

"Virumaa maavarade võimaliku kaevandamise keskkonnamõjud põhja- ja pinnaveele ning maastikule keskkonnageoloogiliste mudelitega analüüsituna koos alternatiivsete leevendusmeetmetega"

Köide 4. Hüdrogeoloogiline modelleerimine

Sisukord

1. Sissejuhatus	3
2. Virumudeli lühikirjeldus	4
3. Põhjavee toitumise ja veevahetuse üldine iseloom Pandivere kõrgustikul hüdrogeoloogilise mudeli alusel	6
4. Virtuaalsed fosforiidi kaevandused	11
4.1. Virtuaalne kaevandus VK1 (Põhja-Toolse)	12
4.2. Virtuaalne kaevandus VK2 (Põhja-Pandivere)	18
4.3. Virtuaalne kaevandus VK3a (Rägavere lääneosa)	22
4.4. Virtuaalne kaevandus VK3b (Rägavere idaosa)	28
4.5. Fosforiidi kaevanduste ühisjooned	29
4.5.1. Alanduslehtrite kujunemine	29
4.5.2. Mõju jõgede vooluhulkadele	30
4.5.3. Mõju veehaaretele ja kaevudele	30
4.5.4. Reostuskande kiirus põhjavee liikumisel kaevandamise ajal ja pärast kaevandamise lõppu	31
4.6. Leevendusmeetmed	33
5. Virtuaalne põlevkivikaevandus	36
Kasutatud ja viidatud kirjandus	40

1. Sissejuhatus

Projekti üheks peamiseks eesmärgiks on hinnata võimalike kaevanduste mõju põhjavee režiimile. Eelnevalt (kõide 2) eraldati välja neli näidisala, millest kolme puhul vaadeldi fosforiidi ja ühe puhul põlevkivi levikut ja kaevandamistingimusi. Näidisalade piires eraldati välja väiksemad testalad nn. virtuaalsed kaevandused, et analüüsida kaevandamisega kaasnevaid mõjusid detailsemalt. Järgnevalt analüüsitakse virtuaalsete kaevanduste põhjavee režiimi mõjutuste ulatust ajas ja ruumis.

Põhjaveerežiimi muutuste uurimiseks loodi regionaalne põhjavee mudel. Projekti rahastamistingimuste kohaselt tuli luua oluliselt detailsem mudel kui projekti eesmärkide täitmiseks oleks vaja olnud. Loodud mudel võimaldab analüüsida Ida- ja Lääne-Viru maakondade põhjavett puudutavaid küsimusi laiemalt.

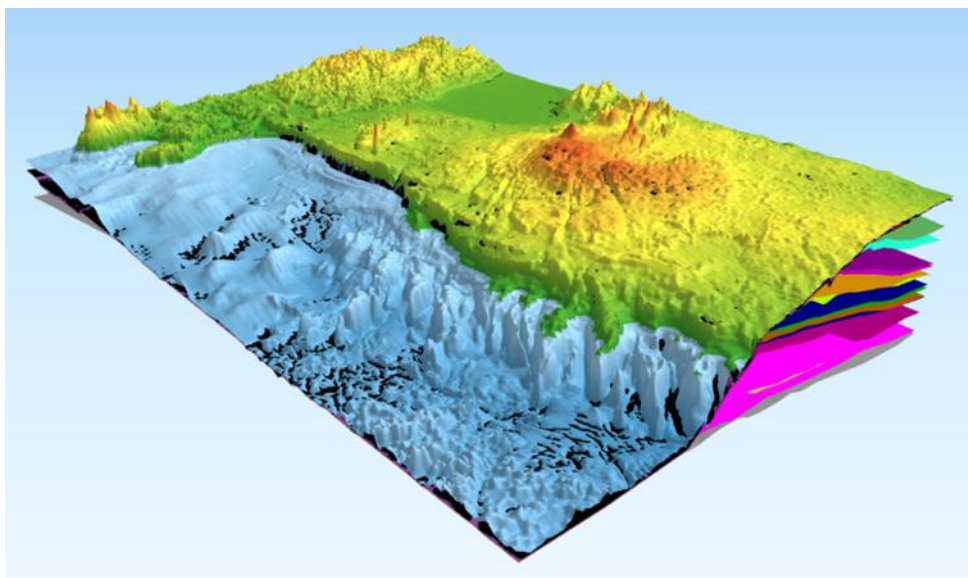
2. Virumudeli lühikirjeldus

Mudel katab territooriumi mõõtmetega 200 × 160 km (Joonis 1). Mudel on loodud Virumaadest suuremana, et hõlmata ka ümbruskonnas asuvaid toite- ja tarbimisalasid. Samuti välditakse sel moel modelleerimisvigu, mis tekkivad kui mõjud ulatuvad mudeli servades paiknevate rajatingimusteni.

Mudeli 20 kihti (Tabel 1) esindavad kõiki olulisi veekihte ja veepidemeid, mis mudeli alal esinevad. Kihipindade loomiseks kasutati Maa-ameti hallatava geoloogilise baaskaardi puuraukude andmestikku, kuid suurem osa andmeid tuli põlevkivi ja fosforiidi uuringuaruannete digiteerimise tulemusena koostöös Eesti Energiaga.

Mudeli alusandmestik (kihipindade reljeef, jõe ja dreeni rajatingimused jne) on loodud võrgusammuga 200 m. Vastavalt vajadusele saab suhteliselt kerge vaevaga luua mudelist versioone, kus mudeliala on vähendatud või võrgusamm on mudeli servaaladel suurem. Järgnevalt esitatud modelleerimise tulemused on saadud mudelitega, kust on eemaldatud 4 alumist kihti (Lükati-Lontova veepide kuni Gdovi veekiht) ja mudeli servaaladel on võrgusamm 1 km, samas on säilitatud 200 m võrgusamm virtuaalsete fosforiidi kaevanduste puhul Pandivere piirkonnas ja virtuaalse põlevkivi kaevanduse puhul Ida-Virumaal.

Mudelit saab käsitleda kui andmebaasi, mis sisaldab infot survetasemeid mõjutavatest teguritest nagu näiteks kaevu tasemel veehaarete tarbimisajalugu või karjääride-kaevanduste avamine, kasvamine ja sulgemine. Mudelis ei ole siiski kõiki puurkaeve, vaid ainult olulisemad (vee erikasutusluba omavad; Ordoviitsium-Kambriumi veekiht ja sellest sügavamad ning olulisemad Kvaternaari veekihi) puurkaevud.



Joonis 1. Virumaade põhjaveemudeli 3D vaade.

Tabel 1. Mudeli kihtide stratigraafilised vasted. Valged read on veekihid, hallid read veepidemed. Punase ja kollasega on tähistatud põlevkivi ja fosforiidiga seotud veekihid.

Nr	Kiht	Lade	Kihistu
1	Q	Kvaternaar	
2	D2ar	Aruküla	
3	D2nr	Narva	
4	D1pr	Pärnu	
5	S1rk	Raikküla	
6	S1jr	Juuru	
7	O3prk-prg	Porkuni, Pirgu	Ärina, Adila, Moe
8	O3vr	Vormsi	Kõrgessaare, Tudulinna
9	O3-2nb-rk	Nabala, Rakvere	Saunja, Paekna, Rägavere, Tõrremäe
10	O2on	Oandu	Hirmuse
11	O2kl-jh-id- kk	Keila, Jõhvi, Idavere, Kukruse	Kahula 2 ja Kahula 1
12	O2kk	Kukruse põlevkivi	
13	O2uh	Uhaku	Kõrgekalda
14	O2ls-as-kn	Lasnamäe, Aseri, Kunda	
15	O1-tl-lt-vr	Toila-Leetse, Latorpi, Volhovi, Varangu, Türisalu	Kalvi, Künnapõhja, Saka, Mäeküla, Joa, Klooga
16	O1pk- Ca1pr	Pakerordi, Pirita	Kallavere, Tsitre, Ülgase, Tiskre, Rannamõisa, Kakumäe
17	Ca1lk-ln	Lükati, Lontova	Tammeneeme, Kestla, Mahu, Sämi
18	V2vr	Voronka	Kannuka, Sirgala
19	V2kt	Kotlin	Kroodi
20	V2gd	Gdov	Uusküla, Moldova, Oru

Mudelis sisalduvad riiklikku seirevõrku kuuluvate või kuulunud vaatluskaevude aastakeskmiste survetasemete aegread ajavahemikust 1954 kuni 2016 ja neid saab kasutada endisaegsete situatsioonide kontrolliks. Virumaade hüdrogeoloogilise mudeli detailsem kirjeldus on toodud 5. köites.

3. Põhjavee toitumise ja veevahetuse üldine iseloom Pandivere kõrgustikul hüdrogeoloogilise mudeli alusel

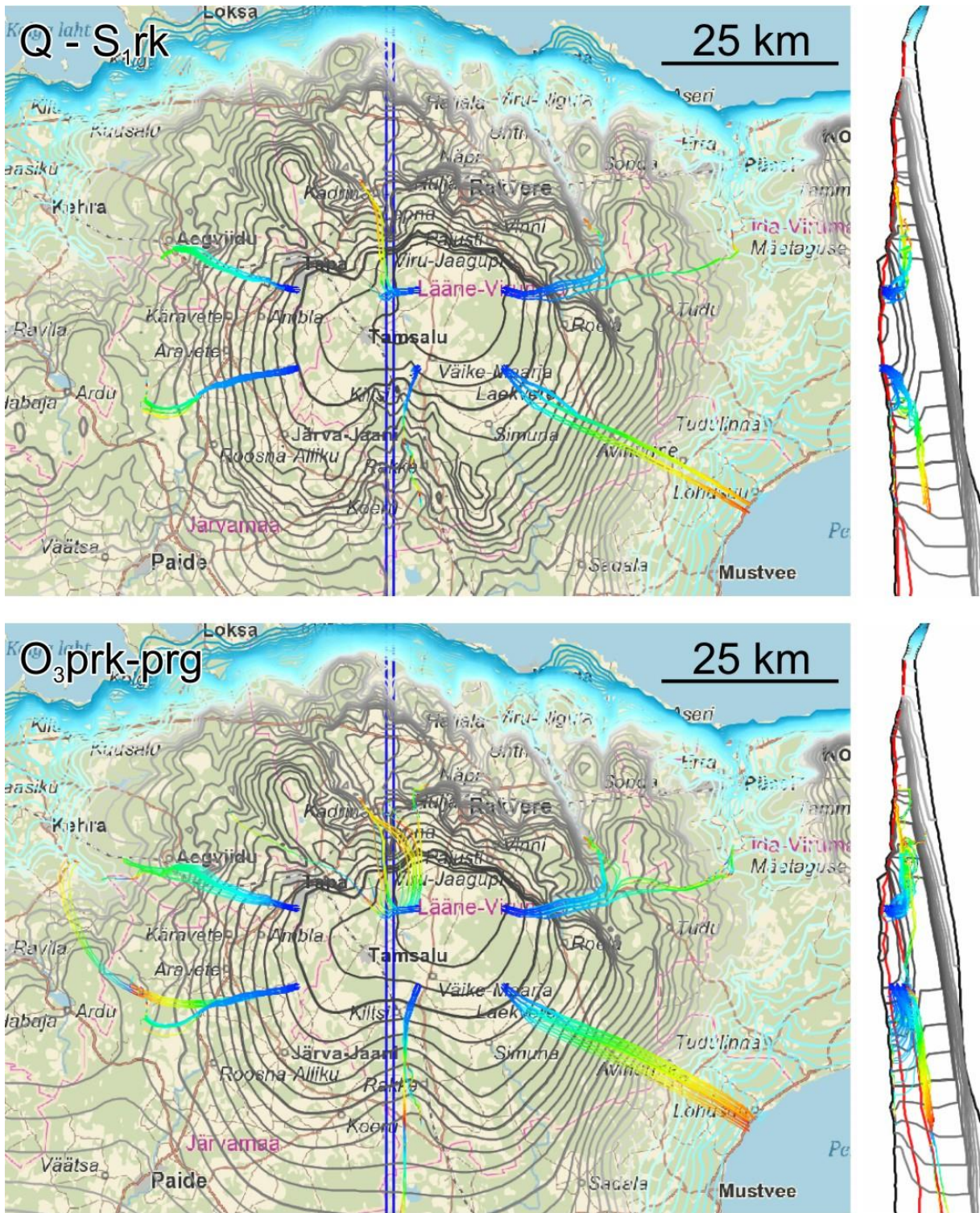
Virumaade põhjavee mudel on aeg-sõltuv mudel, mille filtratsiooniparameetrid tuginevad varasematel uuringutel ja need on täiendavalt kalibreeritud puurkaevude veetasemete aegridade alusel. Mudel võimaldab kvantitatiivselt kirjeldada looduslikku põhjavee voolamist erinevates kihtides. Mudelist eemaldati tarbekaevud, lisati mõned markerid Pandivere võlvi lähistele ning arvutati vooluteekonnad 5000 aasta jooksul kasutades kõigi kivimite puhul poorsust 10 %.

Modelleeritud vee voolamine on kooskõlas seniste arusaamadega põhjavee voolamisest (nt. Vallner 1997). Lokaalse ja kiire veevahetuse vööndi moodustavad Pandivere kõrgustikul pinnakatte, Siluri, Pirgu-Porkuni ja Nabala-Rakvere veekihid (Joonis 1, Joonis 2). Mida lähemal maapinnale, seda kiirem vee voolamine ja lühemad vooludistsid. Osa pinnalähedasest veest jõuab mõned kilomeetrid eemal paiknevatesse ojadesse ja jõgedesse aastate-kümnendite-sajanditega. Osa veest filtreerub Nabala-Rakvere veekihini, kus kõrgustikust põhjapoole (veekihi avamuse suunas) väljub põhjavesi mõne sajandi pärast jõgedesse. Lõunakaares on põhjavee vooluteekonnad pikemad ja väljavooluni kulub aastatuhandeid.

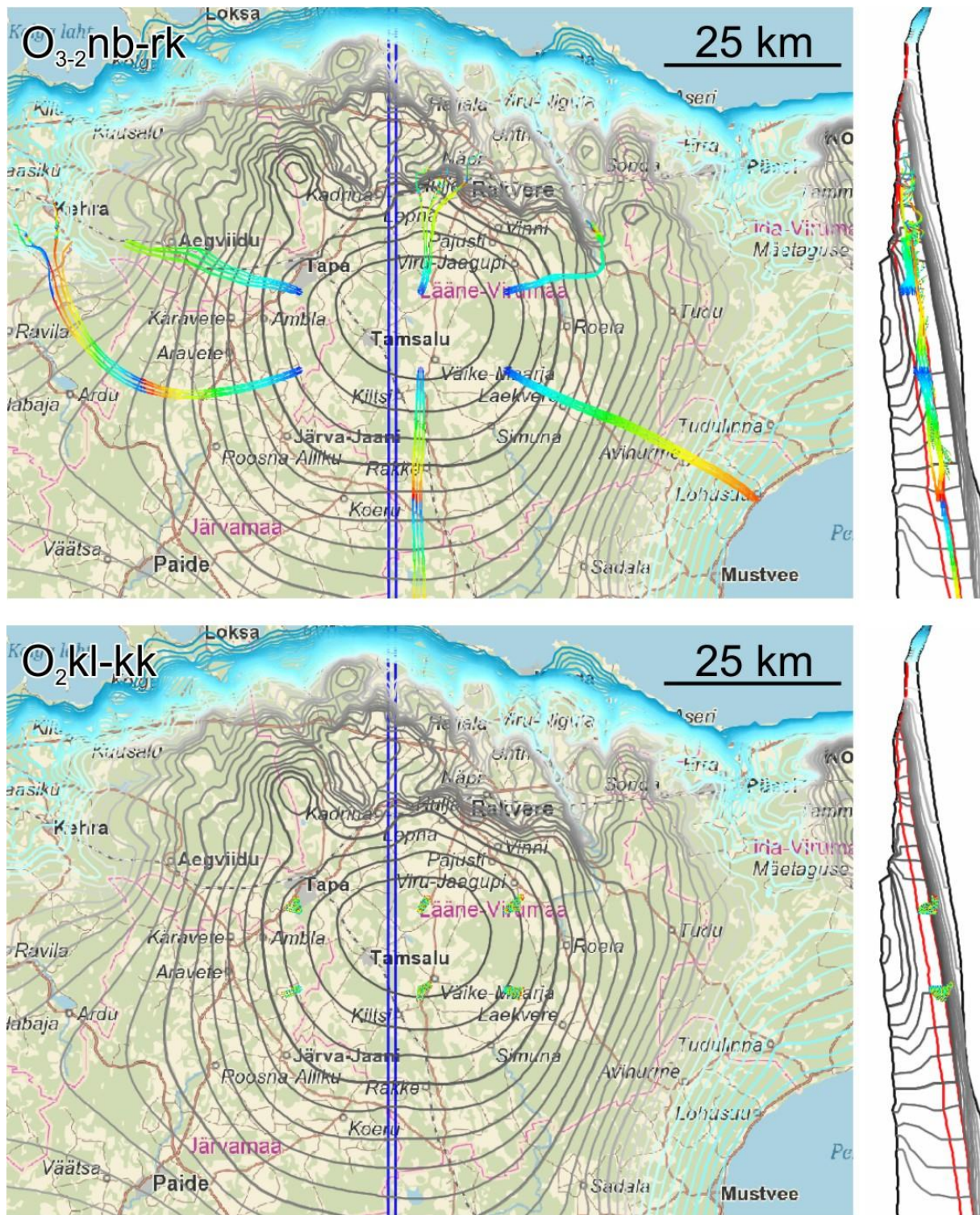
Pandivere kõrgustikul moodustavad Keila-Kukruse, Lasnamäe-Kunda ja Ordoviitsiumi-Kambriumi veekihid mõõduka veevahetuse vööndi (Keila-Kukruse veekiht avamusel kõrgustiku põhjanõlval kuulub kiire veevahetuse vööndisse). Kuigi survetasemed nendes veekihtides jälgendavad kõrgustiku reljeefi ja näitavad seoseid lasuvate veekihtidega, on vooludistsid 5000 aasta jooksul on mõõdetavad kilomeetrites (Joonis 2, Joonis 3). See on selgitatav mitme teguri koosmõjuga. Oandu, Uhaku ja Alam-Ordoviitsium on suhtelised veepidemed, mis lasevad vett läbi, kuid aeglaselt ja väikeses koguses. Veepidemete all on surved silutunud ja vett liikuma panev survegradient väiksem kui pindmistes veekihtides. Teisest küljest kolme veekihi lateraalne veejuhtivus on vastavalt 0,4, 0,75 ja 1,5–3 m/d, mis on oluliselt väiksem kui kiire veevahetuse vööndi veekihtidel (10–100 m/d).

Nimetatud kolm veekihti kuuluvad mõõduka veevahetuse vööndisse Pandivere kõrgustikul selles osas, kus nad asuvad suhteliselt sügaval. Kõrgustiku põhjanõlval või ka näiteks Ida-Virumaa põlevkivipiirkonnas, kus Keila-Kukruse veekiht avaneb, kuulub see kiht kiire veevahetuse vööndisse.

