

Tartu Ülikool

Loodus- ja tehnoloogiateaduskond

Ökoloogia ja Maateaduste Instituut

Geograafia osakond

Andreas Porman

Eesti arteesiabasseini pinnakatte kujundi arvutimudel

Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias

Juhendaja: dr. Leo Vallner

Phd Raivo Aunap

prof. Rein Vaikmäe

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhendaja:

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Teoreetiline taust	6
1.1. Käsitletavad alad.....	6
1.2. Aluspõhja reljeef ja pinnakate	8
1.3. Eelnevad uurimused	10
1.4. Põhjavee kihid ja geofiltratsioon	11
1.5. Eesti arteesiabasseini hüdrogeoloogiline arvutimudel	13
2. Materjalid	16
2.1. Vajalikud andmed ja nende kättesaadavus	16
2.2. Andmekogud	16
2.3. Kasutatud andmestiku spetsiifika	18
2.3.1. Maapind ja merepõhi	18
2.3.2 Aluspõhja pealispind.....	19
3. Metoodika ja tulemused	20
3.1. Mudeldamise andmebaas.....	20
3.2. Pinnakatte kujundi digitaalmudel	21
3.3. Mudeldatud lasuvuselemendid	23
3.3.1. Pinnakatte ülemine ja alumine pind.....	23
3.3.2. Pinnakatte paksus ja maht.....	25
3.4. Eesti hüdrogeoloogilise mudeli täiustamine.....	28
3.4.1. Pinnakatte kujundi import ja mudeli kalibreerimine	28
3.4.2. Põhjavee äravoolu mudel ja detailne veebilanss.....	29
4. Arutelu ja järeldused	34
Kokkuvõte	36
Digital model of the shape of the Quaternary cover of the Estonian Artesian Basin	38

Tänuavaldused	39
Kasutatud kirjandus	40
Interneti allikad	43
Lisad	46
Lisa 1. Pinnakatte paksuse kaartide võrdlus töö autori (a) ja K. Kajaku (b) vahel.	47
Lisa 2. Pinnakatte mahtude rajoonid mudelis.....	48
Lisa 3. Põhjaveerõhkude kalibreerimisgraafik.	49

Sissejuhatus

Käesolev magistritöö toetab professor R. Vaikmäe juhendatavat ulatuslikku hüdrokeoloogilist ja paleokliimatilist uurimust, mis käivitati Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituudis 2014. aastal Eesti Teadusagentuuri rahastuse IUT 19-22 alusel. Selle teema on „Geofiltratsiooni kujunemine, globaalne paleokliimatiline andmestik ja inimõju Balti arteesiabasseinis: numbriliste mudelite ja hüdrokeokeemilise teabe süntees“. Nimetatu moodustab ühe osa rahvusvahelisest uurimisprogrammist „Põhjavesi ja globaalse paleokliima andmed“, mida arendatakse UNESCO IGCP^a projekti nr. 618 ja INQUA TERPRO^b komisjoni kaasabil (G@GPS). Üleilmseks uurimiseks on valitud kontinentide representatiivsed arteesiabasseinid, kus Euroopat esindab Balti arteesiabassein (joonis 1).

Eesti arteesiabassein (EAB) kuulub suhteliselt iseseiva põhjavee bilansiüksusena Balti arteesiabasseini (BAB) koosseisu. EAB hõlmab kogu Eesti territooriumi ja seda vahetult ümbritsevad merealad. Siin leviv põhjavesi on väga oluline olme- ja joogivee ressurss, ent ületarbimise ja saastamise tõttu vajab põhjaveevaru teaduslikult põhjendatud kaitset ning jätkusuutlikku majandamist. Sellega seotud komplitseeritud probleemistiku lahendamiseks konstrueeris L. Vallner 2002. aastal Eesti hüdrokeoloogilise arvutimudeli (EHA), mille moderniseeritud variante kasutatakse TTÜ Geoloogia Instituudi mainitud uurimuse teostamisel.

