuraadiusi, kus tekib alandus 10 cm absoluutsete arvutuslike mõjuraadiustega, võib järeldada, et kujunevad depressioonilehtrid on vägagi laiavalguvad ja lameda kujuga. Seda eelkõige suhteliselt suurte veejuhtivuste ja väikeste veemahtvuskoeffitsientide tõttu. See tähendab, et veevõtmise põhjustatav mõju ulatub küll väga kaugemale, kuid suuri alandusi ühes punktis ei teki. Järelikult on mõju hajutatud ära suurele maa-alale.

Tekkiva alanduse sügavus sõltub pumpamise määrast ja kestvusest, kihi veejuhtivusest, mahtvuskoeffitsiendist ning kaevu diameetrist. Kuna töös on pumpamise kestvus 10 000 ööpäeva ja kaevu diameeter 15 cm võetud konstantseks, siis vaadeldakse kolme ülejäänud parameetrit. Alanduse kujunemisel on olulisemad neist pumpamise määr ja kihi veejuhtivus. Veevõtmise hulga suurenedes 5 korda suureneb ka tekkiva alanduse sügavus 5 korda. Vastavalt aga kihi veejuhtivuse suurenemine 5 korda tingib alanduse 5 kordse vähenemise. Mahtvuskoeffitsient mõjutab alanduse maksimaalset sügavust suhteliselt vähe. Absoluutne suurim alandus kaevus, 59 cm, tekib O-Cm veekihi peamiselt selle väikese veejuhtivuse tõttu ($20 \text{ m}^2/\text{d}$).

Absoluutne arvutuslik mõjuraadius erinevalt tekkivatest alandustest ei sõltu väljapumbatava vee hulgast. See tähendab, et alanduse levi kaugus ei muutu, kui pumbata välja $5 \text{ m}^3/\text{d}$ või $1 \text{ m}^3/\text{d}$. Absoluutne arvutuslik mõjuraadius suureneb kihi veejuhtivuse kasvades ning väheneb sarnaselt, kui veemahtvuskoeffitsient kasvab. Kui

arvutusi tehakse kihtidevahelises piiramatus põhjaveekihis mittestatsionaarsetes tingimustes, siis arvutuslik mõjuraadius jääbki ajas kasvama.

Pumpamismahul $5 \text{ m}^3/\text{d}$ kujuneb vähemalt 10 cm suurune alandus valdavalt kihi veejuhtivuse $120 \text{ m}^2/\text{d}$ ja vähem juures. Kui näiteks filtratsioonikoefitsient $K=3$ ja veekiht on paksem kui 40 m (kihi veejuhtivus $T > 120 \text{ m}^2/\text{d}$), siis 10 cm suurust alandust enam praktiliselt ei teki. Kaevu vahetust lähedusest kaugemale ulatub vastav alandus kihi veejuhtivusel alla $80 \text{ m}^2/\text{d}$. Pumpamismahuga $3 \text{ m}^3/\text{d}$ kujuneb vähemalt 10 cm suurune alandus kihi veejuhtivusel $80 \text{ m}^2/\text{d}$ ja vähem ning jääb enamasti 5 meetri kaugusele kaevust (va Ordoviitsiumi-Kambriumi veekompleks, kus see võib ulatuda lausa 2000 m kaugusele). Pumpates vett $1 \text{ m}^3/\text{d}$ tekib vastav alandus ainult Ordoviitsiumi-Kambriumi veekihis ja mitte kaugemal kui 1 m kaevust.

6.2. Pumpamise mõju erinevate põhjaveekihtide läbilõikes

Kesk-Devoni põhjaveekompleksis on veejuhtivuste maksimaalne varieeruvus suur - $50 \text{ m}^2/\text{d}$ kuni $500 \text{ m}^2/\text{d}$, kuid suuremalt jaolt jääb see alla $100 \text{ m}^2/\text{d}$ (Perens & Vallner, 2007). Selliste veejuhtivuse juures on pumpamise mõjud suhteliselt suured ning alandus üle 10 cm tekib peaaegu alati (Tabel 5.1). Järelikult on mõistlik vee ammutamisse suhtuda suurema ettevaatusega.

Kesk-Alam-Devoni põhjaveekompleksis on võimalike veejuhtivuste vahemik küll sama, mis Kesk-Devonis, kuid pole kusagil mainitud, et reaalne vahemik on koondunud peamiselt väiksemate väärtuste juurde. Vastupidiselt on mainitud kõrget veetootlikkust (4-10 m alanduse juures puurkaevu deebit $260\text{-}700 \text{ m}^3/\text{d}$) (Perens & Vallner, 2007), mis lubab eeldada, et enamikel juhtudel ei tohiks pumpamismäär $5 \text{ m}^3/\text{d}$ suuremat ohtu kujutada.