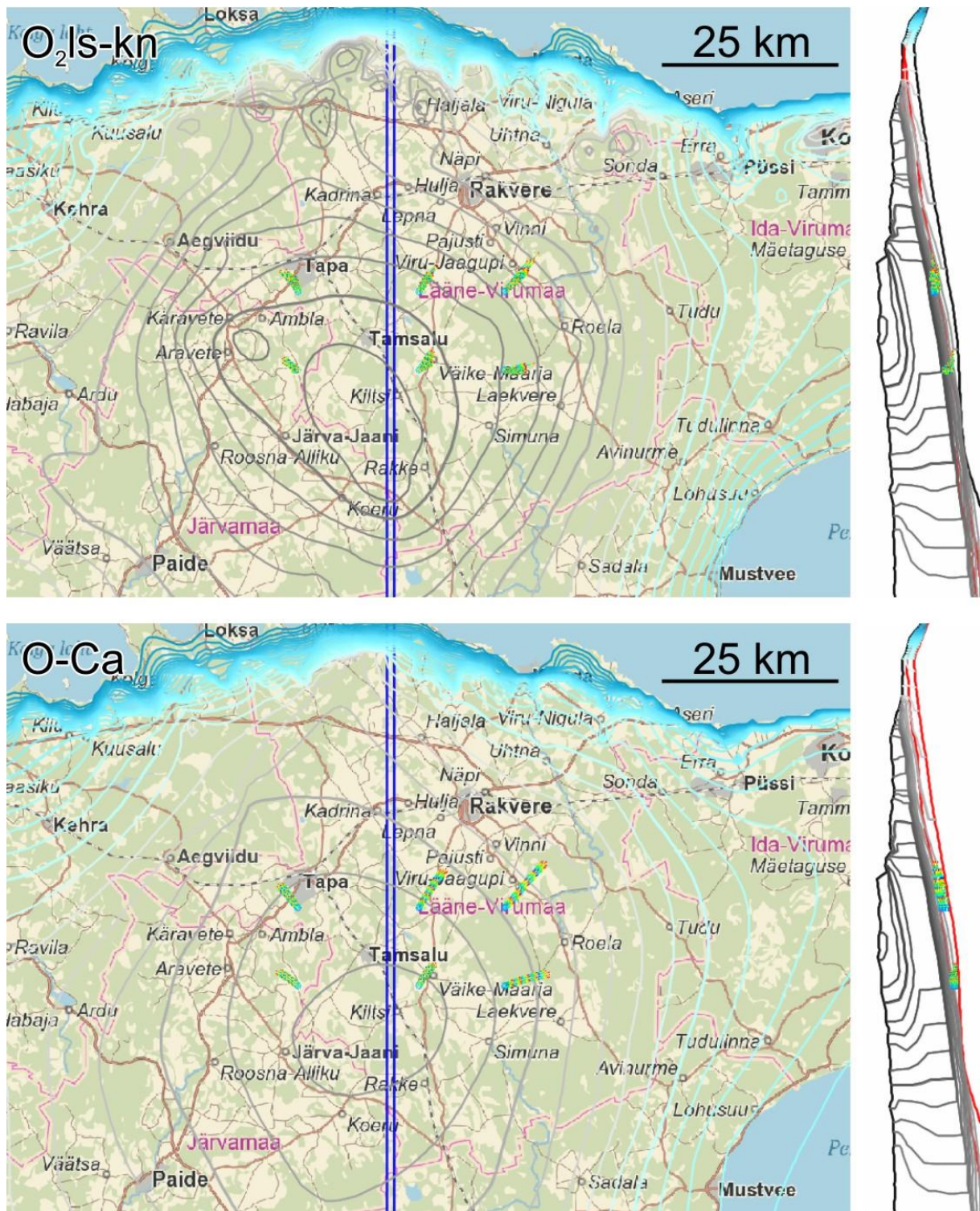
Gdovi ja Voronka veekihid on Viru maakondades (v.a. ranniku lähedal ürgorgudes) ülemistest veekihtidest väga hästi isoleeritud Lükati-Lontova ja Kotlini veepidemetega. Survetasemed nendes veekihtides ei näita Pandivere mõju. Need veekihid kuuluvad aeglase veevahetuse vööndisse. Need kihid saavad surve Lõuna-Eestis ja voolavad Soome lahe poole.



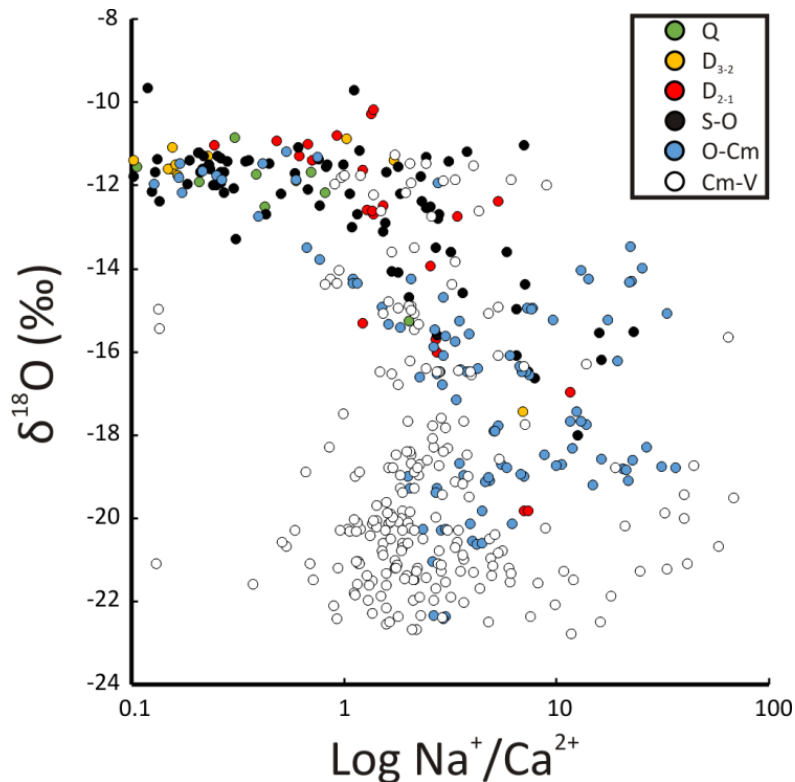
Joonis 2. Põhjavee vooluteekonnad markerpunktidest Q ja Raikküla veekihtides (üleväl) ja Pirgu-Porkuni veekihtis (all). Jooned sinisest punaseni markerivad vooluteekondi 1000 aasta jooksul (näiteks kui jooned kulgevad sinisest roheliseni, siis vesi jõudis maapinnale ~500 aasta pärast). Taustal on sinisest hallini tähistatud põhjavee survetase vastavas veekihtis või veekihi puudumisel maapinnalt esimeses kihis. Paremal asuva läbilõike asukoht on markeritud siniste püstjoontega.



Joonis 3. Põhjavee vooluteekonnad markerpunktidest Nabala-Rakvere veekihis (üleval) ja Keila-Kukruse veekihis (all). Jooned sinisest punaseni markerivad vooluteekondi 1000 aasta jooksul (näiteks kui jooned muutuvad sinisest roheliseni kaks korda, siis vesi on voolanud 2000 aastat). Maksimaalne voolamisaeg on 5000 aastat. Taustal on sinisest hallini tähistatud põhjavee survetase vastavas veekihis või veekihi puudumisel maapinnalt esimeses kihis. Paremal asuva läbilõike asukoht on markeritud siniste püstjoontega.



Joonis 4. Põhjavee vooluteekonnad markerpunktidest Lasnamäe–Kunda veekihis (üleväl) ja Ordoviitsiumi–Kambriumi veekihis (all). Jooned sinisest punaseni markeerivad vooluteekondi 1000 aasta jooksul (näiteks kui jooned muutuvad sinisest roheliseks kaks korda, siis vesi on voolanud 2000 aastat). Maksimaalne voolamisaeg on 5000 aastat. Taustal on sinisest hallini tähistatud põhjavee survetase vastavas veekihis või veekihi puudumisel maapinnalt esimeses kihis. Paremal asuva läbilõike asukoht on markeeritud siniste püstjoontega.



Joonis 5. Põhjavee hapniku isotoopkoostis (Pärn 2018). Algandmed pärinevad Raudsep et al., 1989; Savitski et al. 1993; Savitskaja and Viigand 1994; Savitskaja et al. 1995, 1996a, 1996b, 1997, 1998; Vaikmäe et al. 2001; Karro et al. 2004; Raidla et al. 2009, 2012, 2014, 2016; Suursoo et al. 2017; Pärn et al. 2016, 2018, lisaks avaldamata andmed T. Martma, J. Ivask, E. Kaup, J. Pärn, V. Raidla, R. Vaikmäe, 2018.

Modelleerimistulemused on kooskõlas põhjavee isotoopkoostise uuringutega. Põhjavett saab käsitleda kui erineva päritolu ja isotoopkoostisega vete segu. Nüüdissademete aasta keskmised $\delta^{18}\text{O}$ väärtused on vahemikus $-10,1$ kuni $-10,6\text{‰}$ (Punning jt. 1987; IAEA/WMO 2018), sademetoitelistes maapinnalähedastes veekihtides $-10,9$ kuni $-12,7\text{‰}$ (Pärn 2018). Mandrijäätumiste ajal tungis veekihtidesse liustiku sulavesi, mille isotoopkoostis oli oluliselt kergem (veekihtides kohati kuni $-22,5\text{‰}$). Lihtsustatult võib tõmmata piiri $\delta^{18}\text{O}$ väärtuse -14‰ juurest, millest positiivsem koostis näitab, et vesi on oluliselt mõjutatud jäätumisjärgsel perioodil (viimased 10 000 aastat) sadanud sademetest (veekiht läbipeetud), ja negatiivsem koostis näitab liustiku sulavee suurt osakaalu (sulavesi säilinud). Joonis 5 näitab, et Kambrium-Vendi ja Ordoviitsiumi-Kambriumi veekihtides on liustiku sulavesi laialt esindatud, kuid liustiku vett esineb kohati ka Siluri-Ordoviitsiumi ja Devoni veekihtides.

4. Virtuaalsed fosforiidi kaevandused

Lähtudes fosforiidi levikust, geoloogilistest kriteeriumitest, kaevandamise keskkonnaningimustest ja maastike taastamise võimalustest eraldati eelnevalt välja kolm näidisala (kõide 2), mis sobivad virtuaalsete fosforiidi kaevanduste modelleerimiseks. Näidisalade piires eraldati omakorda väiksemad testalad ehk virtuaalsed kaevandused, mida on suuremate või väiksemate mõõndustega võimalik näidisalal piires liigutada.

Virtuaalsete kaevandustega testiti järgmisi situatsioone:

- **Baasmudel**is alandatakse kaevealal **O-Ca veekihi survetase 10 m veekihi pealispinnast madalamale** (dreeni rajatingimus kogu kaevealal). Mudel esindab kaevandust, kus rakendatakse kaevanduskäikude tagasitäitmist või muid tehnoloogiaid, mille tulemusena katvad kihid ei purune, tehnoloogilised käigud-šahtid ja puuraugud kaevanduse kohal ei leki (**vertikaalne veejuhtivus sama mis ümbritseval alal**). Baasmudeli suhtes võrreldakse muid variante.
- Modelleerimise baasmudel iseloomustab allmaakaevandamise ideaaljuhtumit, kus fosforiidi katendiks olevaid lasuvaid kihte ei rikuta ja neid ei dreenita täiendavalt. Põlevkivi kaevandustesse voolab lasuvatest kihtidest oluliselt rohkem vett sisse kui nende kihtide filtratsiooniparameetrid kaevandusvälisel alal lubaksid ennustada. See on kombineeritud efekt, kus mängivad rolli vajumisega seotud täiendava lõhelisuse teke, looduslike lõhede avanemine, tehnilised rajatised (nt ventilatsioonishahtid, elektrivarustuse puuraugud) jmt. Mäetehniliste tingimuste analüüs näitas, et fosforiidi kaevandustes toimuvad samad efektid, kuna toetuseks jäetud tervikud ja kattekihid purunevad. Erinevate tegurite summaarse mõjuga arvestamiseks ja baasmudeli **tundlikkuse analüüsiks suurendati lasuvate kihtide vertikaalset veejuhtivust 10, 100 ja 1000 korda**. Tinglikult simuleeritakse olukordasid, kus kaevandus täidetakse või jäetakse oluliselt suuremad tervikud käikude vahele, kattekihid ja tehnoloogilised käigud ja shahtid lekivad vähe kuni mõõdukalt kuni tingimusteni, kus käike ei täideta, tervikud ja kattekihid aja jooksul purunevad ja/või kaevanduse lagi langetatakse.
- Toolse maardla puhul, kus fosforiidi lasundi väikese sügavuse tõttu oleks võimalik avakaevandamine, testitakse **karjääri mõju põhjavee režiimile**.
- Ühe **võimaliku leevendusmeetmena**, millega vähendada kaevanduse ümber kujuneva depressioonilehtri ulatust ja kaevandusest välja pumbatava vee hulka, ümbritsetakse kaevandus osaliselt või täielikult kahe puurkaevude ringiga, millest ühe ringiga pumbatakse vett välja, et see ilma õhutamata juhtida samasse veekihti tagasi teise kaevude ringi kaudu. Pumbatavad kaevud paiknevad ligikaudu 1 km kaeveala piirist, tagasijuhtimiskaevud ligikaudu 5 km piirist.

Mudelites alandati veekihi survetase 30 aastaks kogu kaeveala piires, et näha maksimaalset mõju veekihtidele. Arvutusteks modifitseeriti regionaalset põhjaveemudelit. Mudeli võrgusamm 200 m säilitati ligikaudu 35 × 35 km suurusel alal Pandivere kõrgustiku kirdeosas, kaugemal kasvas samm kuni 1 km. Kuna virtuaalsete kaevanduste lähistel ei lõiku mattunud orud läbi Lükati-Lontova regionaalse veepideme, siis eemaldati mudeli versioonist neli alumist kihti (Lontova, Voronka, Kotlin, Gdov), kuna need ei mõjuta mudeli tulemusi. Mudelid simuleerivad olemasolevate tarbimis- ja muude andmete põhjal perioodi 2010

(tasakaaluline olukord) kuni 2016, misjärel lülituvad 30ks aastaks sisse kaevandused ning seejärel arvutatakse survetasemete taastumist 15 aasta jooksul.

4.1. Virtuaalne kaevandus VK1 (Põhja-Toolse)

Virtuaalne kaevandus VK1 koosneb kahest eraldi asetsevast kaevealast Selja ja Kunda mattunud orgude vahelisel alal. Kaevealaid eraldab Toolse jõgi, mille orundis osaliselt samuti puudub fosforiidi kiht. Eeldatava kaevandusmahu (1 milj tonni aastas 30 aastase perioodi kestel) saavutamiseks tuleks kaevandada mõlemal kaeveväljal. On tõenäoline, et kaevandamine toimuks üks ala korraga, et vähendada kuivendamist vajava ala pindala, välja pumbatava vee hulka ja selle pealt makstavaid tasusid. Sellest lähtuvalt modelleeriti kaevealade mõjusid nii eraldi kui ka koos.

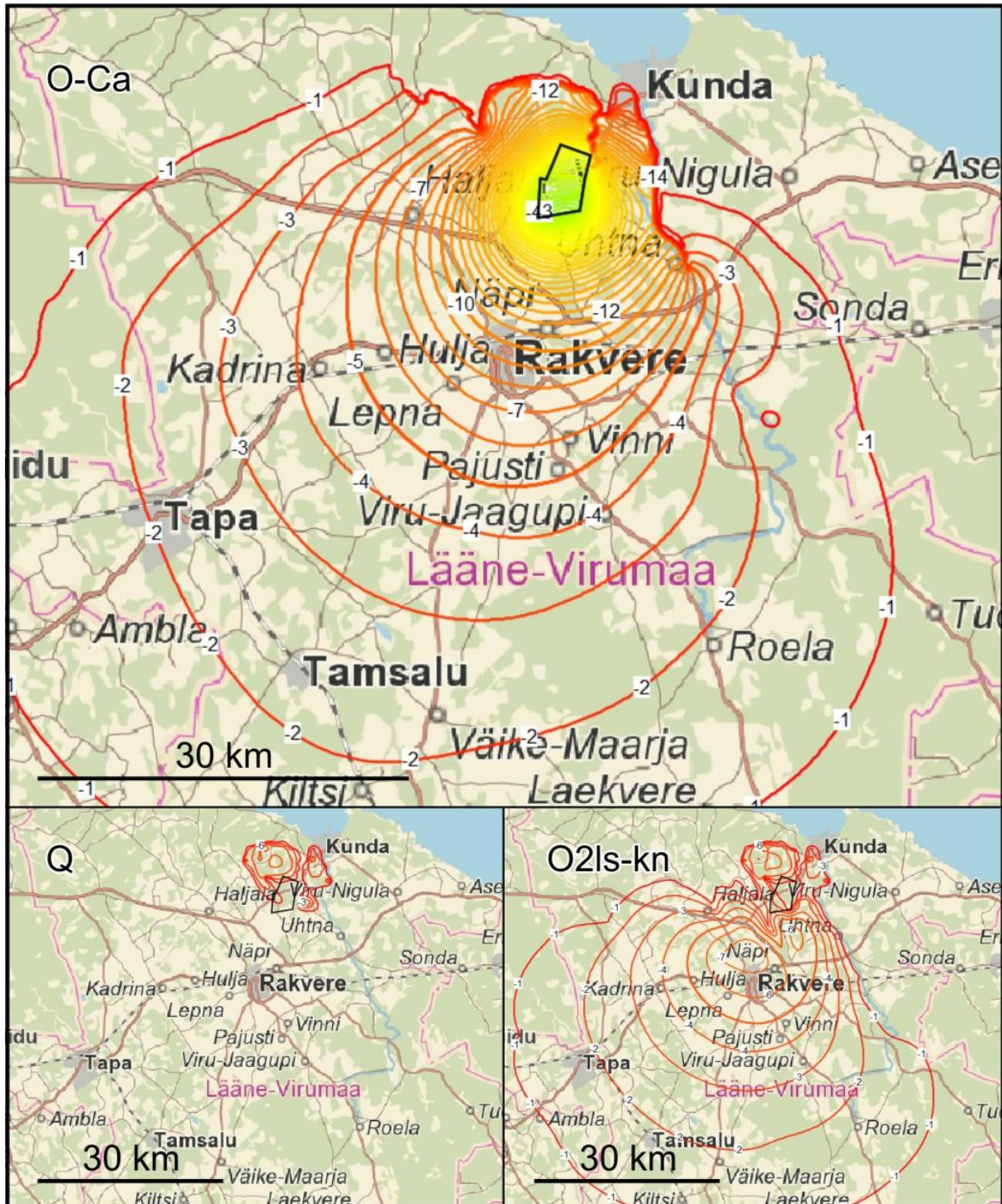
Juhul kui katvate kihtide vertikaalne veejuhtivus ei muutu siis allmaakaevandus läänepoolsel kaevealal **VK1a** põhjustab 30 aastaga survetaseme alanduse kaevandamiseelse tasemega võrreldes O-Ca veekihi vahemikus -43 m (lõunaosas) kuni -27 m (põhjaosas) (Joonis 6). Alanduse erinevus kaeveala piires tuleneb asjaoludest, et fosforiidikiht on lõunapoole kaldu, samas kui looduslik survetase langeb põhja (avamuse) suunas. Depressioonilehter (survetaseme alandus O-Ca veekihi vähemalt 2 meetrit) ulatub lääne ja lõuna suunas 30–50 km. Põhjas levib lehter avamuseni, idas kuni Kunda mattunud oruni mõned kilomeetrid eemal. Kaevandusala läheduses on depressioonilehter järsk (~ 10 m/km). Viie kilomeetri kaugusel võib alandus olla vahemikus 10–15 m.

Mudelarvutused näitavad, et survetaseme muutus Lasnamäe–Kunda veekihi (O_2ls -kn) ulatub kuni 7 meetrini, kusjuures alanduslehteril on mitu keset (Joonis 6). Vahetult kaevanduse lähedalt kulgevad orud, mille kaudu O_2ls -kn veekiht saab toidet. Rakvere lähistel moodustub lehtri kese, kuna see ala jääb orgudest suhteliselt kaugemale. Kaevandusest põhjapool tekkib lehter, kuna orgudes kulgevad jõed ei toida veekihti. Samas kohas alaneb veetas ka pinnakattes.

Kaevandusega seotud depressioonilehter moodustub väga kiiresti. Juba mõne aastaga saavutatakse O-Ca veekihi pooltasakaaluline seisund ning edasine survetaseme langus ja depressioonilehtri laienemine kulgevad aeglaselt (Joonis 7). Sarnaselt alanduslehtri moodustumisele on ka lehtri täitumine kiire. Mudel ennustab, et surve taastumine veekihi toimub paari aasta jooksul.