EHA abil saab mudeldada põhjaveekihtkonnas kulgevaid mittestatsionaarseid filtratsiooni- ja ainetranspordi protsesse ning koostada detailseid vee- ning ainebilansse. Mudel koosneb kuni 22 mudelikihist, mis esindavad kõiki peamisi vettandvaid ja suhteliselt vettpidavaid hüdrokeoloogilise stratigraafia üksusi maapinnast kuni kristalse aluskorra ülemise vettjuhtiva osani (k.a.). Ülalt esimeseks väga oluliseks mudelikihiks on pinnakate, mida läbib kogu põhjavee sademetest toitumine (infiltratsioon) ja samuti põhjavee äravool pinnaveekogudesse.

Mudeldamise adekvaatsuse parandamiseks täiustatakse pidevalt EHA konstruktsiooni,

^a IGCP – International Geological Correlation Programme Project

^b INQUA TERPRO – International Union for Quaternary Research Commission on Terrestrial Processes, Deposits and History

sisestusandmeid ja tarkvara. Muu hulgas on ilmnud, et mudeli pinnakattekiht kui geomeetriline kujund vajab defineerimist infotöötuse kaasaegsete meetoditega praeguseks kogunenud uute andmete alusel.

Sellest tulenevalt on käesoleva töö eesmärk koostada EAB pinnakatte kujundi arvutimudel, mida saaks kasutada EHA ülalt esimese kihi genereerimiseks. Pinnakatte arvutimudel võimaldab määrata etteantud punktides nii maapinna kui ka mere ja suurjärvede põhja kõrgused ning samuti vastavad aluspõhja kõrgused. Säärase mudeliga saab arvutada pinnakatte paksuse mis tahes etteantud punktis ja pinnakatte mahu mis tahes piirkonnas. Pinnakatte kujundi täpsustamine tõstab EAB usaldusväarsust ja laiendab selle kasutusala põhja- ja pinnavee vahelise seose uurimisel. Tekib võimalus luua EAB pinnavee miinimum-äravoolu arvutimudel.

Pinnakatte kujundi arvutimudelit koos juurde kuuluva digitaalse andmebaasiga võib kasutada ka mitmesuguste Kvaternaarigeoloogia probleemide lahendamiseks. Seda võiks rakendada settekuhjumise, denudatsiooni ja muude geomorfoloogia küsimuste käsitlemisel. Vajaduse korral saab mudelit edasi arendada, eristades pinnakatte üldkujundis alamkujunditena Kvaternaari setete geneetilised tüübid.

Töö tulemused on avalikustatud 2014. aastal Stockholmis toimunud põhjamaade hüdroloogikonverentsil (Porman, Vallner 2014) ja need sisalduvad ka eelretsenseeritavale rahvusvaheliselt tunnustatud teadusajakirjale „Hydrology Research“ 2015. aasta mais avaldamiseks saadetud artiklis (Vallner, Porman, in press).

1. Teoreetiline taust

1.1. Käsitletavad alad

Balti Arteesiabassein (BAB) hõlmab kogu Eesti, Läti ja Leedu, Gotlandi saare, Põhja-Poola, Venemaa Kaliningradi oblasti ja Valgevene ääreala (joonis 1). Arteesiabasseinideks nimetatakse ulatuslikke nõgusaid geoloogilisi struktuure, mis sisaldavad surveist põhjavett - arteesiavett. Igas arteesiabasseinis saab eraldada toiteala, surveala ja väljavooluala (Mokrik 1997). Ligikaudu kolmandik arteesiabasseinist jääb Läänemere alla. Põhjas ja loodes levib BAB kuni aluspõhja settekivimite väljakiildumisjooneni tardkivimitest koosneval Balti kilbil (Mokrik 1997, 2003; Virbulis et al. 2013; Iodkazis 1989 vene k.). Edelapiir kulgeb piki Ida-Euroopa ja Kaledoonia platvormi kontaktjoont Bornholmi saarest kuni ligikaudu Torunini Poolas. Kagupiiriks peetakse enamasti Valgevene-Masuuria antiklinaali. Idapiir Moskva arteesiabasseiniga on üleminekuline ja disputeeritav. Kirdes ühtub see praktiliselt Eesti-Venemaa administratiivpiiriga (Vallner, Porman, in press; Virbulis et al. 2013; Iodkazis 1989). BAB'i kogupindala on 480 000 km².