Siluri-Ordoviitsiumi põhjaveekompleksis kujuneb veevõtul vähemalt 10 cm suurune alandus ainult minimaalsete veejuhtivuste juures (Tabel 5.3). Sellest lähtuvalt on S-O veekompleks oma suurte veejuhtivuste tõttu vee ammutamiseks üpris turvaline koht.

Samas võivad tekkivad absoluutsed arvutuslikud mõjuraadiused näida küll ulmeliselt suured, kuid sealsete alanduste suurusi arvestades ei ole nende tähtsus kuigi oluline.

Ordoviitsiumi-Kambriumi põhjaveekompleks on väikeste veejuhtivuste tõttu kõige ohustatum. Haapsalus, Rakveres, Tartus ja Rummus on sealne intensiivne veevõtt põhjustanud põhjavee survepinna ulatuslike depressioonilehtrite moodustumise (Karise jt, 2004). Põhja-Eestis suureneb tulevikus O-Cm vee kasutamine veelgi, kuna Kambriumi-Vendi põhjavees on liigselt suur kloriidide ja radionukliidide sisaldus ning on vaja leida alternatiivi (Karise jt, 2004). Sellest tulenevalt peaks igasugune lisakoormus põhjaveekihile olema hästi kontrollitud. Seda ka väiksema veevõtu, kui 5 m³/d korral.

Kambriumi-Vendi põhjaveekompleksi veejuhtivused on suured (150-700 m²/d) ning pumpamisega kaasnevad alandused põhjaveetasemes ei ületa 10 cm piiri (Tabel 5.5.1). Seega liigset ohtu veevõtmisel pole. Kuigi varasemalt oli Tallinnas ja Kohtla-Järvel intensiivse veevõtmise tulemusena kujunenud laiaulatuslikud depressioonilehtrid, siis praeguseks on veevõtmine vähenenud ja olukord paranemas (Karise jt, 2004). Veevõtmine on ohtlikum rannikuäärsetel aladel, kuna võib põhjustada soolase merevee sissetungi (Karise jt, 2004).

Gdovi veekihis on samuti veejuhtivused piisavalt suured (100-350 m²/d), et alandus üle 10 cm tekib vaid minimaalsel veejuhtivuse väärtusel. Arvestades veel, et enamik puurkaeve avab korraga nii Gdovi kui ka Voronka veekihi (Perens, 2005), siis on erideebet veelgi suurem ja pumpamisega kaasnevad depressioonilehtrid (alandused) väiksemad. Veevõtmine seega küllaltki ohutu. **Eraldi Voronka veekihist** pumbates võivad sealsed veejuhtivused olla ka 50 m²/d ning alandus suurusega 10 cm võib ulatuda kuni 200 m kaugusele (Tabel 5.2.2). Seega tuleks Voronkas veekihist eraldi pumbates olla ettevaatlikum.

KOKKUVÕTE

Töös kasutati Eestis levivate põhjaveekihtide hüdrogeoloogilisi parameetreid ning keskkonnaministri määrustega kooskõlas olevaid tingimusi arvutamaks puurkaevude, mis ei vaja vee erikasutusluba, põhjustatud mõjude ulatust. Veeseadus näeb ette, et pumpamismahul, mis ei ületa $5 \text{ m}^3/\text{d}$, ei ole vee erikasutusluba vaja. Samuti lähtuvalt veeseadusest on võetud pumpamise kestuseks 10 000 ööpäeva.

Eestis toimub põhjavee ammutamine enamasti aluspõhja settekompleksidest. Kuna sealsed põhjaveekompleksid on valdavalt surveelised ja voolamine mittestatsionaarne, siis on ka arvutused läbi viidud vastavatel eeldustel.

Settekomplekside veejuhtivused ja veemahtuvused on erinevad ning seega on ka veevõtmisest tulenevad mõjud erinevad. Arvutused näitavad, et probleemi ei tohiks tekkida suure veejuhtivusega põhjaveekompleksidest nagu Kesk-Alam-Devonist ja Silur-Ordoviitsiumist pumpamisel. Kambriumi-Vendi veejuhtivused on samuti suured, kuid intensiivse pumpamise ja merevee sissetungi ohu tõttu ei saa veevõtmise nii kergekäeliselt suhtuda. Oht suureneb merele lähenedes. Aladel, kus Cm-V on jaotunud kaheks, on ohustatum Voronka veekiht. Gdovi veekihi veejuhtivused on suhteliselt suured ning juhul, kui ei paikneta mere läheduses, on pumpamine üpris ohutu. Tihtipeale avavad puurkaevud mõjude vähendamiseks mõlemat veekihti. Probleemsemad põhjaveekompleksid on väikeste veejuhtivustega Kesk-Devon ja eriti Ordoviitsium-Kambrium, kust veevõtt on intensiivne ja mõjud suurimad. Seega peaks veevõtt O-Cm veekompleksist olema hästi kontrollitud.