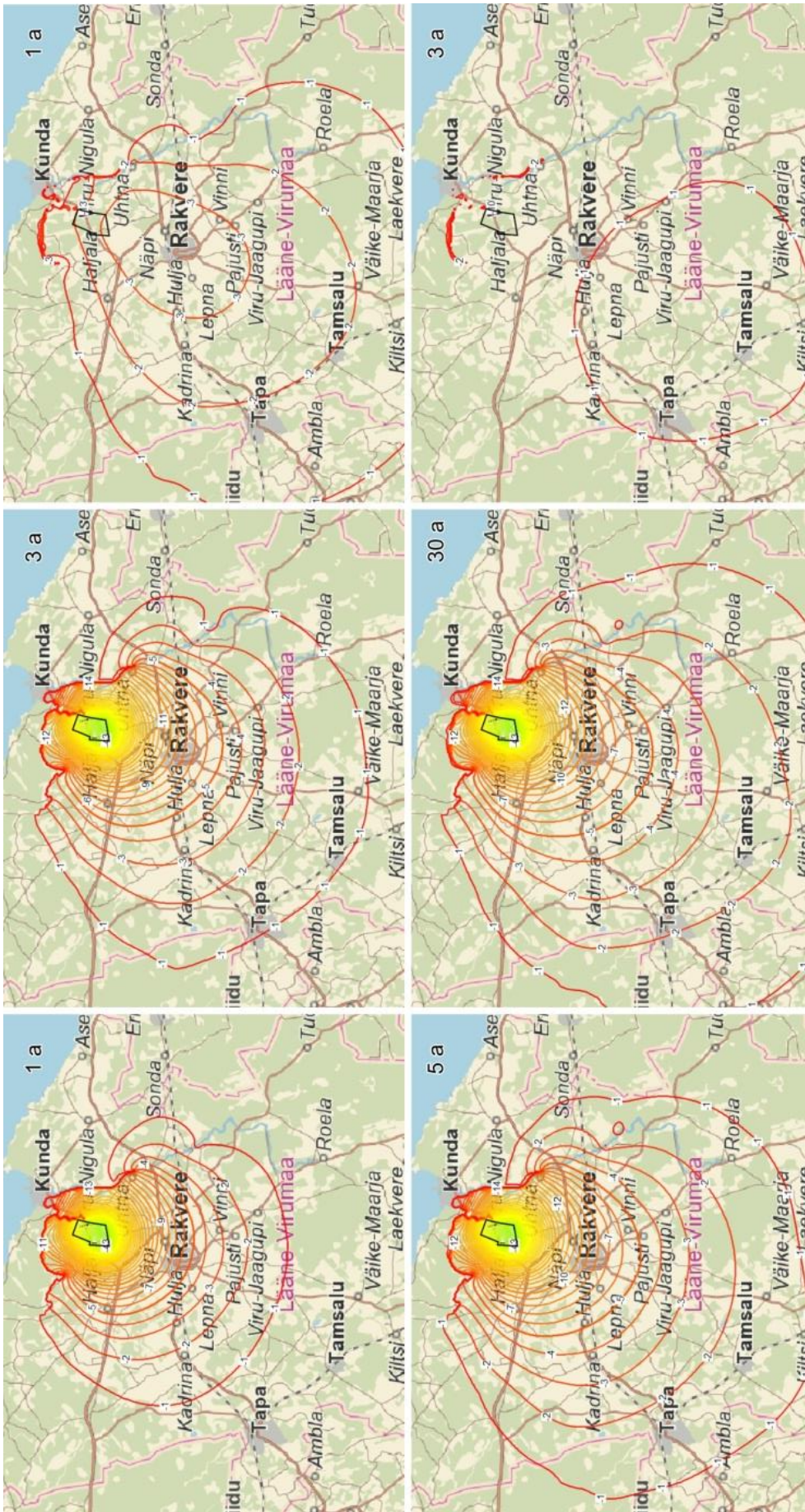
Idapoolse kaevanduse **VK1b** rajamine põhjustab läänepoolsega analoogilised survetaseme alandused (Joonis 8). See on ootuspärane, kuna alad asuvad lähestikku (keskmete vaheline kaugus ~ 3 km) ning on hüdrogeoloogiliselt sarnastes tingimustes. Mõjude sarnasus avaldub nii alanduslehtri ulatuses kui ka väljakujunemise ja täitumise kiiruses (Joonis 9).

VK1b asub lähemal Kunda mattunud orule, mis on O-Ca veekihi väljavoolualaks ning seetõttu on kaevandamiseelsed (praegused) veetasemed madalamad kui kaevealal VK1a. Mõlemal kaevealal toimub vee voolamine lõunast ja edelast, VK1a-le voolab vett ka läänest. See avaldub täismõõdus kaevandusest väljapumbatava vee hulgas, mis VK1b puhul on keskmiselt 9600 m³/d ja VK1a puhul $12\,500$ m³/d (Joonis 10).

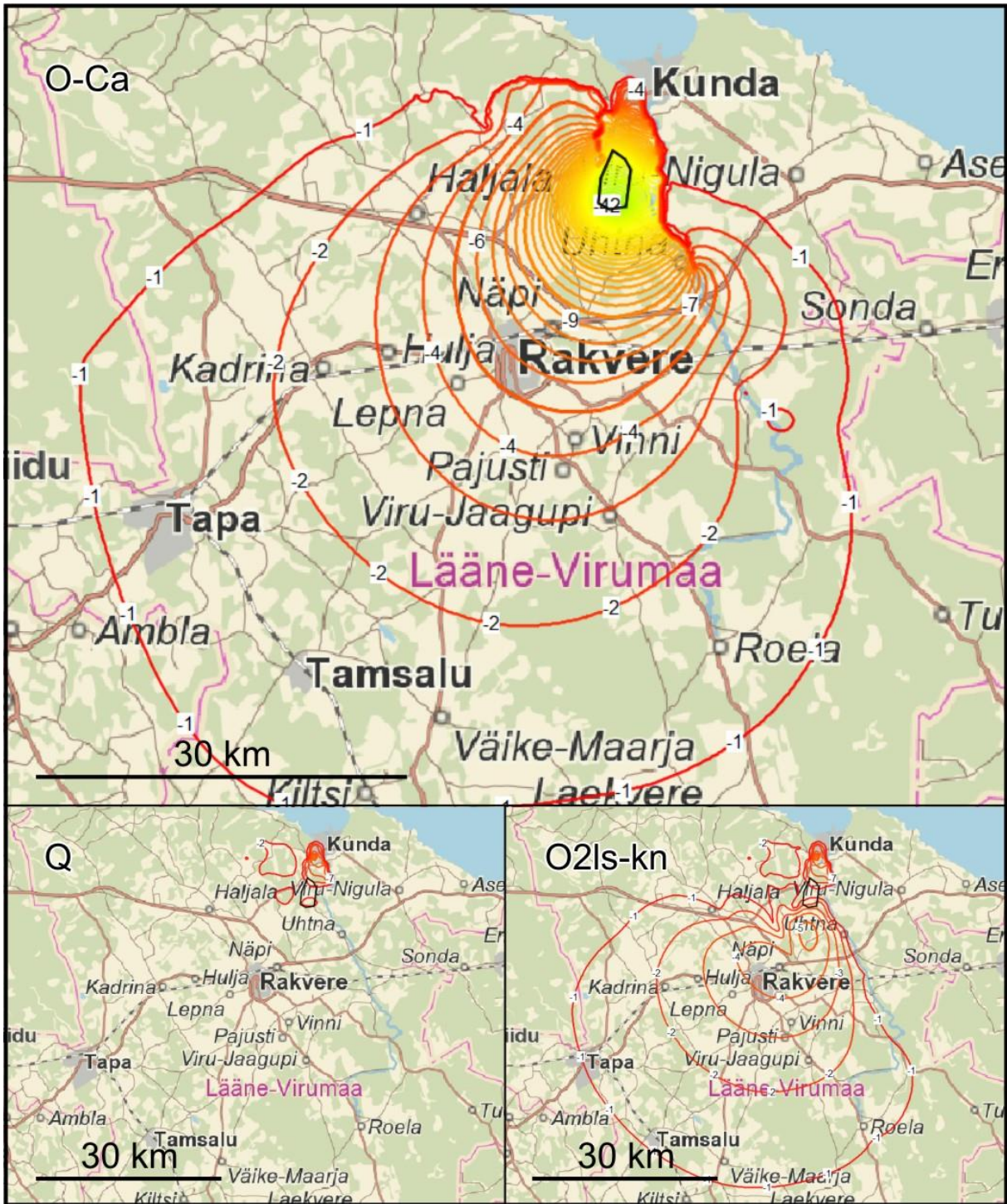


Joonis 6. VK1a poolt põhjustatud survetaseme muutused veekihtides 30 aasta möödumisel.

Kaevanduste VK1a ja VK1b üheaegne töötamine ei suurenda oluliselt moodustuva alandusleetri ulatust (Joonis 11). Kaevandused asuvad teineteise läheduses, kus tugeva mõjutuse vööndid suuresti kattuvad. Näiteks Rakvere linna territooriumil on O-Ca veekihi survetaseme alandused 1a ja 1b korral vastavalt 8–12 m ja 5–7 m, mõlema kaeveala

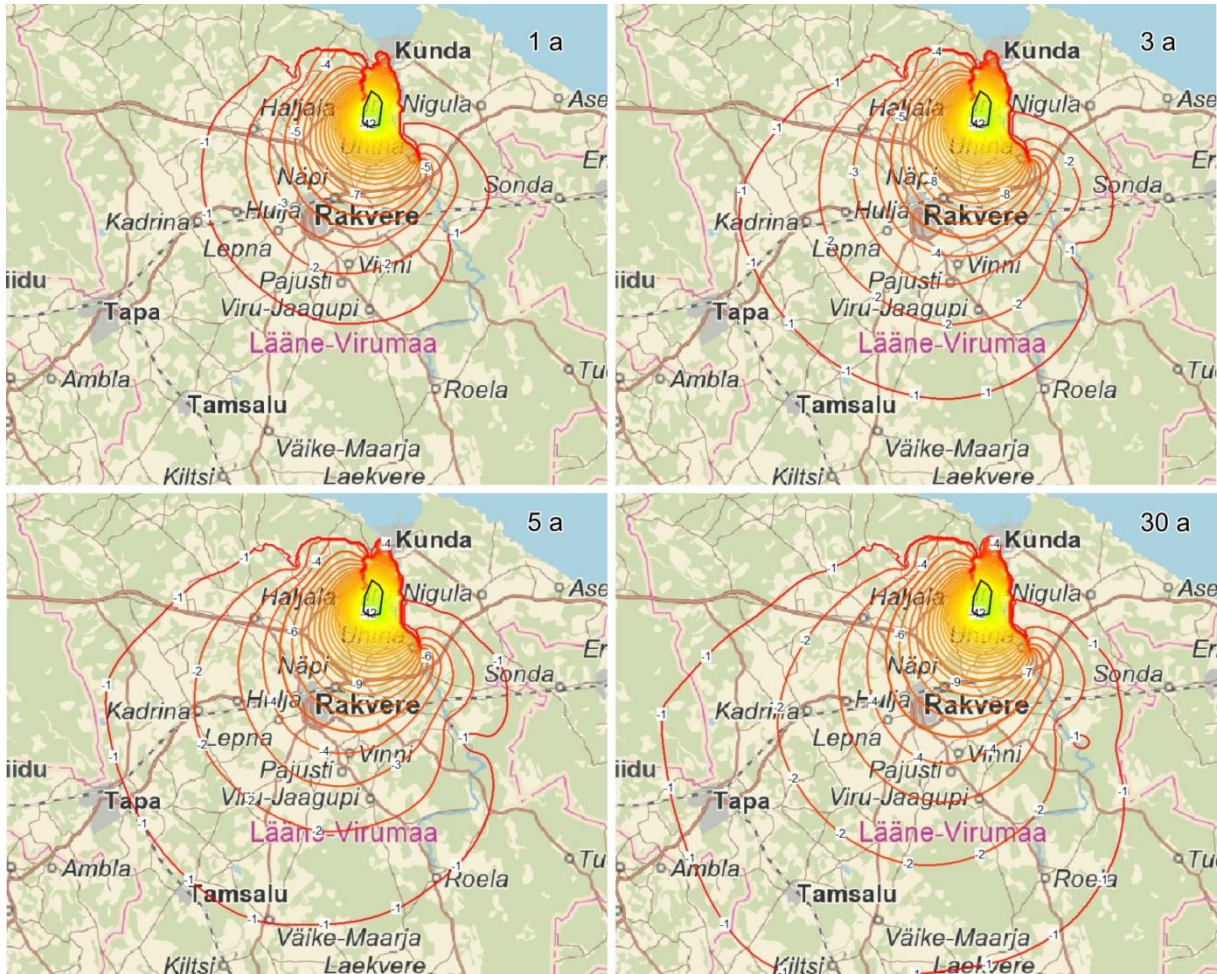


Joonis 7. VK1a põhjustatava survetaseme muutus O-Ca veekihis kaevandamise alguses (vasakul ja keskel) ning ja kaevandamisjärgne taastumine (paremal).



Joonis 8. VK1b poolt põhjustatud survetaseme muutused veekihtides 30 aasta möödumisel.

samaaegsel töötamisel 9–13 m. O2ls-kn veekihis on kaevanduste koosmõjust tulenevad survetaseme alandused samades piirkondades, kuid mõne meetri võrra suurematena. Kaevandustest kokku välja pumbatava vee hulk on 17 500 m³/d (Joonis 10).

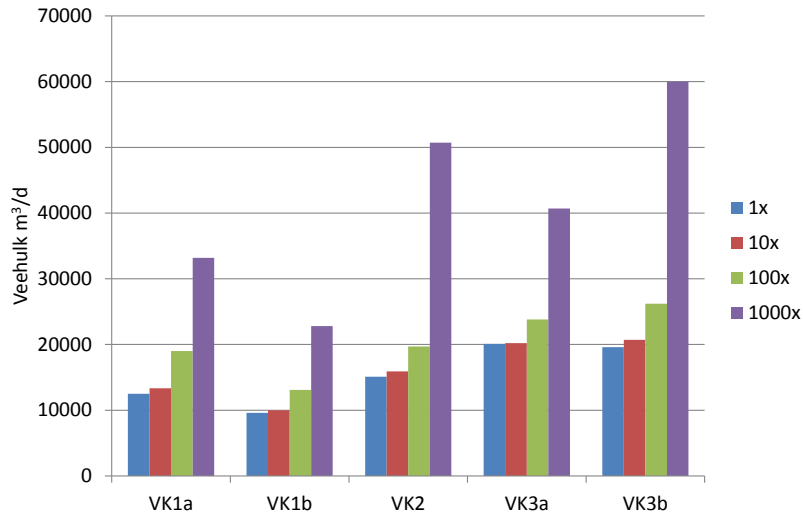


Joonis 9. VK1b põhjustatava survetaseme muutus O-Ca veekihis kaevandamise alguses.

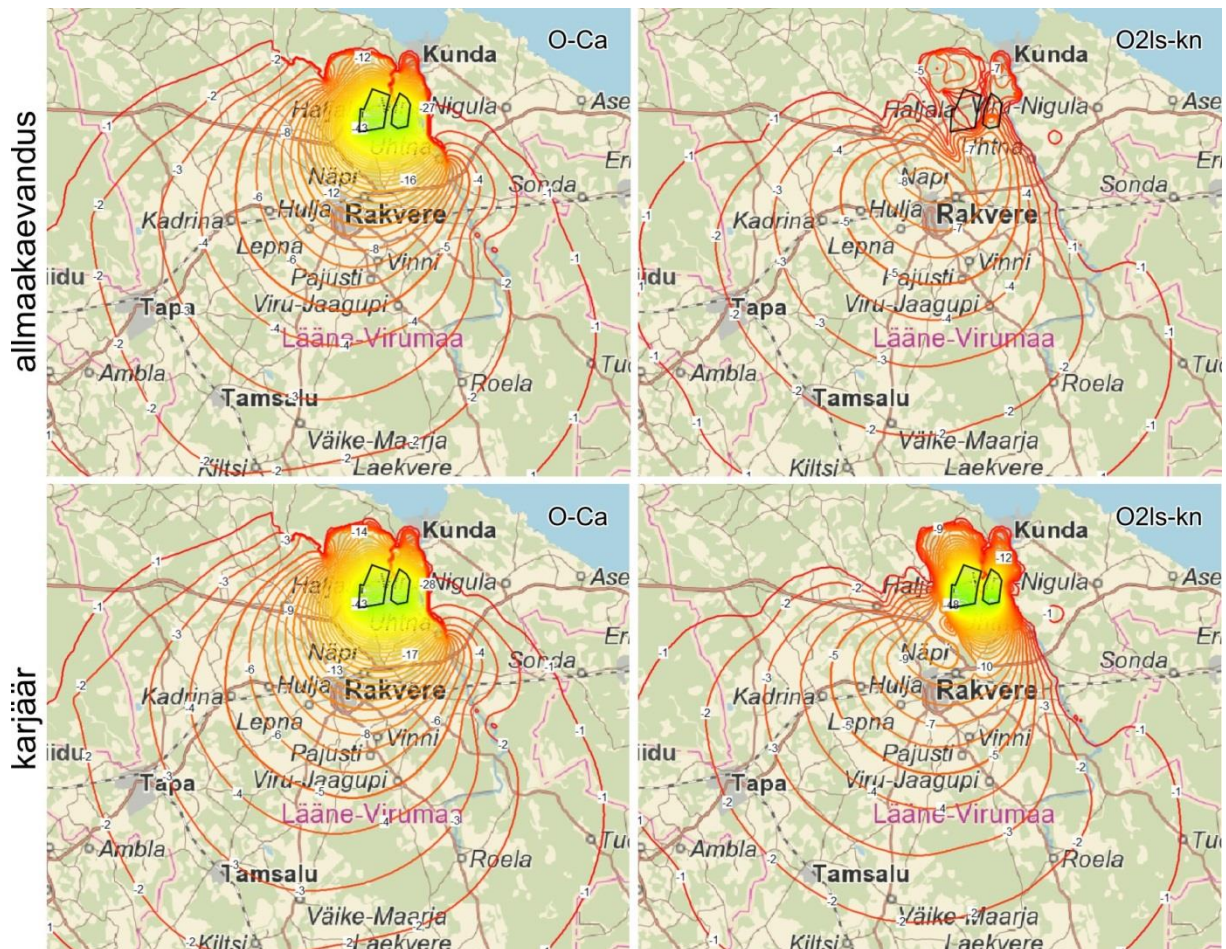
VK1 paigutamisel lähtuti sellest, et Põhja-Toolses on võimalik avakaevandamine (tervikute tõttu fosforiidi varu kadu 30% ei arvestatud). Arvutused näitavad, et **karjääriviisilisel kaevandamisel** O-Ca veekihis kujunev survetaseme langus on allmaakaevandusega võrreldes sarnane (Joonis 11).

O2ls-kn veekihis moodustub Selja ja Kunda jõgede vahelisel alal ulatuslik depressioon. Karjäärist välja pumbatava vee hulk on allmaakaevandusega võrreldes kordades suurem ulatudes VK1a, VK1b ja VK1a+VK1b puhul vastavalt 50 000 m³/d, 33 000 m³/d ja 66 000 m³/d. Põhja-vee suur sissevool karjääri on Pandivere kõrgustiku jalamil ootuspärane ning samas piirkonnas toimivate Ubja põlevkivi ja Aru lubjakivi karjäärides vaadeldav, eriti kevadise suurvee perioodil. Lubjakividest sissevoolava vee hulka saaks oluliselt vähendada veetõkke (analoogiks nt. Sirgala II karjääri lääneosas) rajamisega.

Juhul kui katvate kihtide vertikaalne veejuhtivus muutub 10 korda suuremaks VK1a ja VK1b aladel, siis kaevandustegevuse ajal põhjaveerežiim sisuliselt ei muutu. Alanduslehid paiknevad samades kohtades baasmudeliga ligilähedaste väärtustega, kaevandusse sissevoolava vee hulk kasvab vastavalt 7% ja 4%.