Eesti arteesiabassein (EAB) on L. Vallneri definitsiooni järgi ala, kus levib Eesti

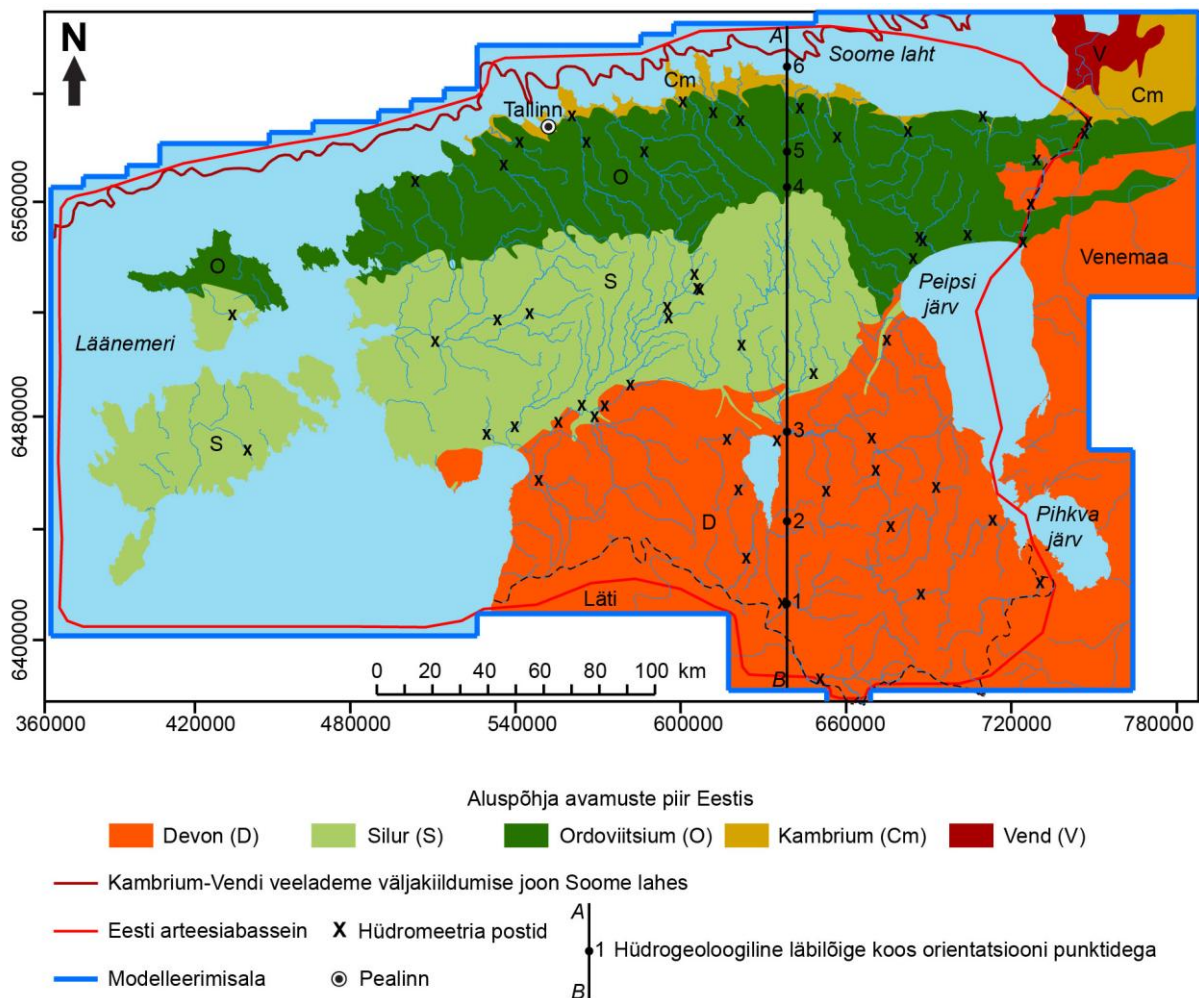


territoriumil kujunenud või täienenud põhjaveevool (Vallner, Porman, *in press*). Selle ulatust näitavad EHA-ga määratud põhjaveevoolude suunavektorid konkreetselt. Põhjas ja idas EAB ja BAB piir ühtub, järgides aluspõhja settekivimite väljakiildumist Soome lahes, Narva jõe ning Peipsi-Pihkva järve keskjoont ja Piusa ning Optjoki jõe veelahet kuni Lokno kerkeala keskosani (joonised 1 ja 2). EAB lõunapiir läheb Loknost Krabini ja sealt edasi üldiselt piki Eesti ja Läti jõgede topograafilist veelahet Iklani. Liivi lahes kulgeb piir Iklast üle Ruhnu Irbe väina keskosani. EAB läänepiiriks

Joonis 1. Mudeldamisala.

on Kambriumi kihtide põhjavee voolujoon (trajektoor), mis jääb Nootamaa saartest ligikaudu 5 km lääne poole. EAB üldpindala on 70 569 km², millest maismaa hõlmab 46 256 km² ja mere ning suurjärvede alla jääb vastavalt 22 393 ja 1920 km².

Kasutatud tarkvara nõuete tõttu tuli EAB adekvaatseks mudeldamiseks eristada sellest veidi suurem ristkülikuline ala. Lisaks pikendati mudeldamispiirkonda Eestist ida poole kuni Leningradi