Pumpamismahu ja -kestuse konstantsusel on olulisimaks mõjude ulatust määravaks teguriks põhjaveekihi veejuhtivus. Kihi veejuhtivuse suurenemine 5 korda tingib maksimaalse alanduse 5 kordse vähenemise. Mahtuvuskoeffitsient mõjutab alanduse maksimaalset sügavust suhteliselt vähe. Pigem määrab tekkiva depressioonilehtri kuju ja ulatuse, ehk kui kiiresti tekkinud alandus väheneb kauguse suurenemisega kaevust.

Absoluutne arvutuslik mõjuraadius ei ole mõjude hindamisel eriti ülevaatlik - väärtused võivad olla ulmeliselt suured, kuigi tekkiva alanduse sügavus ei ületa 10 cm-ki. Samuti ei sõltu absoluutne arvutuslik mõjuraadius väljapumbatava vee hulgast.

Absoluutsest mõjuraadiusest ülevaatlilikum on õhurõhu muutlikkusest tuletatud parameeter, ehk alandus suurusega 10 cm. Arvutused näitasid, et igapäevased keskmised õhurõhu kõikumised võivad põhjaveetasel muuta kuni 10 cm. Lähtuvalt tulemustest tekib pumpamisel alandus vähemalt 10 cm, kui põhjaveekihi veejuhtivus on 120 m²/d või alla selle. Maksimaalne alandus tekib O-Cm veekompleksis ja on suurusega 59,3 cm.

Kuna väiksemate veehaarete üle suurem kontroll puudub, jäävad veevõtu põhjustatavad mõjud ja keskkonnale tekitatud potentsiaalne kahju ainult veevõtu teostaja enda südametunnistusele. Antud töö tulemused võiksid kaasa aidata tuleviku veevarude hindamisel, et leida ühikmajapidamiste osakaalu veetarbest ning seeläbi osata kehtestada teatud põhjaveekihtidest veevõtmisele vastavalt rangemaid või leebemaid nõudeid.

VIIDATUD ALLIKAD

Kirjandus:

- **Bear, J. 1979.** Hydraulics of groundwater. McGraw-Hill Inc. New York. 569 lk.
- **Бочевер, Ф.М. 1968.** Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. Издательство „Недра“. Москва. 324 lk.
- **Cherry, J.A., Freeze, R.A. 1979.** Groundwater. Prentice-Hall. New Jersey. 604 lk.
- **Fetter, C.W. 2001.** Applied Hydrogeology. Edition 4. Prentice Hall PTR. New Jersey. 598 lk.
- **Karise, V., Metsur, M., Perens, R., Savitskaja, L., Tamm, I. 2004.** Eesti Põhjavee Kasutamine ja Kaitse. Eesti Põhjaveekomisjon. Tallinn. 80 lk.
- **KKM määrus nr 37.** 2010. Nõuded puurkaevu ja puuraugu projekti kohta. KKMm RT I 2010, 54, 352.
- **Kruseman, G.P. 1994.** Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. Second Edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen. 377 lk.
- **Marandi, A. 2010.** Põhjavesi Eestis ja Tallinna ümbruses. Rmt: Soesoo, A. (koost). Tallinna Geoloogia. Tallinna Raamatutrükikoda. Tallinn. 40-54 lk.
- **Perens, R., Vallner, L. 1997.** Water-bearing formation. Rmt: Raukas, A. ja Teedumäe, A. (Toim.). Geology and Mineral Resources of Estonia. Estonian Academy Publisher. Tallinn. 137-145 lk.
- **Perens, R. 2005.** Põhjavee seisund 1999.-2003. aastal. Eesti Geoloogiakeskus. Tallinn. 100 lk
- **Põhjaveevaru määramise kord.** 2003. KKMm RTL 2003, 16, 209.