Joonis 10. Kaevandustest väljapumbatava vee hulk sõltuvalt kaevanduse kohal lasuvate kihtide vertikaalse veejuhtivuse muutusest.



Joonis 11. Survetaseme muutused VK1a ja VK1b samaegsel töötamisel allmaakaevandusena (üleväl) või karjäärina (all).

Juhul kui katvate kihtide vertikaalne veejuhtivus muutub 100 korda suuremaks VK1a ja VK1b aladel, muutub veetase kaevandustegevuse ajal oluliselt Ordoviitsiumi lubjakivides vahetult kaevanduse kohal ja lähiümbruses (lähim kilomeeter). Lagede lekkimise tulemusena kasvavad kaevandustesse voolava vee hulgad baasmudeli võrdluses vastavalt 50% ja 35%.

Juhul kui katvate kihtide vertikaalne veejuhtivus muutub 1000 korda suuremaks VK1a ja VK1b aladel kasvab kaevandustegevuse ajal kaevandusse voolava vee hulk baasmudeliga võrreldes ligikaudu 2,5 kordseks. Kaevanduste kohal ja neist põhjasuunas leviala servani võivad Ordoviitsiumi lubjakivid kuivaks jääda.

Katendi omaduste muutumine ei muuda O-Ca veekihi moodustuva alanduslehtri suurust ega amplituudi.

Kattekihtide suurenenud filtratsioonivõime muudab mõningal määral veerežiimi kaevanduse sulgemise järel. Vertikaalse veejuhtivuse muutumisel 1000 korda jääb maapinnalähedastes kihtides veetase kaevandamiseeltega võrreldes kuni 6 m sügavamale. Allapoole filtreeruv vesi tõstab O-Ca veekihi veetaset kuni 3 m. See ei muuda üldist põhjavee voolamise suunda kirdesse (mere ja Kunda oru poole).

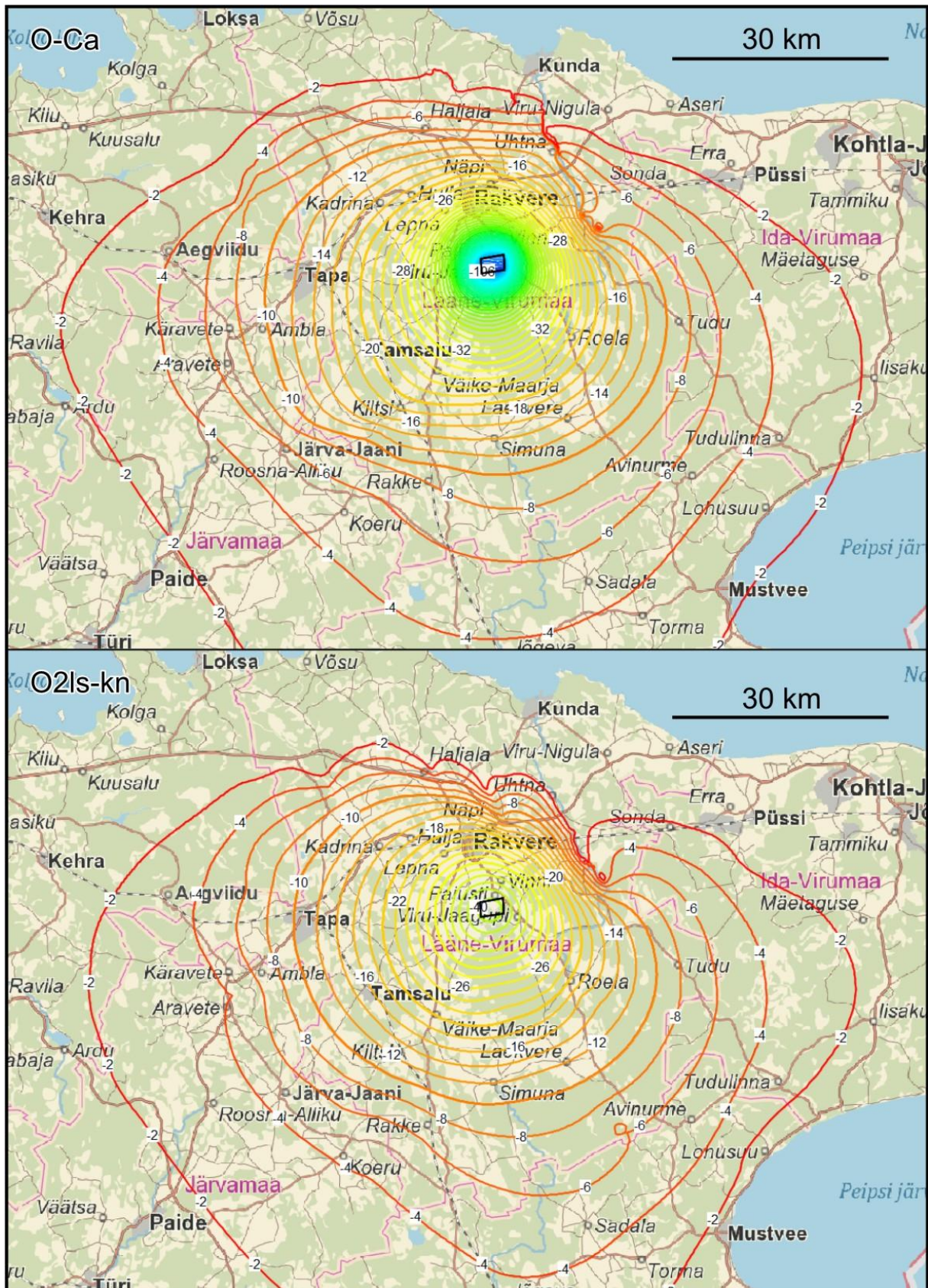
Virtuaalse kaevanduse VK1 mõjualasse jäävad mitmed Lääne-Virumaa 2018 seisuga kinnitatud varudega põhjaveemaardlad, kus tarvitatakse O-Ca või O veekihtide põhjavett. Kadrina, Tamsalu ja Tapa veehaarded asuvad kaevandusest mitmekümne kilomeetri kaugusel, kus arvutuslikult langeb survetase 5 meetrit või vähem. Rakvere Arkna veehaarded ja Virukivi O veehaare Essus asuvad võõndis, kus survetasemed võivad alaneda 10–20 m. Arkna veehaardetes jäävad veekihiid survelehteks.

Selja ja Kunda jõgede vahelisel alal asuvad salvkaevud ja madalad puurkaevud saavad oluliselt mõjutatud ja vajavad kaevandusettevõtja poolset lahendust.

4.2. Virtuaalne kaevandus VK2 (Põhja-Pandivere)

Virtuaalne kaevandus on paigutatud Pandivere kõrgustikul Rakvere fosforiidimaardla rikkamale osale. Fosforiidi kihi suhteliselt suure paksuse tõttu võib kaevandus olla suhteliselt väike (VK2 kaeveala pindala 6,5 km²). Regionaalne põhjavee voolusuund kaevealal on kirdesse, survetase O-Ca veekihi on tänapäeval kaevealal ~55 m ümp ning O₂Is-kn veekihi ~60 m ümp.

Juhul kui katvate kihtide vertikaalne veejuhtivus ei muutu, siis allmaakaevandus **VK2** põhjustab O-Ca veekihi survetaseme languse kuni 106 m (Joonis 12). Suur taseme muutus tuleneb kuivendatava kaevanduse positsioonist ligikaudu 40 m allpool merepinda. Moodustuv alanduslehter mõjutab veekihi survetasemeid enam kui 50 km kaugusele kaevealast nii lääne kui ka lõuna suunas. Põhjasuunas ulatub mõju veekihi välja kiildumisalani 25 km kaugusel. Ida-kirde suunas vähendab kaevanduse mõju Kunda mattunud org, mis kohati toidab veekihti. Kaevealast 10 km kaugusel on survetaseme alandus ligikaudu 30 meetrit, 20 km kaugusel vahemikus 15–20 m. Survetaseme gradient kaeveala vahetus läheduses on ligikaudu 15 m/km, 10 km kaugusel tüüpiliselt 2 m/km.



Joonis 12. VK2 põhjustatava survetaseme muutus O-Ca ja Ls-kn veekihtides.

VK2 põhjustab ulatusliku alanduslehtri ka O₂ls-kn veekihi, kus survetase võib langeda kaeveala kohal 40 m. Ka selles veekihi ulatub mõju enam kui 50 km kaugusele lääne-, lõuna- ja ida sektorites. Põhja ja kirde suunal toitub veekiht oma avamusel või Kunda mattunud orus ning nendes suundades on mõju ulatus väiksem. Veekiht püsib kõikjal surveleena.

Uhaku regionaalsel veepidemel lasuvates veekihtides alanduslehtrit ei moodustu.

Virtuaalsest kaevandusest VK2 väljapumbatava vee hulk on baasmudelil 15 000 m³/d, mis on võrreldavas suurusjärgus VK1a ja VK1b mahtudega eraldi võetuna (Joonis 10). Alanduslehtri moodustumine on kiire, kogu kaeveala kuivendamisel stabiliseeruks väljapumbatava vee hulk suuresti 5 aasta jooksul.

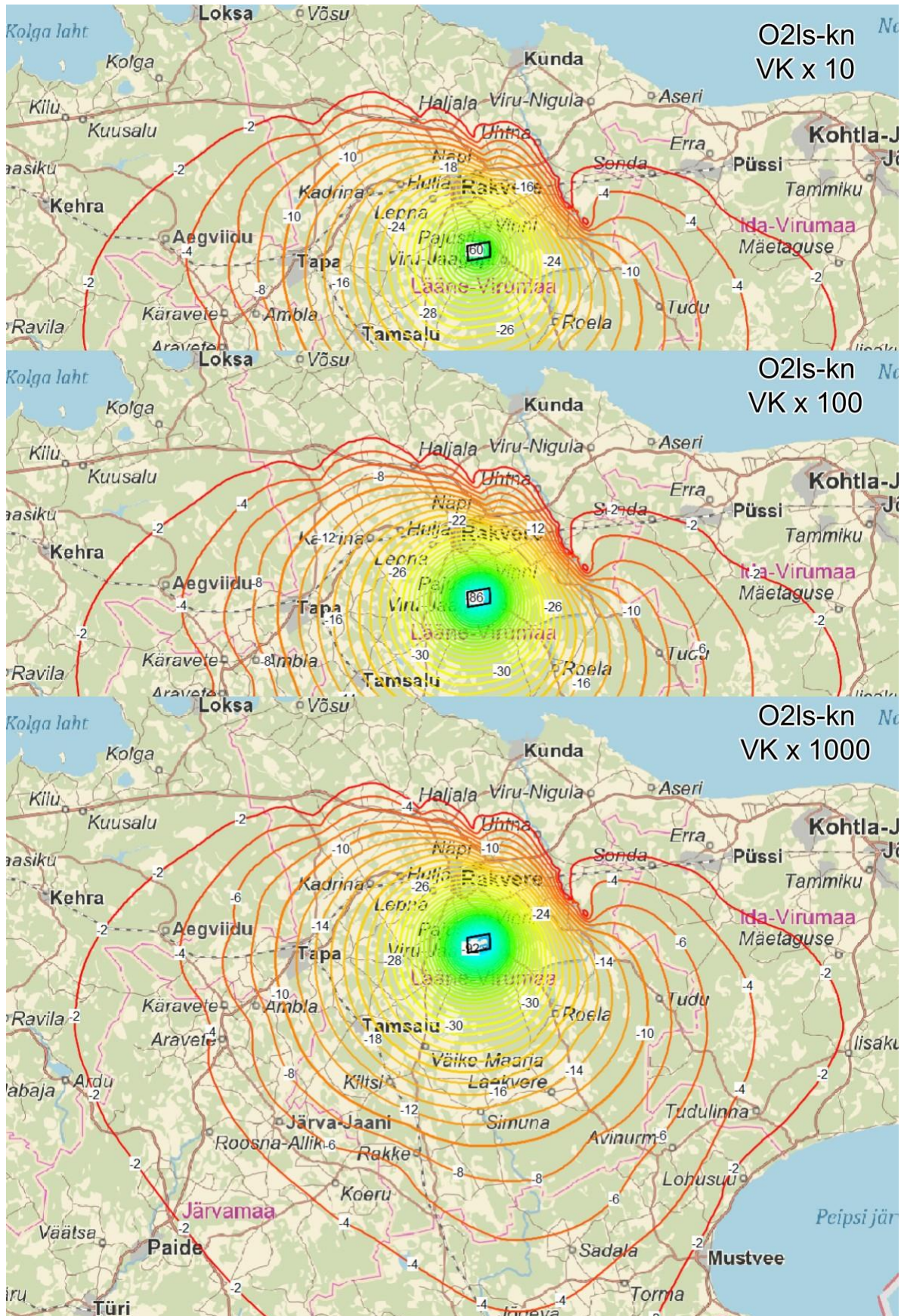
VK2 tundlikkus katvate kihtide vertikaalse veejuhtivuse muutumisele on sarnane VK1-le. Kümnekordne veejuhtivuse kasv suurendab kaevandusse valguva vee hulka 5% ja ei põhjusta olulisi muutusi veetasemetes baasmudeliga võrreldes. Kaevanduse kohal ja 5 km raadiuses langeb survetase O₂ls-kn veekihi (alandus kuni 60 m kaevanduse kohal, Joonis 13).

Vertikaalse veejuhtivuse kasv 100 korda suurendab kaevandusse valguva vee hulka 30% (19 700 m³/d), 1000kordne kasv 230% (50 700 m³/d). Kõige suuremad muutused veetasemetes toimuvad O₂ls-kn veekihi, kus survetaseme langus kaevandamiseelsega võrreldes ulatub vastavalt 86 ja 92 meetrini (survetase -27 ja -32 m ümp, kaevanduse kohal veekiht kaotab surveleisuse).

Kattekihtide vertikaalse veejuhtivuse kasv 100 korda või enam (selline omaduste muutumine kaevandusest ligikaudu 100 m kõrgemal eeldab kaevandamist lae langetamisega) põhjustab lokaalselt veetaseme alandust 4–10 m O₃prk-prg veekihi kaevanduse kohal ja lähiümbruses. Kuigi veetaseme alanemine on lokaalne ja mitte suur, on see märk intensiivse infiltratsiooni võimaluse tekkest. Maapinnalähedase vee valgumine O₃prg-prg veekihi O₂nb-rk veekihti (100× juhtivuse kasv) või kaevanduseni välja (1000×) tähendab oksüdeerivate tingimuste levikut suuremasse sügavusse. Kui sulfaatne vesi jõuab Nabala-Rakvere veekihti, siis kantakse see seal kiiresti kirde suunas (kilomeetreid kaevanduse tegutsemise perioodi jooksul).

Virtuaalse kaevanduse VK2 mõju kinnitatud põhjaveevaruga maardlatele avaldub O-Ca ja O veekihtide veehaaretele. Kõige rohkem mõjutatakse Rakvere veehaareid, kus survetasemed võivad langeda kuni 30...40 meetrit. Kadrina, Tamsalu ja Tapa O-Ca veehaaretes langeb survetase 15–20 m. 2018 seisuga kinnitatud põhjavee varuga maardlates veekihid jäävad surveleiseks.

VK2 puhul on kaevanduse poolt põhjustavate põhjavee mõjude hindamisel suurim määramatus seotud kaevandusest 2–3 km kauguselt ida poolt kulgeva Aseri tektoonilise rikkega. Põlevkivi piirkonnas, kus rikkevööndeid on detailsemalt uuritud, kirjeldatakse Aseri rikkega sarnaseid suuremaid tektoonilisi rikkeid kui kogu settekatet läbivaid fleksuurseid paindeid, mille piires esineb varieeruva laiuse ja purustuste intensiivsusega lõhelisuse vööndeid (Vaher 1983, Puura ja Vaher 1997). Rikkevööndi keskosas on purustatus suurim ning kohati on mõnekümne meetri laisuselt põlevkivi asendunud karstisaviga. Rikkevööndi



Joonis 13. VK2 poolt põhjustatava Lasnamäe-Kunda veekihi survetaseme muutuse sõltuvus katendi vertikaalse veejuhtivuse muutusest.

lõhelisus suurendab vertikaalset veejuhtivust, kuid on ebaselge millisel määral. Vaatlusandmed, mis üheselt näitaksid Pandivere piirkonnas Aseri rikke läheduses sügavamates veekihtides kõrgemaid survetasemeid või ülemiste veekihtide mõju O-Ca põhjavee keemilisele koostisele, ei ole töö autoritele teada. Vaatlusandmete puudumine võib tähendada, et vee liikumine sügavamatesse veekihtidesse on lokaalne ja ei oma mõjuta oluliselt regionaalset vee liikumist. Samas kaevanduse avamine mõjutab väga oluliselt kohalikku veerežiimi ning intensiivistab veevahetust erinevate veekihtide vahel. VK2 põhjavee mudelis ei ole Aseri rikkega arvestatud, kuna ei ole selge rikke ehitus, filtratsiooniomadused rikke piires ja veevahetus rikke kaudu.

4.3. Virtuaalne kaevandus VK3a (Rägavere lääneosa)

Näidisala 3 asub Pandivere kõrgustiku kirdenõlval Rakvere fosforiidimaardla rikkalikumal osal. Näidisala jaotab kaheks Kunda mattunud org, mis kohati ulatub fosforiidi kihindini. Kuna näidisala 3 lääne- ja idaosa on vähemalt pindmises osas erinevalt mõjutatud Pandivere kõrgustiku veerežiimist, testiti kahe virtuaalse kaevanduse – VK3a Rägavere lääneosa ja VK3b Rägavere idaosa – mõju eraldi. Virtuaalne fosforiidikaevandus VK3a on kaevealaga 6,1 km². Fosforiidilasund paikneb 75–100 m sügavusel.

Juhul kui katvate kihtide vertikaalne veejuhtivus ei muutu, siis virtuaalne kaevandus VK3a põhjustab O-Ca veekihi survetaseme alanduse kuni 80 m (kuni tasemeni –24 m ümp, Joonis 14). Alanduslehter on mõõtmetelt võrreldav kaevandusega VK2 ulatudes enam kui 50 km kaugusele edela-kagu sektoris. Põhjakaares levib alandus kuni veekihi avamuseni. Kirde suunal mõjutab lehtri levikut Kunda mattunud org, kus kohati veekiht avaneb orgu täitvate setete all. Alanduslehter O-Ca veekihi on järsk. Kunda oru poolses küljes võib surve gradient kaevanduse läheduses olla vahemikus 20–30 m/km, teistes suundades ligikaudu 15 m/km.