oblasti Opolje asula meridiaanini. See andis võimaluse Peipsi-Pihkva järve kui olulise riikidevahelise veekogu tervikliku veebilansi arvutamiseks. Neid kaalutlusi jälgides on EHA uurimisalaks võetud ristkülik, mille nurkade ristkoordinaadid on Lamberti konformsele koonilisele projektsioonile tuginevas Eesti põhikaardi süsteemis (L-EST) järgmised: X = 359 166, Y = 6 370 272; X = 359 166, Y = 6 630 272; X = 779 166, Y = 6 630 272; X = 779 166, Y = 6 370 272. Mudeldamisristküliku kogupindala on 109 200 km².



Joonis 2. Mudeldamisala.

Mudeldamisristküliku piiridesse jäi ka ala, mille käsitlemine EAB ja Peipsi-Pihkva järve uurimise seisukohalt polnud oluline. See ala deaktiveeriti mudeldamise tarkvara vahenditega ja niimoodi kujunes EHA tegelikuks mudeldamisalaks joonisel 2 treppjoonega eristatud piirkond. EHA tegeliku mudeldamisala pindala on 88 032 km², millest 45 230 km² on Eesti maismaaterritorium koos Eestile kuuluva Peipsi-Pihkva järve osaga. Venemaast koos Peipsi-Pihkva järvega jääb mudeldamisalale 12 300 km² ja Lätist – 2 000 km². Mere alla jääb 28 514 km². Käesolev töö tegeleb EHA tegeliku mudeldamisalaga, mille piirides luuakse pinnakatte kujundi mudel.