- **Savitski, L., Savva, V. 2004.** Ühisveehaarde rajamisvõimaluste hindamine Viimsi poolsaarel. Eesti Geoloogiakeskus. 11 lk.
- **Savitski, L., Savva, V. 2005.** Kohtla-Järve piirkonna Kambriumi–Vendi põhjaveekompleksi tarbevarude ümberhindamine ja keemilise koostise muutlikkus aastani 2035. Eesti Geoloogiakeskus. 8 lk.
- **Theis, C.V. 1935.** „The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage“. Transactions, American Geophysical Union 16: 519–524 lk.
- **Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. 2008.** Fundamentals of Physics. 8th edition. John Wiley & Sons. 600 lk.
- **Veeseadus. 1994.** KKMm RT I 1994, 40, 655.

Internetileheküljed:

- **Fileccia, A., 2011.** Correcting water level data for barometric pressure fluctuations. Lk 25-27.
[http://www.filecciageologia.it/Download/Articoli_Fileccia_pdf/Correcting_GW_levels_using_BE_.pdf]. 04.05.2013
- **Isakar, M., 2103.** Eesti geoloogiline ehitus ja arengulugu.
[<http://www.ut.ee/BGGM/eestigeol/>] 08.05.2013
- **Kansas Ground Water.** Well construction and ground-water production.
[http://www.kgs.ku.edu/Publications/Bulletins/ED10/06_wells.html]. 15.11.2012

Andmebaasid:

- **Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut (EMHI).** Igatunnine õhurõhk Tõraveres 2012 aastal. 11.04.2013

SUMMARY

The extent of impact caused by small scale pumping wells depending on hydrodynamical properties of aquifers in Estonia

Rain Kärner

Drawdown and the radius of depression cone of small scale pumping wells which don't need permission for water use was computed by using the data of hydrogeological properties of aquifers in Estonia. The water legislations does not require water use permission for the wells which pumping rate is lower than 5 m³/d. Based on principles used for water resources calculations in Estonia, all the results are also given for 10000 days in current work.

Most of the groundwater used by drilled wells is discharged from bedrock aquifers in Estonia. The bedrock aquifers are mostly confined and therefore all the calculations are based on Theis method which deals with pumping effects on confined aquifers.

When discharge rate and duration are constant, the most crucial aspect that determines extent of impact is the transmissivity of an aquifer. If the transmissivity increases five times then the maximal drawdown is reduced five times. The storativity of aquifer has only a small impact on maximal drawdowns. It rather determines the shape and range of the forming cone of depression. In other words it shows how quickly drawdown decreases when drawing away from the well.

The maximum extent of cone of depression is not the best way to describe the actual extent of the impact caused by a pumping well. These values can be very high even when the maximal drawdown is less than 10 cm. Furthermore the maximum extent of cone of depression isn't affected by degree of pumping and it only describes the speed, how fast the cone of depression is evolving in plane.

More effective parameter to determine actual extent of pumping impact is the distance where the groundwater level drawdown is 10 cm. Such range was chosen as it covers the daily air pressure variability, which can normally change hydraulic head by up to 10 cm. According to the results, drawdown in hydraulic head is at least 10 cm, when

transmissivity is $120 \text{ m}^2/\text{d}$ or less. Maximal drawdown occurs in Ordovician-Cambrian aquifer system and is as big as 59,3 cm.

Transmissivities and storativities of aquifers are different and hence the impacts caused by the pumping wells are different. Calculations show that there shouldn't be a problem with aquifer systems having high transmissivity values like Middle to Lower Devonian and Silurian Ordovician aquifer systems. Transmissivity of Cambrian-Vendian (Cm-V) aquifer system is also high, but because of intense pumping and potential intrusion of seawater the discharging of groundwater must be taken with care. The threat is higher for well fields situated close to the sea. In areas where Cm-V aquifer system is divided into two separate aquifers, the more endangered one is Voronka aquifer. Gdov aquifer transmissivities are relatively high and when a pumping well does not position close to the sea, the water discharging is quite safe. Often the wells are penetrating both aquifers in order to reduce impacts. More problematic are Middle Devonian and especially the Ordovician-Cambrian aquifer system, where the intense water use has the greatest impact for water levels. Therefore the water consumption from Ordovician-Cambrian aquifer system must be controlled.

As the small scale water consumption ($< 5 \text{ m}^3/\text{d}$) is not regulated by the law, the impacts and potential harm to the environment caused by pumping wells is left only on the conscience of its conductor, in Estonia. The results of given thesis will provide background information for future groundwater reserves assessments which enables to calculate the proportion of small scale water consumption and hence helps to validate more relevant claims on water use from different aquifers.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Rain Kärner (sündinud: 21.01.1991), annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose: “Väikese tarbimisega puurkaevude mõju sõltuvus põhjaveekihtide hüdrodünaamilistest parameetritest Eestis”, mille juhendaja on Andres Marandi:

- 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, **20.05.2013**