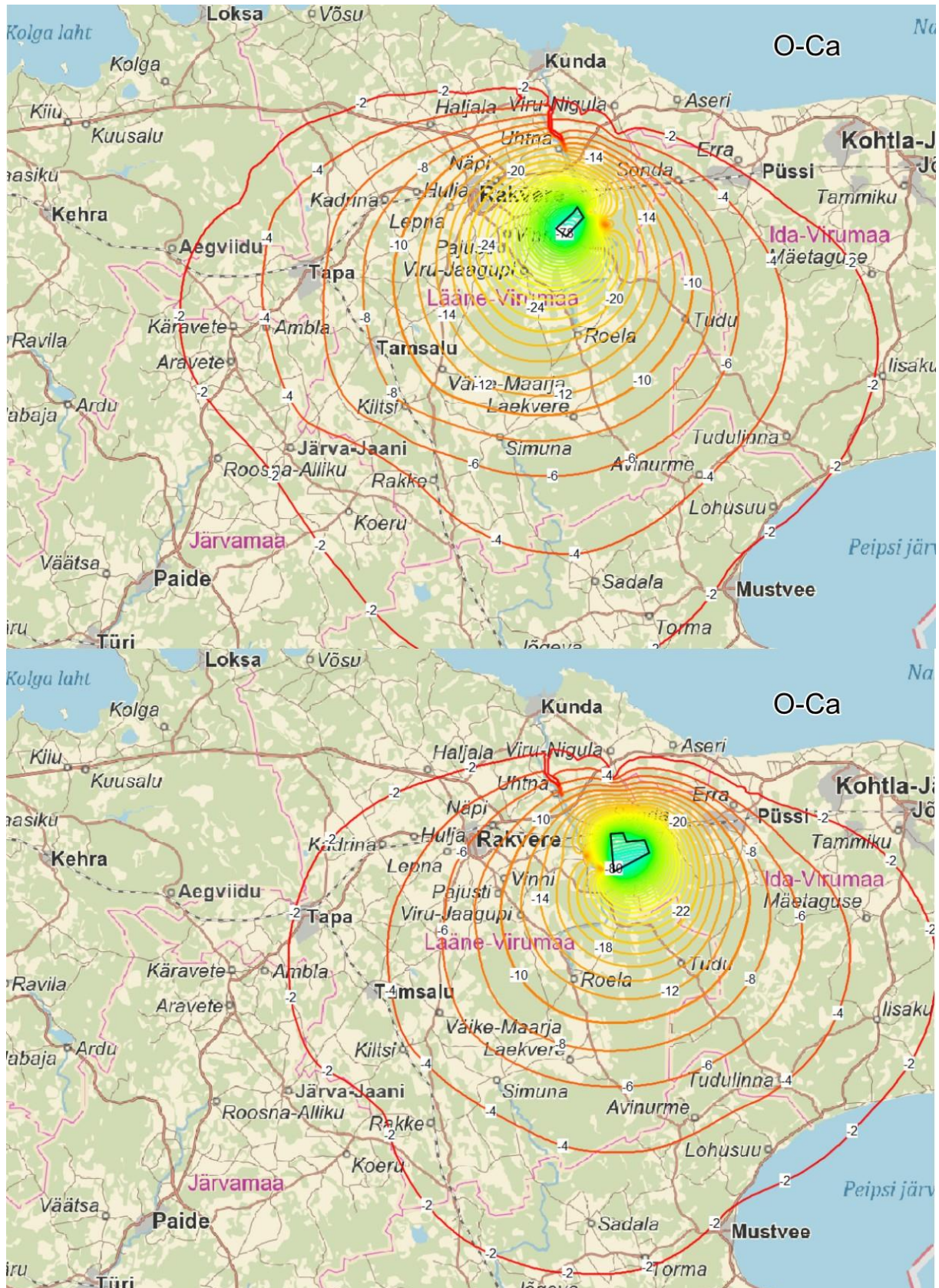
Kaevandusest VK3a tulenev survetaseme muutus O2ls-kn veekihi levib samuti kümnete kilomeetrite kaugusele (Joonis 15). Kunda mattunud org piirab oluliselt alanduslehtri levikut kirde suunas. Survetaseme alandus võib ulatuda 30 meetrini, alanduslehtri kese paikneb kaevealast edelas (Kunda mattunud orust kaugemal).

Uhaku veepideme peal alanduslehtreid ei moodustu, kui veepidemete vertikaalset juhtivust ei muudeta kaevandustegevusega. Kunda mattunud orgu täitvates setetes veetase langeb kuni 12 m.

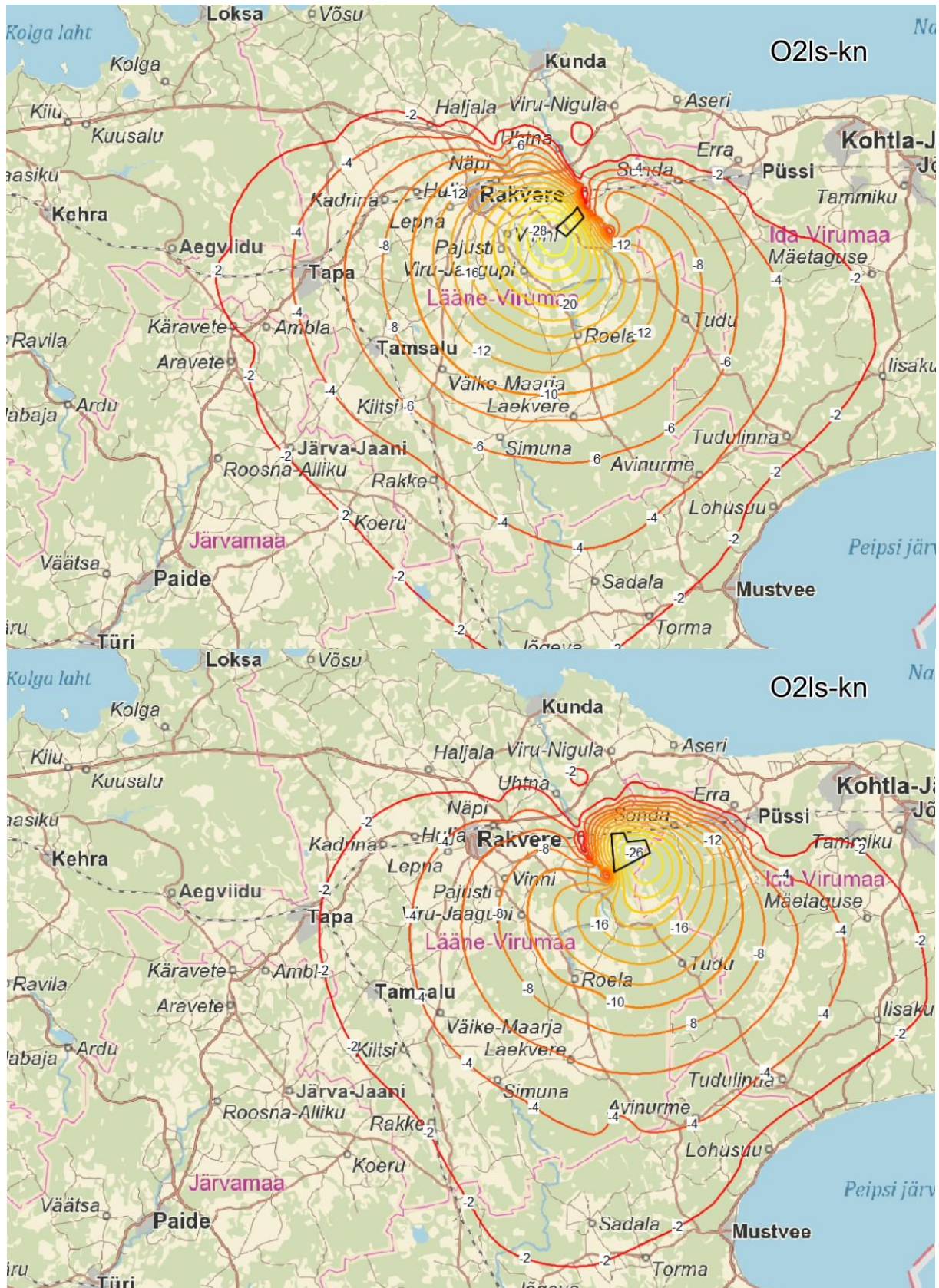
Kaevandusest välja pumbatava vee hulk on ligikaudu 20 000 m³/d (Joonis 10).

Kaevanduse kohal **katendi vertikaalse veejuhtivuse suurenemisel** muutub survetaseme alandus O2ls-kn veekihi suuremaks (Joonis 16). Survetase langeb kaevandamiseellega võrreldes kuni 72 m (vertikaalne juhtivus 1000× suurem). Mõju avaldub kaevanduse kohal ja sellest mõne kilomeetri kaugusel, kuid kaugemal on alanduslehter sarnase levikuga.

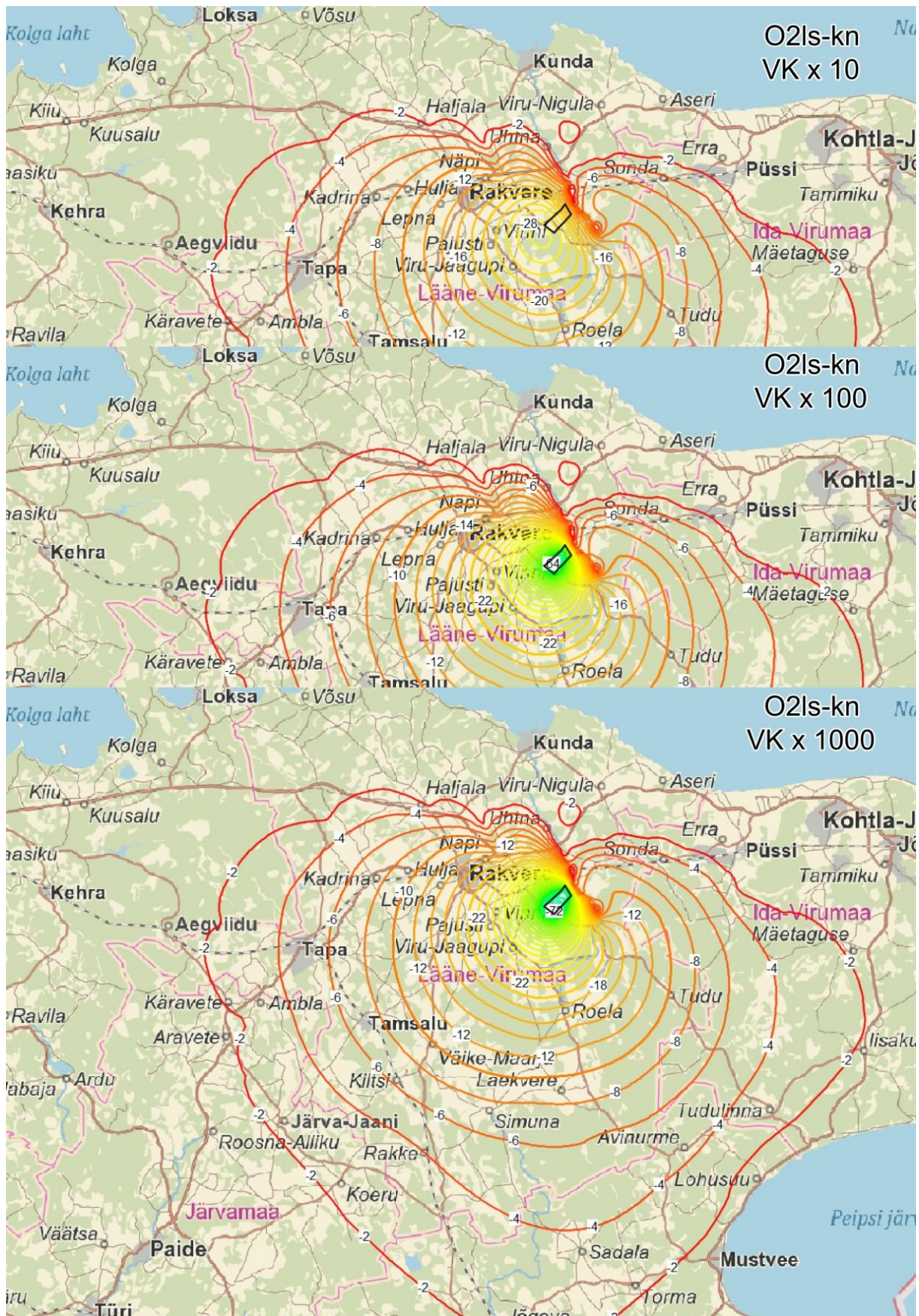
Alanduslehtri teke Keila-Kukruse ja alal osaliselt levivas Nabala-Rakvere veekihi sõltub oluliselt fosforiidi katendi purustatusest. Kui vertikaalne juhtivus kasvab 100 korda, siis alanevad survetasemed kaevanduse kohal 2 kuni 4 meetrit. Kui juhtivuse kasv on 1000 korda, siis langeb survetase kaevandamiseellega võrreldes kuni 16 m ja alanduslehter ulatub mõne



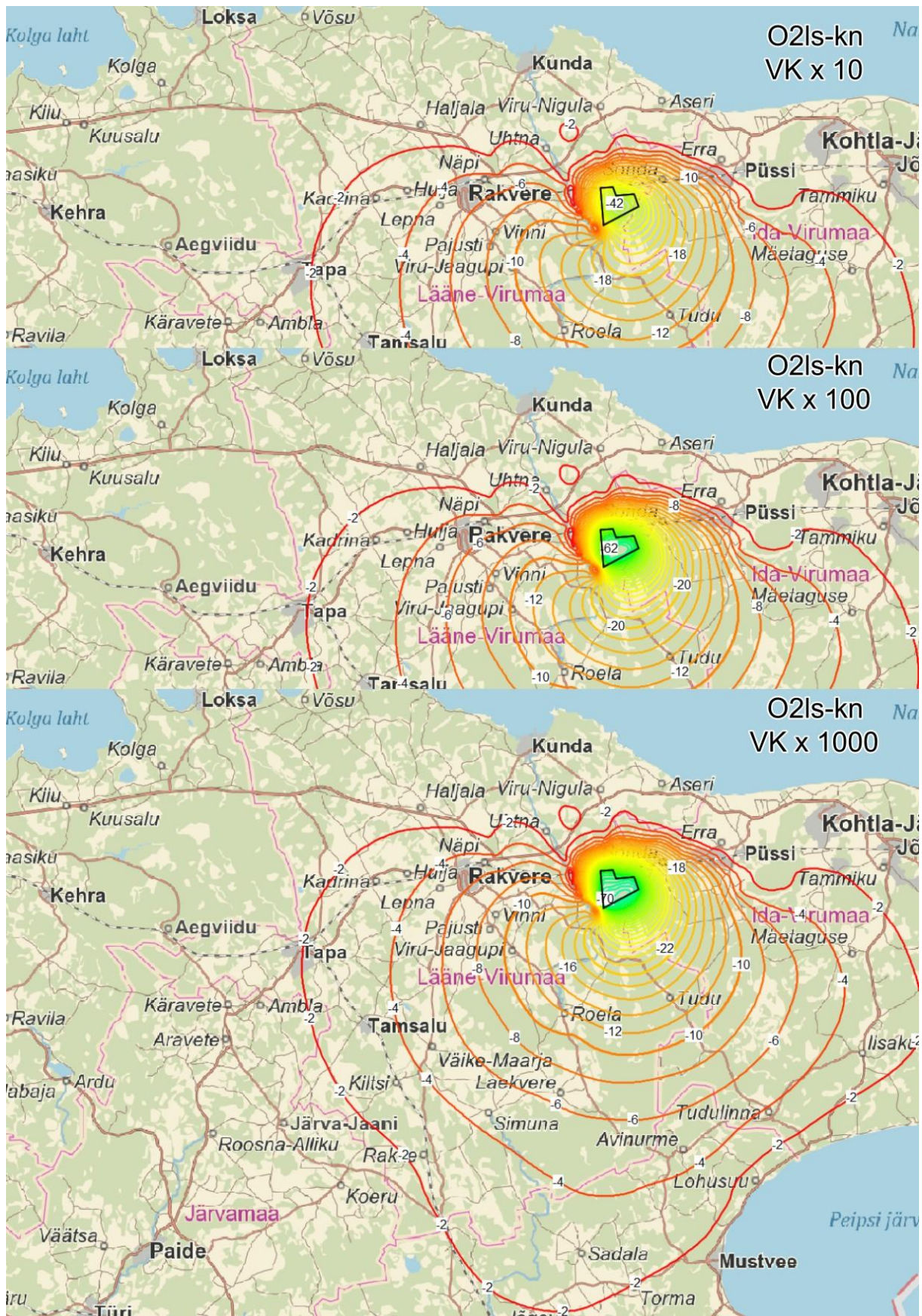
Joonis 14. Kaevanduste VK3a ja VK3b põhjustatav survetaseme muutus O-Ca veekihis.



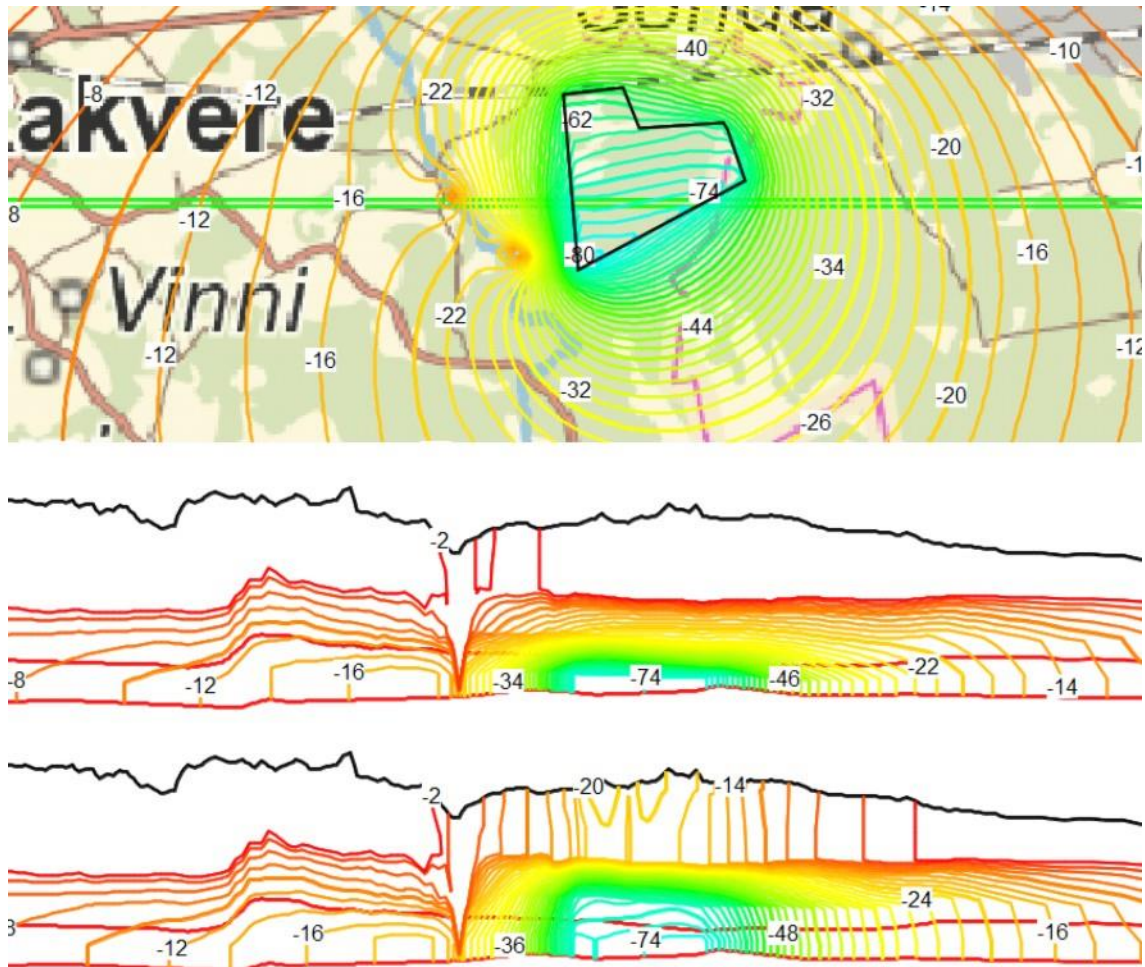
Joonis 15. Kaevanduste VK3a ja VK3b põhjustatav survetaseme muutus Lasnamäe-Kunda veekihis.



Joonis 16. Lasnamäe-Kunda veekihi moodustuva survetaseme alanduse sõltuvus VK3a alal kattekihtide vertikaalse veejuhtivuse muutusest.



Joonis 17. Lasnamäe-Kunda veekihi moodustava survetaseme alanduse sõltuvus VK3b alal kattekihtide vertikaalse veejuhtivuse muutusest.



Joonis 18. Survetaseme muutuse läbilõige plaanil (üleval) oleva joonel, kui kaevanduse katendi moodustavate kihtide veejuhtivus ei muutu (keskel) või kasvab 1000 korda (all).

kilomeetri kaugusele kaevealast. Mõnemeetrine survetaseme alanemine hea veejuhtivusega kivimis tähendab olulist veevahetuse kiiruse kasvu ja tõenäoliselt sulfaatide sisalduse suurenemist põhjavee koostises hapnikurikkama vee infiltratsiooni tulemusena. Sulfaatne vesi liigub peamiselt vertikaalselt kaevandusse, kuid osa muutunud koostisega veest liigub lasuvates veekihtides Kunda jõe poole.