1.2. Aluspõhja reljeef ja pinnakate

Mudeldamisala aluspõhja ülemise osa moodustavad vanaaegkonna kõvad terrigeensed ja karbonaatsed settekivimid. Erineva litoloogilise koostisega kivimite selektiivse denudatsiooni tulemusena on kujunenud aluspõhja pealispinna kuestalaadne reljeef (Raukas 1995; Tavast 1997). Devoni ajastu järgse, ligikaudu 350 miljonit aastat kestnud mandrilise kulutuse tulemusena tekkisid aluspõhjakivimeist koosnevad lavamaad, mida liigestasid madalikud ning laiad ja sügavad vanad jõeorud (Raukas, Tavast 1982). Kõige madalamal asub aluspõhja pind vanades, enamasti mõne kilomeetri laiustes orgudes (Arold 2005). Laiade ja sügavate (Harkus 145 m ja Väänas 127 m allpool kaasaegset merepinda) orgude kujunemine oli võimalik seetõttu, et maapind oli Kvaternaari eelsel ajal mere suhtes kõrgemal kui praegu (Vaher et al. 2010). Põhja-Eesti vanad orud suunduvad Soome lahe nõos voolanud Ürg-Neeva poole ja paelavalt laskudes moodustasid nad oma suudmealadel klindilahtesid. Lõunapoolsed vanad orud on valdavalt kirde-edelasuunalised. Eesti kaguosa aluspõhja läbib Valga-Mustvee sihiline vana org, mille põhi asub kümneid meetreid allpool kaasaegset merepinda. Seda lõikab Otepää kõrgustikul Elva ürgorg ja Tõraverest põhja pool ulatub sinna sisse Ürg-Võrtsjärve laht (Arold 2005). Vanad sügavalt aluspõhja uuristunud orud esinevad Edela-Eestis ja praeguse Matsalu lahe ja Soela väina all ning Sõrve poolsaarel. Morfoloogiliselt on ürgorud moldorud, kuid leidub ka kanjonorge. Lõuna-Eestis on vanade orgude nõlvad järsemad kui Põhja-Eestis.

Kvaternaari ajastul toimunud mandrijäätumised kandsid minema varasemate setete paksu kihi ja tasandasid aluspõhja reljeefi, kusjuures moodustus kaasaegne pinnakate (Raukas, Kajak 1997). See koosneb aluspõhja katvatest kobedatest setetest, mis enamasti kujunesid

mandrijää toimet mujalt kohale kantud murenenud aluspõhjakivimeist või tekkisid kohapeal geoloogiliste ja bioloogiliste protsesside tulemusena (järvesetted, turvas jms). Vanad aluspõhja orud täitusid mandrijääatumise ajal mitmesuguste setetega. Osa vanadest orgudest pole nüüdisreljeefis tuvastatavad ja seepärast nimetatakse neid mattunud orgudeks. Hulk vanu orge on siiski ka kaasajal nähtavad, kuna nende ülemist osa täitnud setted on mandrijää sulamisveega ära uhatud.

Pinnakatteks nimetatakse aluspõhja katvaid kobedaid setteid, mis on tekkinud murenenud ning samasse kohta jäänud aluspõhjakivimeist (eluvium) või geoloogiliste välisjõududega mujalt kohale kantud (Raukas 1995). Kvaternaarse pinnakatte paksus on mudeldamisalal väga ebahütlane, kõikides vahemikus mõnekümnest sentimeetrist Põhja-Eesti alvaritel kuni 130–150 meetrini vanades orgudes. Kujunemistingimuste järgi eristatakse pinnakattes liustiku-, liustikujõe-, jääjärve-, mere-, tuule, järve-, jõe-, bio- ja tehisteckelisi setteid (Raukas 1995). Need erinevad üksteisest kivimilise ja granulomeetrilise koostise ning tekstuuri poolest. Praktiliselt üldise levikuga on liustikusetted, mis valdavalt koosnevad kive, kruusa ja liivateri sisaldavast moreensist saviliivast, harvem liivsavist. Sagedased on ka liustikujõgedest välja settinud liiva- ja kruusalademed. Need moodustavad lainelisi tasandikke ja kohati sisalduvad mattunud vanades orgudes. Mandrijää serva pikaajalise seisaku piirkondades on pinnakate kuhjatud kuplistikeks, seljandikeks ja teisteks positiivseteks pinnavormideks. Madalikel, eriti Lääne-Eestis, levivad jääjärvetekkelised setted – saviliivad ja liivsavid koos viirsavidega. Ligikaudu 20% mudeldamisala pindalast katavad mitmesuguste turbaliikidega esindatud enamasti kuni 8 m paksused soosetted. Mere- ja järvenõgudes avaneva aluspõhja pealispind on samuti kaetud kvaternaarse setetega, mille paksus ulatub mõnest meetrist kuni 80 meetrini. Nende hulgas domineerivad saviliivakad ja liivsavid erimid.