Kaevandusse voolava vee hulk suureneb 20% kui vertikaalne veejuhtivus kasvab 100× ja 100% kui juhtivus kasvab 1000× (vastavalt 23 800 m³/d ja 40 700 m³/d; Joonis 10).

Virtuaalse kaevanduse VK3a mõju kinnitatud põhjaveevaruga maardlatele avaldub O-Ca ja O veekihtide veehaaretele, kuid väiksemal määral kui VK2 puhul. Rakvere veehaaretes langevad survetasemed O-Ca veekihtis 15 kuni 25 meetrit, Kadrina, Tamsalu ja Tapa O-Ca veehaaretes langeb survetase 6–12 m. 2018 seisuga kinnitatud põhjavee varuga maardlates veekihtid jäävad survele.

Virtuaalse kaevanduse VK3a (ja VK3b) põhjavee mõjutamise hindamisel on suurim määramatus Kunda mattunud oru ehitus, lisaks ka Aseri rikke ehitus, mida käsitleti eespool. Puurimisandmetel on mattunud oru pikiprofiil muutlik ning madalamad lõigud vahelduvad

sügavamatega, mis kohati ulatuvad O-Ca veekihini. Nüüdisaegses tõlgenduses moodustuvad sellised orud liustikualustes tingimustes, kus surveelised sulaveed uuristavad nõo, mida liustiku jää modifitseerib. Survelise sulavee tingimustes on oru lainetav põhjareljeef loogiliselt seletatav. Samas VK3 kaevealadest mõne kilomeetri kaugusel paikneb Kunda orus nn. Rahkla langatus (ka Sämi „must auk“; Suuroja jt. 2006), mille piires oru põhja moodustavad ümbritsevate aladega võrreldes kuni 50 m madalamal paiknevad lubjakivid (Puura ja Vaher 1997). Selle struktuuri teket on tõlgendatud ka kui liustikualuste sulavete poolt Kambriumi liivakivide kulutuse tulemusena toimunud vajumist (Suuroja jt. 2006) või liustiku poolt orgu transporditud pangased (glatsiotektoonika; Sarv 2017). Tõenäoliselt on mattunud oru piires teisigi kohti, kus O-Ca veekihti katvad veepidemed on läbilõigatud, kuid mille olemasoluga ei ole käesolevas töös arvestatud. Kunda mattunud oru geoloogiline ehitus vajab täiendavaid uuringuid nii VK1 kui ka VK3 läheduses.

4.4. Virtuaalne kaevandus VK3b (Rägavere idaosa)

Virtuaalne fosforiidikaevandus VK3b on kaevealaga 14,6 km², fosforiidilasund paikneb 60–90 m sügavusel.

Juhul kui kaevandustegevuse käigus katvate kihtide vertikaalne veejuhtivus ei muutu, siis virtuaalne kaevandus VK3b põhjustab O-Ca veekihis 60 kuni 80 meetrise survetaseme alanduse (Joonis 14). Sarnaselt teistele virtuaalsetele fosforiidikaevandustele moodustub alanduslehter kiiresti ja ulatub lääne-, lõuna- ja idakaarde kümnete kilomeetrite kaugusele. Põhja suunas levib alanduslehter veekihi väljakiildumisalale 10 km eemal.

Alanduslehtri kuju ja levikut lääne suunas mõjutab Kunda mattunud org, mis puuraukude andmetel ulatub kohati veekihini. Survetaseme gradient kaeveala läheduses (lähim kilomeeter) on ligikaudu 15 m/km, Kunda oru poolsel küljel vahemikus 20–30 m/km.

Survetaseme alandus O2ls-kn veekihis ulatub kaeveala peal 26 meetrini (Joonis 15). Alanduslehtri kuju mõjutab oluliselt Kunda mattunud org, mis kohati lõikab läbi Uhaku veepideme. Survetaseme alandus 10 meetrit ulatub lõunakaares 15–20 km kaugusele. Veekiht püsib surveeliseks.

Keila-Kukruse veekihis alanduslehtrit ei moodustu. Kunda mattunud orgu täitvates setetes võib veetase langeda nendes kohtades, kus org lõikub läbi Uhaku ja Alam-Ordoviitsiumi veepidemete.

Virtuaalsest kaevandusest VK3b välja pumbatava vee hulk on baasmudelil 20 000 m³/d, mis on sarnane kaevandusega VK3a (Joonis 11).

Juhul kui kaevanduse katendikihtide vertikaalne veejuhtivus suureneb, siis avaldub mõju peamiselt O2ls-kn veekihis, kus kaevanduse kohal survetase langeb kaevandamis-eelsega võrreldes kuni 42, 62 või 70 meetrit (juhtivuse kasv vastavalt 10x, 100x või 1000x; Joonis 17). Alanduslehtri süvenemine on väga lokaalse iseloomuga avaldudes kaeveala kohal ja lähimate kilomeetrite kaugusel.

Keila-Kukruse veekihis langeb survetase kuni 2 m kui Uhaku veepideme vertikaalne juhtivus kasvab 100 korda. See ilmselt suurendab mõnevõrra sulfaatide sisaldust selles veekihis.

Vertikaalse veejuhtivuse 1000-kordne suurenemine tingib kaevanduse VK3b kohal Keila-Kukruse veekihis veetaseme languse kuni 20 meetrit ning alanduslehtri, mis ulatub enam kui 5 km kaugusele kaevanduse perimeetrist.

Kaevandusest VK3b välja pumbatava vee hulk kasvab vertikaalse veejuhtivuse kasvades sarnaselt teistele testkaevandustele – 10kordne kasv suurendab vee hulka 6%, 100 kordne kasv suurendab 34%, 1000 kordne kasv muudab vee hulka kolme kordseks (veehulgad vastavalt 20 700 m³/d, 26 200 m³/d ja 60 000 m³/d) (Joonis 11).

O-Ca veekihi kinnitatud põhjaveevaruga maardlad, mida virtuaalne kaevandus VK3b oluliselt mõjutaks (survetaseme langus üle 10 m), asuvad peamiselt Ida-Virumaal (Aseri vald, Kiviõli, Sonda, Lüganuse vald). Veekiht jääb surveleiseks kõikjal peale kaevandusala.

Lasuvate veekihtide kinnitatud varuga põhjaveemaardlad asuvad Lääne-Virumaal (Rakvere, Tamsalu, Tapa, Kadrina), nendes tekkiv survetaseme langus on vähem kui 10 m.

VK3b kaeveala kohal saab alguse Pada jõgi. Fosforiidi kattekihtide vertikaalse veejuhtivuse suurenedes dreenitakse Keila-Kukruse veekihti ja selle peal lasuvat pinnakatet. Mõju Pada jõele sõltub pinnakatte iseloomust. Kaevandusest välja pumbatava selitatud vee juhtimine Pada ja Kunda jõgedesse suurendab nende jõgede vooluhulkasid.

VK3b põhjavee koguseliste muutuste hindamisel on suurim määramatus seotud Kunda mattunud oru ehitusega.

4.5. Fosforiidi kaevanduste ühisjooned

4.5.1. Alanduslehtrite kujunemine

Alam-Ordoviitsiumi veepideme ja eriti Uhaku veepideme isoleerimisvõime mängivad olulist rolli nii survetaseme alanduslehtri puudumisel pealmistes kihtides kui ka sügavamates veekihtides moodustuva lehtri suures ulatuses. Kui vee voolamine läbi veepidemete on aeglane, siis kasvab alanduslehter seni, kuni katvatest kihtidest üle suure pindala veekihti filtreeruva põhjavee hulk ja kaevandusest välja pumbatav veehulk saavutavad tasakaalu.

Ordoviitsiumi–Kambriumi ja Lasnamäe-Kunda veekihid on lasuvatest veekihtidest isoleeritud süsteemid, kus survetaseme suur alanemine ei tähenda otseselt olulist veehulga vähenemist veekihis. Need veekihid on surveleised ehk kivimi poorid on täielikult vett täis ning vee surve on veekihi pealispinnast kõrgemal. Survet moodustava vee hulk on seotud kivimi ja vee kokkusurutavustega. O-Ca kihiveemahtuvus S on suurusjärgus $5 \cdot 10^{-5}$ (eriveemahtuvus $S_s \sim 2 \cdot 10^{-6}$ 1/m). Selleks, et survetase veekihis langeks 1 meetri võrra, tuleb ruutmeetri kohta võtta vett 0,05 mm paksune kiht (0,05 liitrit), 10 meetrise alanduse jaoks 500 ml/m². See veekogus on mitu suurusjärku väiksem kui on vaja kivimi kuivendamiseks kaevanduses, kuna siis tuleb eemaldada poorides olev vesi (liivakivide puhul 200 liitrit kivimi kuupmeetri kohta eeldades 20 protsendilist poorsust).

Kaevanduse sulgemise järgne survetaseme kiire taastumine kaevandust ümbritseval alal on sarnaselt depressioonilehtri kiire kujunemisega seotud kivimite madala eriveemahtuvusega, mille tulemusena isoleeritud süsteemis on surve muutumiseks vaja väikeseid veekoguseid. Kaevanduse enda täitumine on käesolevas töös hinnatud liiga kiireks, kuna mudelis ei ole kaevandust käsitletud tühimikuna.

4.5.2. Mõju jõgede vooluhulkadele

Modelleerimistulemused näitavad, et veetaseme alanemine maapinnalähedases veekihi sõltub veepidemete purunemise määra, kuid alanemine piirneb peamiselt lokaalselt kaeveala ja selle lähiümbrusega (mõned kilomeetrid). Põhjaveetaseme alanemine võib vähendada mõjualasse jäävate jõgede vooluhulkasid. Samas kaevandusest välja pumbatav vesi, mis tuleb selitatuna juhtida jõevõrku, ületab koguselt oluliselt kaevanduse drenivat mõju jõgedele. Läbimõeldult kaevandusvete loodusesse juhtimise kavandamine lubab ennetada ja vältida jõgede vooluhulkade vähenemist või väiksemate jõgede kuivamist (nt Pada jõgi ülemjooksul VK3b kohal).

Kaevandusest väljapumbatava vee hulk on ärajuhitud kraavivõrgu kaudu. Virtuaalsete kaevanduste baasmudelitest pumbatav hulk $0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ ($20\,000 \text{ m}^3/\text{d}$) moodustab näiteks Kunda jõe pikaajalisest keskmisest vooluhulgast (Sämi seirejaamas $4,36 \text{ m}^3/\text{s}$; Loigu jt 2012) ~5%, 30-päeva-keskmisest miinimum vooluhulgast talvel ($0,99 \text{ m}^3/\text{s}$) 23%.

Kunda jõgi kuulub lõheliste elupaigana kaitstavate jõgede nimekirja (RT I, 21.10.2016, 12) ning seal kehtivad täiendavad vee kvaliteedinõuded, mida tuleks kaevandusvete jõkke juhtimisel hoolikalt jälgida (näiteks heljuvaine sisaldus).

4.5.3. Mõju veehaaretele ja kaevudele

Eespool käsitleti võimalike kaevanduste mõju suurematele kinnitatud veevaruga põhjaveemaardlatele. Põhjaveevarude hindamise ja maardlate kinnitamise kohustus on veehaarete puhul, kust võetakse vett vähemalt $500 \text{ m}^3/\text{d}$. Need on enamasti ühisveevärgi veehaarded, mis võtavad vett sügavamatest veekihtidest. O-Ca ja ls-kn veekihi puhul avaldub suurim mõju kaevandusest 10 km raadiuses. Veekiht säilitab surve (välja arvatud kaeveala) ja enamasti on mõju lahendatav pumba sügavamale laskmisega, mõnel juhul ka pumba vahetamisega.

Kaevealade lähedusse jääb madalaid puurkaeve, mida tõenäoliselt kaevandustegevus mõjutab. Mõju suurus ja ulatus sõltuvad kaevandamise tehnoloogiast (tekitatava lõhelisuse intensiivsus, šahtide ja käikude hüdrauliline isoleeritus jne) ja võib ulatuda mõne kilomeetrini kaevealast. Käesolevas töös tõdetakse, et mõju kohalikele erakaevudele ja külade-alevike ühisveevärgi kaevudele (nt. Vinni, Pajusti, Viru-Jaagupi jt VK2 lähedal) võib olla suurem kui kinnitatud põhjaveevarude maardlate puhul, seisnedes nii veetaseme languses (kuni kaevude kuivaks jäämiseni) kui ka vee koostise muutumises (sulfaadi sisalduse kasv jmt). Kuna käesolevas töös käsitletakse virtuaalseid kaevandusi, mille mõjud sõltuvad tehnoloogilistest valikutest, siis ei hakatud üksikjuhtumeid käsitlema. Seadusest tulenevalt on kaevandajal kohustus tagada veevarustus.

4.5.4. Reostuskande kiirus põhjavee liikumisel kaevandamise ajal ja pärast kaevandamise lõppu

Fosforiidi kaevandamine tänaste tehnoloogiatega eeldab kaevanduse kuivendamist ning O-Ca ja ls-kn veekihtide survetasemete alandamist ümbritseval alal. See tähendab põhjavee voolamist kaevanduse poole. Kui kaevanduse seintes või kaevanduskäikudes tekkib oksüdeerivas keskkonnas suurenenud sulfaadi sisaldusega vett, siis see pumbatakse kaevandusest välja ja reostus ei levi põhjaveekihte mööda laiali.

Virtuaalsed kaevandused VK3a ja VK3b asetsevad Kunda mattunud oru lähistel (kaevandustest 1–2 km kaugusel lõikub org O-Ca veekihini; oru geoloogiline ehitus vajab uuringutega täpsustamist). Tänaasel päeval on survetasemed O-Ca ja ls-kn veekihtides lähedased Kunda jõe tasemega ning võib toimuda nii põhjavee väljavool orgu kui ka veekihi lokaalne toitumine orgu täitvate setete kaudu. Kaevandamise korral alandatakse survetaset veekihi oluliselt ning mattunud orgu täitvate setete kaudu hakkab toimuma ülemiste kihtide vee voolamine O-Ca ja ls-kn veekihtidesse. Mudelid ennustavad, et 30-aastase tegutsemise korral jõuab kaevandustesse pinnavesi läbi 1–2 km kaugusel paikneva mattunud oru setete ja liivakivide (voolamisaja arvutamisel eeldatakse setendite poorsust 10%). Baasmudeli kohaselt jõuab pinnavesi kaevandusse ainult oru-poolsest küljest, kus survegradient võib ületada 30 m/km. Teistest suundadest jõuab kaevandusse O-Ca veekihi põhjavesi 1 kuni 2 km kauguselt.

Ülemiste kihtide vesi ei jõua kaevandusse vertikaalse filtratsiooni tulemusena, kui katvate kihtide vertikaalne veejuhtivus kaevandamistegevuse käigus suureneb kuni 100 korda. See puudutab filtreeruvat vett, põlevkivi kaevanduste kogemusel jõuab vesi kaevandusse ka muid teekondi mööda (šahtid, tehnoloogilised puuraugud, lõheliisuvööndid), mida mudel otseselt ei kirjelda. Kattekihtide vertikaalse juhtivuse muutumisel 1000 korda või enam voolab pindmiste kihtide vesi filtratsiooniliselt kaevandusse.

Vee voolamine Lasnamäe-Kunda veekihi on otseses seoses kivimite vertikaalse veejuhtivuse muutumisega. Kui kaevandatakse tagasitäitmisega ja kaevanduse kattekihid ei purune oluliselt, siis alanduslehtis on survegradient alla 10 m/km ning vooludistsid 30 aasta jooksul on mõnisada meetrit. Mida suuremad on kivimite lõhestatus ja pealmistes kihtides moodustuv survetaseme alandus, seda kiirem on vee voolamine nii horisontaalselt mööda veekihti kui ka vertikaalselt veekihtide vahel.

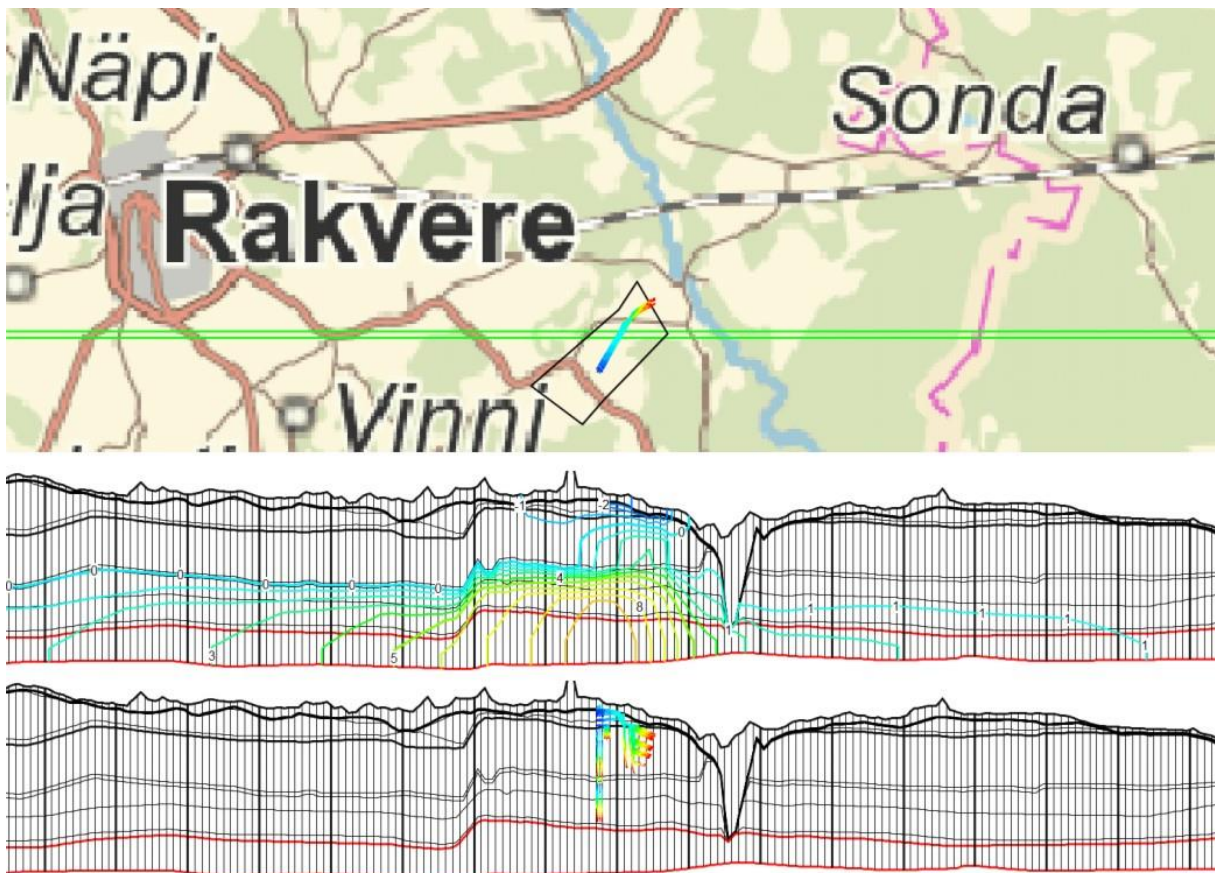
Kui kaevandus VK3a või VK3b suletakse, siis see täitub mõne aasta jooksul põhjaveega. Kui kaevandamise käigus lasuvaid veepidemeid ei rikuta, siis survetasemed taastuvad kaevandamiseelsele lähedastel tasemetel ja vee voolukiirus O-Ca ja ls-kn veekihtides muutub väga aeglaseks (maksimaalselt mõni meeter aastas). Kui kaevandamise käigus veepidemed purunevad ja vertikaalne veejuhtivus kasvab 1000 korda, siis tõuseb lekete tulemusena kaevandusalal survetase O-Ca ja ls-kn veekihtides kuni 10 meetrit kaevanduseelsetega võrreldes. Vee voolamine survetõusu alalt eemale on aeglane (10–20 m aastas), kuna survegradient ei ületa 2 m/km.