Kvaternaarse setete pealispinnaks on kaasaegne maapind või järve- või merepõhi. Alumine pind langeb kokku aluspõhja pealispinnaga. Alumise ja ülemise pinna vahele jääv ruum on käesoleva uurimuse peaobjekt – pinnakatte kujund. Selle peamiseks karakteristikuteks on pindade absoluutsed ja suhtelised kõrgused, ülemise ja alumise pinna omavaheline vertikaalne kaugus (pinnakatte paksus) ning terve kujundi või selle osade maht. Pinnakatte kujundi mudeldamine annab palju uusi võimalusi pinnakattega seotud probleemide kvantitatiivseks uurimiseks kaasaegsel teaduslikul tasemel.

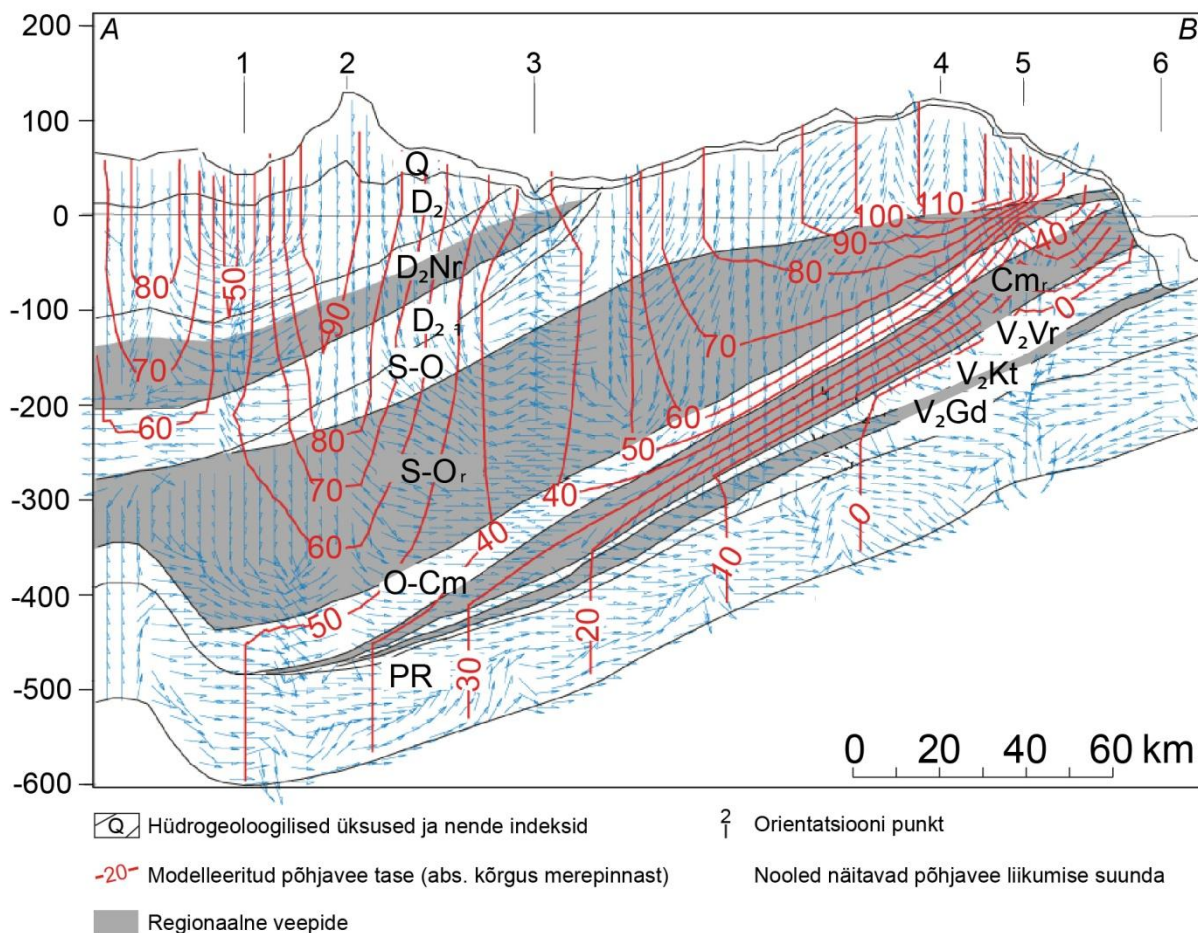
1.3. Eelnevad uurimused

Esimene pinnakatte kaart koostati 1935. aastal A. Tammekannu juhendamisel. Kaart oli mõõtkavas 1:200 000. Järgmine käsikirjaline pinnakatte kaart, mõõtkavas 1:200 000, valmis 1953. aastal K. Orviku juhendamisel. 1959. aastal ilmus trükis 1:600 000 Eesti pinnakatte kaart ja selle juurde 1960. aastal trükitud kvaternaari setete iseloomustus (Eesti Geoloogiakeskus). Aastail 1958-1973 toimunud keskmise-mõõtkavalise kompleksse geoloogilise kaardistamise tulemusena saadi 23 kaardilehte mõõtkavas 1:200 000 ning mõned majanduslikult olulised piirkonnad kaardistati ka mõõtkavas 1:50 000 kaarte. Kajak, 1995; Raukas ja Pirrus, 1996, koostasid kvaternaari stratigraafiast töid ning 1995. aastal ilmus Raukas et al. töö holotseeni kohta (Kajak 1999).