Keila-Kukruse ja Nabala-Rakvere (VK3a alal) veekihi on voolukiirus suurem sõltumata kaevanduse olemasolust. See tuleneb kivimite suuremast veejuhtivusest ja suuremast surve

erinevusest oru lähedal. Pinnalähedastes tingimustes võivad vooludistsid varieeruda vahemikus mõnekümnest meetrist mõnesaja meetrini aastas sõltuvalt asukohast. Kui kaevanduse kohal veepidemed rikutakse (vertikaalne veejuhtivus kasvab 1000×), siis suureneb kaevandusalal vee liikumine pinnalähedasest osast mõnikümned meetrit sügavamale, et siis jätkata teekonda oru suunas (Joonis 19). Kui vee intensiivsema filtreerumisega kaasneb sulfaatide sisalduse tõus põhjavees, siis need levivad kaeveala ja Kunda oru vahelisel alal.

Virtuaalsete kaevanduste VK1a ja VK1b lähedal asuvad samuti ürgorud, mis lõikuvad läbi veepidemete fosforiidi kihini. Vee liikumine O-Ca veekihi on analoogiline kaevandustele VK3a ja VK3b Rägaveres. Mattunud oru setete vesi jõuab kaevandusse orupoolsest küljest. Teistest suundadest on vee liikumiskiirus väiksem.

Virtuaalne kaevandus VK2 põhjustab modelleeritud kaevandustest kõige suurema survetaseme alanduse O-Ca veekihi. Vesi, mis jõuab 30-aastase tööperioodi lõpuks kaevandusse, pärineb selles veekihi 1,5–2 km kauguselt. Vesi voolab veekihi radiaalselt kõigist suundadest kaevanduse poole, kuna läheduses ei ole mattunud orge (Aseri tektoonilise rikke hüdrogeoloogiline ehitus vajab selgitamist). Pindmistes veekihtides toimub looduslik põhjavee voolamine põhja-kirde suunas kusjuures vooludistsidid võivad ulatuda 2–3 km-ni.



Joonis 19. Survetaseme muutus kaevanduse sulgumise järel (keskel) ja põhjavee vooluteekonnad 15 aasta jooksul (all). Läbilõike joon on tähistatud rohelisega plaanil (üleväl).

Kui kaevanduse VK2 katendi vertikaalne veejuhtivus suureneb 1000 korda, siis kaevanduse sulgumise järel tõuseb survetase O-Ca veekihi kuni 26 m kõrgemaks kui kaevanduse eelsel ajal. Kaevanduses tekkida võib reostus liigub radiaalselt kaevandusest eemale kiirusega kuni 30 m/a. Lasnamäe-Kunda veekihi on põhjavee liikumiskiirus väiksem (kuni mõni meeter aastas), kuna kivimite veejuhtivus ja survegradient on väiksemad. Kattekihtide purunemise korral moodustub kaevanduse kohal „aken“, kus pindmiste kihtide vesi pääseb Vormsi veepidemest läbi ja jätkab teekonda Nabala-Rakvere veekihi. Kas ja millisel määral kaasneb niigi kiire veevahetuse võondis sulfaadi sisalduse tõus põhjavees ei ole selge.

4.6. Leevendusmeetmed

Modelleerimistulemused näitavad, et fosforiidi allmaakaevandamise mõju põhjaveerežiimile sõltub väga palju kaevandamise tehnoloogiast. Kui rakendatakse meetmeid, mis takistavad lasuvate kihtide dreenimist, siis avaldub kaevanduse mõju O-Ca ja ls-kn veekihtides, vastasel juhul mõjutatakse ka maapinnale lähemates veekihtides põhjavee koguseid ja keemilist koostist.

Kaevandustingimuste analüüs (Kõide 3, Sedman ja Talviste 2018) näitas, et 50 m laiuse laavana fosforiidi kaevandamisel ulatuvad purustused katendi kivimites kümnete meetrite kõrgusele (VK2 ja VK3) või maapinnani välja (VK1). Mitme kõrvuti asetseva laava korral on põhjust eeldada, et laavade servadesse jäetavad tervikud purunevad aja jooksul ning kihtide läbivajumine (ja lõhelisuse teke) leiab aset. **Lasuvate veepidemete rikkumise ennetamiseks on parim võimalus kaevanduse täitmine.** Tagasitäitmise viise kirjeldatakse köites 8.

Kaevanduse tegutsemiseks tuleb rajada kaldkäigud, ventilatsiooni- ja transpordišahtid ja tehnoloogilised puuraugud, mis läbivad kaevanduse kohal paiknevaid põhjaveekihte. Põlevkivi piirkonna praktikas tuleb sageli ette, et veekihte läbistavad rajatised ei ole vettpidavad. **Šahtide ja käikude seinte betoneerimine ja puuraukude manteldamine** kogu pikkuses aitab vähendada lasuvate veekihtide dreenimist, väljapumbatavat veehulka ja kaevanduse sulgemise järel toimuvat veekihtide segunemist.

Põhja-Toolse näidisalal on fosforiit osaliselt sellises sügavuses, kus on võimalik avakaevandamine. Karjäärist väljapumbatav veehulk on allmaakaevandusega võrreldes mitu korda suurem, kuna toimub suur põhjavee sissevool lubjakivi kihtidest. Analoogiline sissevool avaldub samas Pandivere jalami piirkonnas toimivate põlevkivi (Ubja) ja lubjakivi (Aru) karjäärides, eriti kevadise suurvee perioodil. Lubjakividest sissevoolava vee hulka saaks oluliselt vähendada, kui rajada **karjääri serva veetõke** (analoogiks nt. Sirgala II karjääri lääneosas ehitatu).

O-Ca veekihi moodustuva alanduslehtri ulatuse ja kaevandusest välja pumbatava veehulga vähendamise üheks võimaluseks on **põhjavee ringpumpamine**. Rajades kaevanduse ümber kaks puurkaevude ringi, millest kaevandusele lähematest puurkaevudest väljapumbatav põhjavesi juhitakse ilma vahepeal õhutamata kaugemal asetsevate kaevude kaudu samasse veekihti tagasi.

Meetme põhimõttelist toimivust illustreeritakse VK2 ja VK1a näidetel (Joonis 20). Mudelis paigutati VK2 ümber 16 puurkaevu ~1 km kaugusele kaevanduse perimeetrist, iga kaevu toodang 960 m³/d (kogutoodang 15 360 m³/d). Sama veekogus juhiti veekihti teise puurkaevude ringi kaudu, mis paiknevad 5–6 km kaugusel kaevanduse perimeetrist. Kaevude vahelisel alal muutub survegradient ligikaudu 2× suuremaks (50–60 m 4 km kohta) võrrelduna baasmudeliga sellel lõigul.

Sellisel pumpamisel on kaks efekti. Esiteks, kuna välimise kaevuringi asukohas tõstetakse survetaset ligikaudu 15 meetrit, siis on alanduslehter väiksem. Survetaseme tõus avaldub kõige tugevamalt 5–20 km kaugusel kaevandusest, kaugemal on ringpumpamisega alandust kompenseeriv efekt väike, kuna kaevanduse põhjustatav alandus on samuti väike.

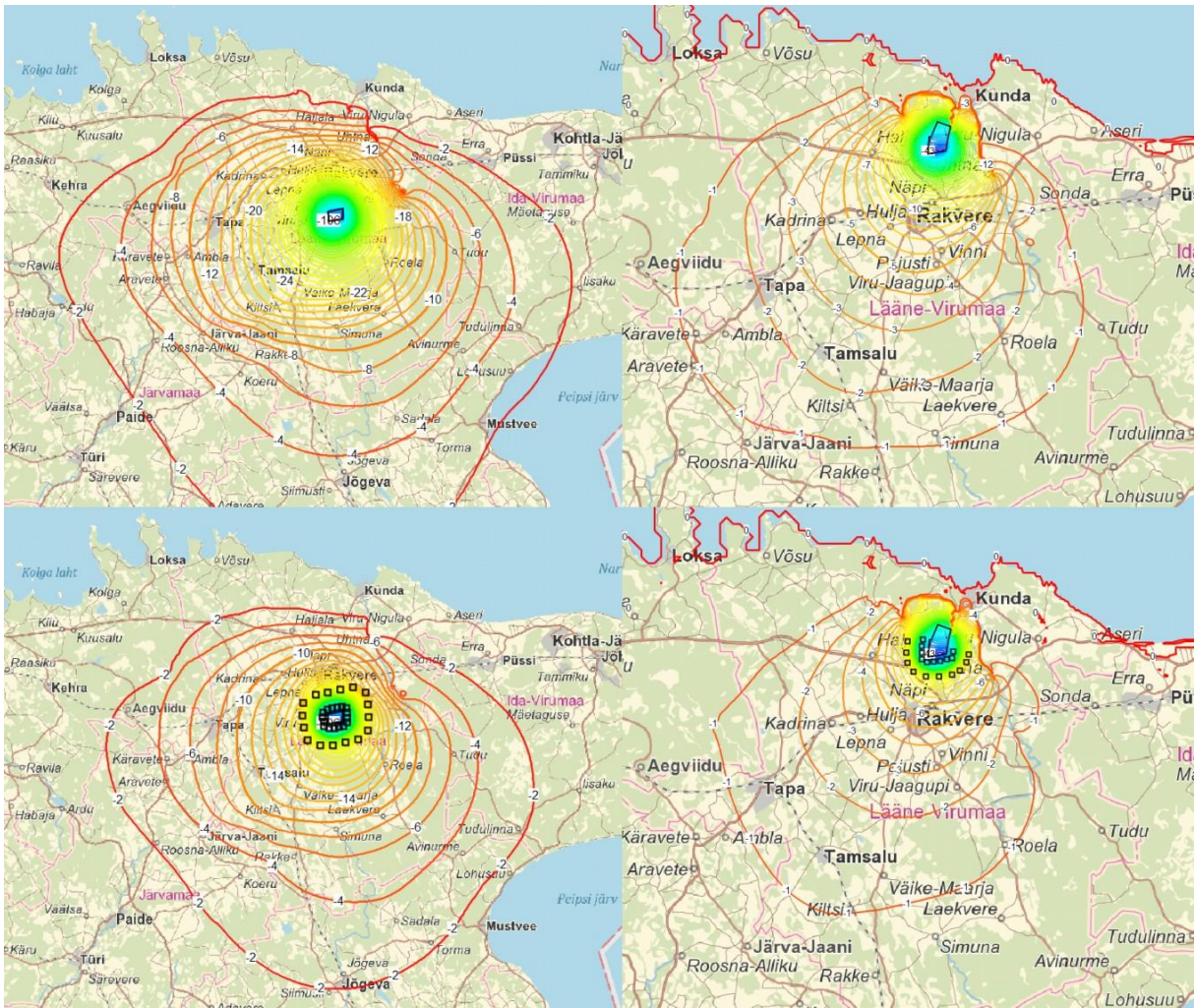
Teiseks, kuna sisemise kaevuringiga alandatakse survetaset vahetult kaevanduse ümber, siis voolab kaevandusse vähem vett. Mudel ennustab, et kui lasuvate kihtide veejuhtivust ei rikuta, siis ringpumpamise tulemusena on kaevandusest väljapumbatava vee maht 36% väiksem (9700 m³/d võrrelduna baasmudeli 15 100 m³/d).

Virtuaalne kaevandus VK1 asub O-Ca veekihi avamusest mõne kilomeetri kaugusel. Kahe puurkaevude ringi paigutamine kaevandusest põhjapoole ei pruugi olla põhjendatud, kuna kaevude omavahelise läheduse tõttu ei saavutata soovitud efekti. Testitud mudelisse (Joonis 20) paigutati 2 x 10 puurkaevu, iga siseringi kaevu toodang 720 m³/d. Põhjavee tagasijuhtimise tulemusena on kaevanduse tekitatav alanduslehter väiksem nii ulatuselt kui ka sügavuselt. Suurim leevendusmõju avaldub Rakvere Arkna ja Virukivi veehaaretele, mis asuvad välisringi kaevude lähistel. Siin on ka võimalus koostööks kaevanduse ja vee-ettevõtte vahel, kuna siseringi kaevudest välja pumbatavat vett saaks kasutada ühisveevärgis.

Arvutused näitavad, et poolringis paiknevate kaevudega on võimalik vähendada kaevandusest väljapumbatava vee hulka vähemalt 20%. Ringpumpamise mahtude suurendamisega saab veelgi vähendada kaevandusest välja pumbatava vee hulka.

Virtuaalsed kaevandused VK3a ja VK3b asuvad Kunda mattunud oru lähedal. Ringpumpamist on seal põhimõtteliselt võimalik rakendada, kuid kaevude paigutamist tuleb detailselt planeerida. Pumbatavatesse puurkaevudesse, mis on orule väga lähedal, võib jõuda pindmiste kihtide vesi, mis kaugemal asuvate kaevude kaudu O-Ca põhjaveekihti juhituduna muudab vee keemilist tasakaalu. Arvutused näitavad, et alanduslehtri ulatust on võimalik vähendada sarnaselt kaevandusega VK2. Ringpumpamine võimaldab vähendada kaevandusest väljapumbatava vee hulka vähemalt 20–30%.

Siin toodu on ringpumpamise kui leevendusmeetme põhimõttelise toimivuse test. Ringpumpamise rakendamine konkreetsetes situatsioonides on optimeerimisülesanne, kus kaevandusest väljapumbatava vee hulk ja alanduslehtri ulatus sõltuvad puurkaevude arvust sisemises ja välimises ringis, kaevudevahelisest kaugusest ringis ja ringide vahelisest kaugusest, iga kaevu toodangust ja summaarsest toodangust. Rakendatavust mõjutab ka kaevude vaheliste veetrasside rajamise võimalused (nt omandi ja lubade saamise küsimused). Välja pumbatavat vett saab põhimõtteliselt kasutada veevarustuse tagamiseks kaevanduse poolt mõjutataval alal.



Joonis 20. Kaevanduse poolt põhjustatava survetaseme muutus O-Ca veekihi (baasmudel, üleval) ja alanduslehtri kuju ringpumpamise korral (all) kaevanduste VK2 (vasakul) ja VK1a (paremal) korral.

Meede eeldab, et pumbatud vesi juhitakse samasse põhjaveekihti tagasi ilma õhuga kokku puutumata, kuna see muudab vee keemilist tasakaalu. Oluline on ka see, et siseringi puurkaevudega ei alandatakse survetaset madalamale kaevanduse tasemest, mille tulemusena võiks hakata kaevanduse poolt sulfaatsed veed väljapoole voolama ja tekkiks risk ringpumpamisega see veelgi kaugemale veekihti juhtida.

5. Virtuaalne põlevkivikaevandus

Põlevkivi kaevandamisega kaasnevate mõjude hindamiseks valiti kolmnurkse kujuga näidisala (ühtlasi ka hüdrogeoloogilise modelleerimise testala) Eesti põlevkivimaardla kaguosas Alutaguse vallas (endiste Iisaku ja Illuka valdade territooriumil). Näidisala kattub osaliselt AS Enefit Kaevandused poolt kavandatava Estonia 2 kaevandusega.

Näidisala on geoloogiliselt ja keskkonnatingimuste poolest mitmekesine (Kõide 2). Suuremal osal, kuid mitte kogu näidisalal levivad Oandu lademe merglid või Narva lademe dolomiitmerglid, mis moodustavad suhtelised veepidemed Keila-Kukruse veekihi peal. Näidisalast loode-pool kulgeb Viivikonna tektooniline rikkevöönd, kus kivimid on lõhelised. Pinnakatte paksus ja tüüp varieeruvad. Valdavalt esineb moreen, jääjärvelised setted, tuulesetted ja turvas. Näidisalast loode-pool, osaliselt Viivikonna rikkega kattudes, levivad jääjõelised kruusad-liivad, mis moodustavad Iisaku-Illuka oosistiku. Näidisalale ja selle lähedusse jäävad mitmed kaitsealused alad nagu näiteks Puhatu ja Agusalu looduskaitsealad.

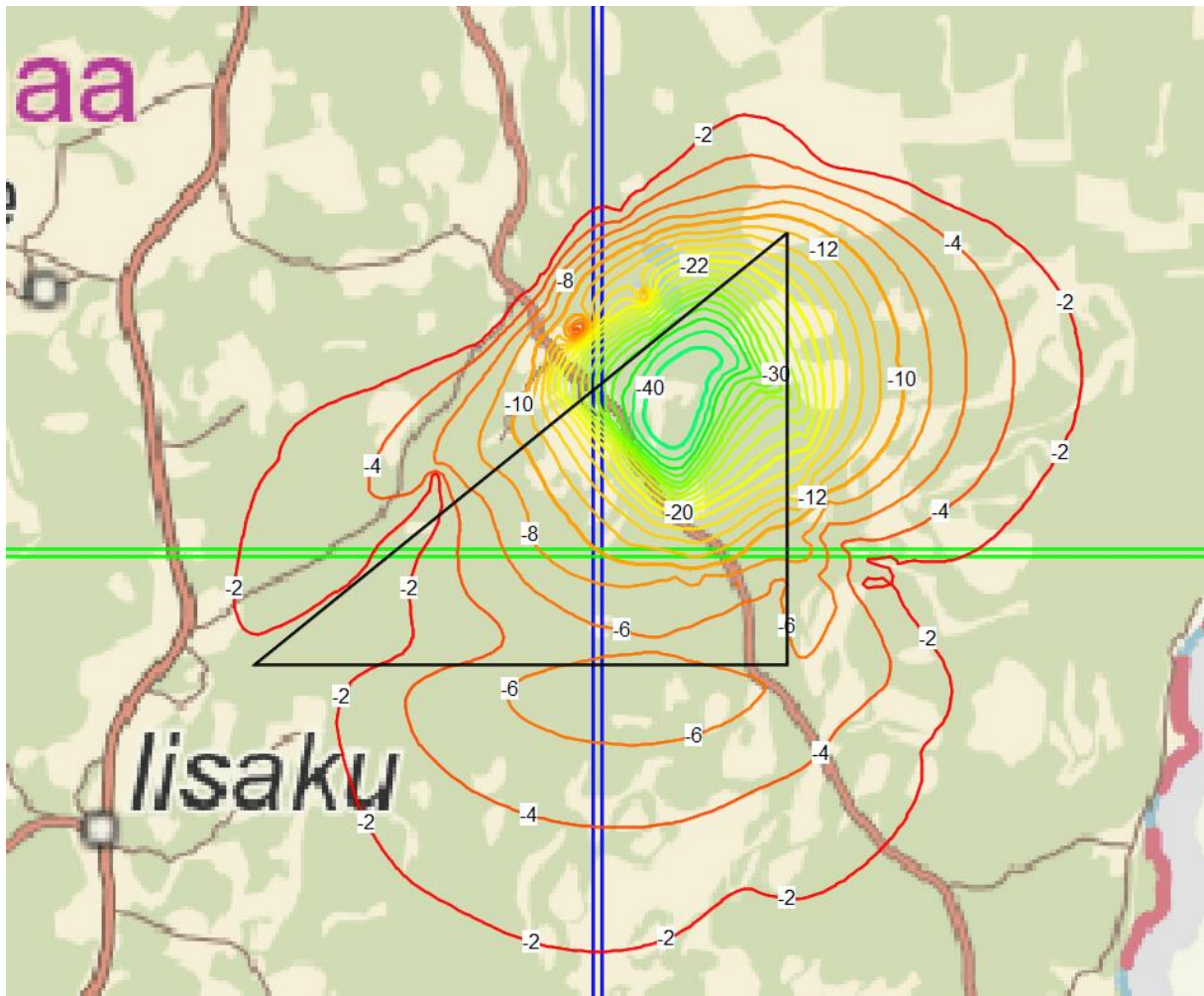
Virtuaalse põlevkivikaevanduse hüdrogeoloogilise modelleerimise eesmärk oli hinnata kaevandusega kaasnevat mõju põhjaveežiimile, analüüsida mõju ja määramatust põhjustavaid tegureid ja mõjude leevendamise võimalusi.

Virtuaalset põlevkivikaevandust modelleeriti analoogiliselt teistele Virumaade põhjaveemudelile olevatele põlevkivikaevandustele. Kaevealal kasutati dreeni rajatingimust põlevkivi veekihi lamami kõrgusel, mis lülitati sisse 30ks aastaks alates aastast 2016. Kaeveala kohal rakendati ümbritsevate aladega võrreldes suuremat netoinfiltratsiooni (0,0008 m/d, ~300 mm/a). Kaeveala ümber 30 × 40 km suurusel alal oli võrgusamm 200 m, kaugemal kasvas 1000 m-ni.

Modelleerimistulemused näitavad, et survetase maapinnalähedases veekihis langeb kaevanduse alal erineval määral. Kaevanduse kohal Keila-Kukruse veekihis võib survetaseme alandus olla vahemikus 40–50 m (Joonis 21). Veekihi avamusel vastabki see pindmise põhjaveetaseme langusele. Seal, kus levivad Oandu suhteline veepide või Narva lade, on maapinnalähedase põhjaveekihi veetaseme alanemine oluliselt väiksem olles vahemikus mõnest meetrist 10–15 meetrini. Alandus levib kaevandusest 5–10 km kaugusele.

Nabala-Rakvere veekihi avamusel on survetaseme langus väiksem kahel põhjusel. Esiteks eraldab veekihti kaevanduse poolt otseselt mõjutatavast Keila-Kukruse veekihist Oandu suhteline veepide (avamuse lähedal suhteliselt õhuke ja lõheline). Teiseks on Nabala-Rakvere veekihi horisontaalne veejuhtivus väga hea koondades vett ka kaevandusega külgnevatelt aladelt.

Modelleerimistulemused esindavad virtuaalse kaevanduse sulgemiseelset ehk maksimaalset mõju veerežiimile. Põlevkivi kaevandus on pindalalt oluliselt suurem kui eelpool käsitletud virtuaalsed fosforiidi kaevandused. Põlevkivi kaevanduse töö kestab tavaliselt aastakümneid ja mõju ulatus kasvab järk-järgult koos kaevanduse laienemisega. Vaatlused olemasolevate



Joonis 21. Survetaseme muutus maapinnalähedases veekihis.

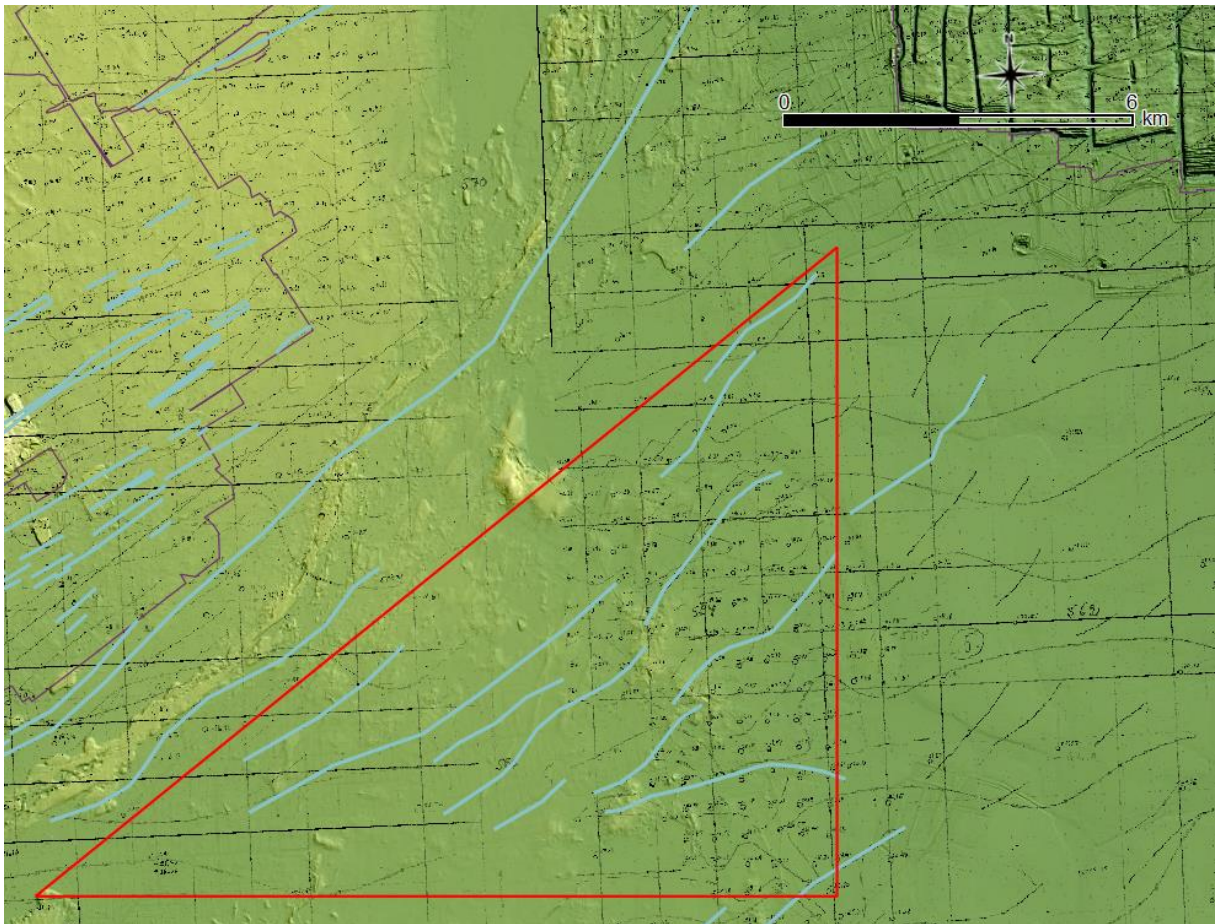
kaevanduste ümbruses viitavad sellele, et veetaseme alanemine toimub enamasti kiirelt (kuude-aastatega) pärast kaevanduse laiendamist vastavas suunas ning kaevanduse peatudes pidurdub ka alanduslehtri laiendumine.

Kaevanduse lähedusse jääb mitmeid kaitsealuseid objekte, mille puhul meetritesse ulatuv veetaseme alanemine pindmises põhjaveekihis võib neid oluliselt mõjutada. Mõjude täpsem hindamine eeldab detailset lähenemist igale objektile eraldi. Mõju märgaladele sõltub paljuski vettapidavate aluspinnaste esinemisest või hästi lagunened ja madala veejuhtivusega turbapinnaste olemasolust. Üks keerulistest objektidest on Jõuga oosistik, kus reljeefi lohkudes on kaitsealused järved. Oosid, mis koosnevad hea veejuhtivusega liivpinnastest, tekkisid liustikujõe poolt, mis eelnevalt kulutas piki Viivikonna riket orundi. Kas orund lõikab läbi Oandu veepideme, kui lõhelised ja rikitud on veepide ja Keila-Kukruse veekihi kivimid tektoonilise rikkevööndi piires ja milline on rikkevööndi siseehitus (kas levib karstisavi), need on küsimused, mis määravad ära mõju järvedele.

Tektooniliste rikete piirkondlikku mõju veevahetusele simuleeriti mudeliga, kus rikete kaardiobjektidega lõikuvates rakkudes korrutati kivimite vertikaalne veejuhtivus 3ga ja horisontaalne veejuhtivus 0,3ga. Esimene arvestab vertikaalse lõhelisusega, mis parandab

veekihtide vahelist ühendust. Teine jälgendab suuremate rikkevööndite keskosas asetsevat karstisavi, mis piirab lateraalset vee voolamist. Modelleerimise tulemused näitavad, et rikete lisamine mudelisse eeltoodud parameetritega suurendab kaevandusse sissevoolava vee hulka ligikaudu 5%.

Rikete mõju modelleerimine on katsetus, mis tõenäoliselt ei esindada tegelikku olukorda, kuna määramatused on suured. Rikete levik esinemine tugineb põlevkivi kaardistamise perioodil tehtud elektromeetrilise profileerimise tulemustel. Geofüüsikaliste tööde käigus eraldati välja rohkelt anomaaliaid, millest mudelisse sisestati ainult osad, mis olid pikema levikuga (Joonis 22). Seda põhjusel, et maapealsetel töödel tuvastatud anomaaliad on allmaakaevandustes ja karjäärides kinnitust leidnud ainult osaliselt. Samas mudelis käsitletakse rikkeid ühe raku laiustena (200 m) sõltumata rikete tegelikust laiusest. Geofüüsikaliste anomaaliade ja tegelikult eksisteerivate lõhelisusvööndite vastavuse ja lõhelisusvööndite laiuse analüüs karjääride ja kaevanduste mäetööde plaanide alusel on oluline uuring, kuid mida käesoleva töö ajalise piiratuse tõttu ei olnud võimalik teha.



Joonis 22. Elektromeetrilise profileerimisel välja eraldatud anomaaliad (sinised jooned), mida on tõlgendatud lõhelisusvöönditena. Rikete kaardi on koostanud Rein Vaher.

Üks määramatuse tegureid on kivimite veejuhtivuse korrektne hindamine lõhelistes karbonaatkivimites (ja pinnakattes). Lõhede kaudu toimub vee liikumine kivimis üldjuhul paremini kui pooride kaudu. Pumpamiskatse tulemused lubjakive avavates puurkaevudes

varieeruvad suurtes vahemikes sõltudes otseselt, kui palju lõhesid puurkaev avab. Üksiku pumpamiskatse kasutatavus veekihi iseloomustamisel sõltub omakorda sellest, kas lõhede arv puurkaevus on esinduslik suuremate kivimkehade jaoks. Katsete arvu suurendamine ja tulemuste keskmistamine on tavapärane lahendus sellises olukorras. Siiski jääb küsimus, mil määral on juba keskmised tulemused mõjutatud sellest, et osad puurkaevud paiknevad rikkevööndite läheduses. Modelleerimine hüdraulilise stressi tingimustes (suuremate tarbijate, ka kaevanduste, mõjualas) iseloomustab sageli paremini veekihtide omadusi laiemalt, aga ainult juhul, kui ümbruskonnas on võtta piisavalt palju vaatlusandmeid.

Modelleeritud virtuaalses põlevkivikaevanduses määrab ala geoloogiline ehitus ära kaevandusse sisseimbuva vee pindalalise jaotuse. Keila-Kukruse veekihi avamusel saavad sademed suuremas koguses pinnasesse imbuda jõudes põhjaveega segunedes kaevandusse. Põlevkivi kaevandused on pindalalt suured ja kaevanduse kogu ulatuses kuivana hoidmine tähendab suurte veemahtude väljapumpamist ja nende pealt vee erikasutustasu maksmist. Kaevanduse osade kaupa sulgemine võimaldab oluliselt vähendada välja pumbatava vee hulka ja **leevendada keskkonnamõjusid**. Mudelis jaotati kaeveala plokkideks ja lõpetati osades plokkides drenimine. Testalal tuleb üle 50% sissevoolavast veest kaeveala kirdeosast (40% pindalast). Kaevanduse ühe osa sulgemisel suureneb mõnevõrra põhjavee sissevool suletud osa läheduses, aga summaarne mõju on suur.

Kaevandatud plokkide sulgemine ja vee väljapumpamise lõpetamine eeldab selle tegevuse ettenägemist juba kaevanduse rajamisel. Ennekõike tuleb planeerida tervikud (näiteks kambriploki seinad) selliselt, et need peaksid vastu vee survele ja vee äravoolusüsteemid nii, et need on suletavad. Väiksemate plokkide kaupa isoleerimine vähendab läbimurdiva veega seotud riske. Positiivsed kogemused on olemas Estonia kaevanduses, kuhu on rajatud settebassein kaevandusvee heljumi vähendamiseks enne vee juhtimist loodusesse maa peal.

Modelleerimine näitab, et sissevoolava vee hulga vähendamisel saavutatakse suurem efekt, kui suletakse kaevealast rohkem eraldatud osi (näiteks testala edelanurk), kuhu vesi voolab mitmest küljest.

Kaevanduse jaotamine väiksemateks teineteisest hüdrauliliselt eraldatud osadeks on oluline ka keskkonnamõjude vähendamise seisukohalt nii kaevandamise ajal kui ka pärast kaevanduse sulgemist. Isoleeritud osad võimaldavad põhjavee tasemel kerkida erinevale tasemele. Olemasolevate kaevanduste probleemiks on see, et kaevanduskäikude veega täitumisel tekib maa-alla veekogu, mille toitumine ühes otsas avaldub ka teise otsa survetasemes, mis viib kaevanduse kohal asuvate madalamate piirkondade liigvee probleemideni. Praktikas on see lahendatud kaevandustesse ülevoolu puurkaevude rajamisega. Selliselt reguleeritud veetase on sageli suurel osal kaevandusest madalam kui eelnev looduslik veetase. Tulemuseks on kiirem sademete infiltratsioon ja oksüdatiivsete tingimuste esinemine aluspõhja kivimites, kus endiselt esineb hajusalt püriiti. See tähendab sulfaatse põhjavee pikemat esinemist. Mida lähemale kaevanduseelsele veetasemel on võimalik reguleerida veetase suletud kaevanduses, seda kiiremini muutub põhjavesi normaalseks.

Mudel arvutab filtratsioonilist komponenti. Estonia kaevandus, mis on paljuski VK4-le sarnastes geoloogilistes tingimustes, näitab, et kaevandusse jõudval veel peab olema mitmeid

teid. Filtratsiooniga, nagu põhjavee mudel seda hindab, ei ole võimalik seletada, et maapealne kevadine suurvesi avaldub 7–10 päevase hilinemisega kaevandusest väljapumbatavas veehulgas.

Kasutatud ja viidatud kirjandus

- IAEA/WMO, (2018). WISER – Water Isotope System for data analysis, visualization and Electronic Retrieval (2018, April 29). Retrieved from <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>.
- Karro E., Marandi A. and Vaikmäe R., 2004. The origin of increased salinity in the Cambrian-Vendian aquifer system on the Kopli Peninsula, northern Estonia. *Hydrogeology Journal*, 12, 424–435.
- Loigu E, Reihan A. ja Reinsalu K., 2012. Sanitaarvooluhulkade arvutamine ja paisutustaseme mõõtmine. Aruanne, TTÜ Keskkonnatehnika instituut, 52 lk.
- Punning J.M., Toots M. and Vaikmäe R., 1987. Oxygen-18 in Estonian natural waters. *Isotopenpraxis*, 23, 232–234.
- Puura, V. ja Vahter, R., 1997. Cover structure. In: Raukas, A., Teedumäe, A. (eds). 1997. *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn. 167–177.
- Pärn J., 2018. Origin and Geochemical Evolution of Palaeogroundwater in the Northern Part of the Baltic Artesian Basin. PhD dissertation, TTÜ.
- Pärn J., Raidla V., Vaikmäe R., Martma T., Ivask J., Mokrik R. and Erg K., 2016. The recharge of glacial meltwater and its influence on the geochemical evolution of groundwater in the Ordovician-Cambrian aquifer system, northern part of the Baltic Artesian Basin. *Applied Geochemistry*, 72, 125–135.
- Pärn J., Affolter S., Ivask J., Johnson S., Kirsimäe K., Leuenberger M., Martma T., Raidla V., Schloemer S., Sepp H., Vaikmäe R. and Walraevens K., 2018. Redox zonation and organic matter oxidation in palaeogroundwater of glacial origin from the Baltic Artesian Basin. *Chemical Geology*, 488, 149–161.
- Raidla V., Kirsimäe K., Vaikmäe R., Jöeleht A., Karro E., Marandi A. and Savitskaja L., 2009. Geochemical evolution of groundwater in the Cambrian-Vendian aquifer system of the Baltic Basin. *Chemical Geology*, 258, 219–231.
- Raidla V., Kirsimäe K., Vaikmäe R., Kaup E. and Martma T., 2012. Carbon isotope systematics of the Cambrian – Vendian aquifer system in the northern Baltic Basin: Implications to the age and evolution of groundwater. *Applied Geochemistry*, 27, 2042–2052.
- Raidla V., Kirsimäe K., Ivask J., Kaup E., Knöller K., Marandi A., Martma T. and Vaikmäe R., 2014. Sulphur isotope composition of dissolved sulphate in the Cambrian-Vendian

- aquifer system in the northern part of the Baltic Artesian Basin. *Chemical Geology*, 383, 147–154.
- Raidla V., Kern Z., Pärn J., Babre A., Erg K., Ivask J., Kalvans A., Kohán B., Lelgus M., Martma T., Mokrik R., Popovs K. and Vaikmäe R., 2016. A $\delta^{18}\text{O}$ isoscape for the shallow groundwater in the Baltic Artesian Basin. *Journal of Hydrology*, 542, 254–267.
- Raudsep R., Liivrand H., Belkin V., Mardiste A., Rass V., Meriküll V., Madalik J., Pajupuu A., Maltseva I., Semjonova N., Kelder N. & Kuptsov A., 1989. Detailed Research Results from Rakvere Phosphorite Deposit in Kabala Area. Tallinn: Estonian Geology (in Russian).
- Sarv K., 2017. Rahkla langatuse ning selle lähiümbruse geofüüsikalised uuringud georadari ning seismiliste meetoditega. Tartu Ülikool. Magistritöö, 53 lk.
- Savitski L., Viigand A., Belkina V. & Jashtshuk S., 1993. Hydrogeological investigations of the Tallinn area and safe yield calculations of Tallinn water intakes. Tallinn: Geological Survey of Estonia (in Estonian).
- Savitskaja L. & Viigand A., 1994. Report on microcomponent and isotopic composition of groundwater in the Cambrian-Vendian aquifer system for estimating drinking water quality in North Estonia. Tallinn: Geological Survey of Estonia. (in Estonian)
- Savitskaja L., Viigand A. & Jashtshuk S., 1995. Report on microcomponent and isotopic composition of groundwater in the Ordovician-Cambrian aquifer system for estimating drinking water quality in North Estonia. Tallinn: Geological Survey of Estonia. (in Estonian)
- Savitskaja L., Viigand A. & Jashtshuk S., 1996a. Report on water quality in the Middle-Devonian-Silurian aquifer system. Tallinn: Geological Survey of Estonia. (in Estonian)
- Savitskaja L., Viigand A. & Jashtshuk S., 1996b. Report on water quality in the Middle-Devonian aquifer system. Tallinn: Geological Survey of Estonia. (in Estonian)
- Savitskaja L., Viigand A. & Jashtshuk S., 1997. Report on microcomponent and radionuclide composition of groundwater in the Silurian-Ordovician aquifer system. Tallinn: Geological Survey of Estonia. (in Estonian)
- Savitskaja L., Viigand A. & Jashtshuk S., 1998. Report on microcomponent and radionuclide composition of groundwater in the Silurian-Ordovician aquifer system. VI phase. Tallinn: Geological Survey of Estonia. (in Estonian)
- Suuroja K., Ploom K., Mardim T., All T., Otsmaa M. ja Veski A., 2006. Eesti geoloogilise baaskaardi Rakvere (6434) leht. Seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus. Kaardistamise osakond, Tallinn, 111 lk.

- Suursoo S., Hill L., Raidla V., Kiisk M., Jantsikene A., Nilb N., Czuppon G., Putk K., Munter R., Koch R. and Isakar K., 2017. Temporal changes in radiological and chemical composition of Cm-V groundwater in conditions of intensive water consumption. *Science of The Total Environment*, 601-602, 679–690.
- Vaher, R. 1983. Kirde-Eesti fosforiidi–põlevkivi basseini tektoonika. Kand. dissertatsiooni autoreferaat (vene keeles). 22lk.
- Vaikmäe R., Vallner L., Loosli H.H., Blaser P.C. and Juillard-Tardent M., 2001. Palaeogroundwater of glacial origin in the Cambrian-Vendian aquifer of northern Estonia. In: Edmunds W.M. and Milne C.J. (eds.), *Palaeowaters of Coastal Europe: Evolution of Groundwater since the late Pleistocene*. London: Geological Society, Special Publications, 189, 17-27.
- Vallner L., 1997. Groundwater flow. In Raukas, A. & Teedumäe, A. (Eds), *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Tallinn: Estonian Academy Publishers, 137-152.