Monograafiaid liustikusetest on koostatud 1971. Raukase poolt, Eesti aluspõhja topograafia (Tavast ja Raukas 1982), nüüdis- (Orviku 1974) ja paleorandlatest 1967. aastal Kesseli ja Raukase poolt. Kvaternaari setete stratigraafia üldistavaid töid on teinud veel (Kajak jt, 1976; Raukas jt, 1993; Raukas, 1995; Raukas, Kajak, 1995; Raukas, Kajak, 1997), geneetiliste tüüpide (Eltermann, Raukas, 1963; Kajak, 1959,1961,1964,1965a, 1965b; Kalm, 1986; Kalm jt, 1985; Miidel, Raukas, 1965; Orru, 1992,1995; Orviku, 1958; Pirrus, 1968; Raukas, 1978; Saarse 1990, 1994; Viiding 1987) ja nendega seotud maavarade (Raudsep jt, 1993) kohta. 1992. aasta suuremõõtkavalise kvaternaari setete kaardistamise tarvis töötati välja ka käsikirjaline legend. Aluspõhja mattunud orgudest on töid teinud Miidel et al. 2006. aastal, Vasavere orust Raukas et al. 2007. aastal, 2010. Vaher et al. Tallinna ümbruse mattunud orud ning 2007. aasta M. Rattase töö, mis uurib Põhja-Eesti orgusid. Peipsi järve nõo aluspõhja pealispinda ja morfoloogiat on uurinud aastal 2009 tööga Miidel et al. 2012. aastal ilmus Volli Kalmu artikkel viimase mandrijää pealetungi (mis hõlmas ka Eesti alasid) modelleerimisest ja selle mõjutustest pinnamoe kujundamisel. Raukas ja Karhima (2007) on samuti uurinud Eestis ja Soomes moodustatud mandrijää pinnavorme. Potentsiaalseid liiva- ja kruusaleiukohti tuvastasid Gomez ja Xu (2013) liustikulisi pinnavorme uurides. Samuti on Virbulis et al. (2013) loonud Balti arteesiabasseini mudeli, kus ühe osana on kaasatud ka Eesti. Eesti pinnakate on rikkaliku uuringute ajalooga ja põhjalikult läbi uuritud, kuid nagu selgub, leitakse ikka ja jälle midagi, mida uurida.

1.4. Põhjavee kihid ja geofiltratsioon

EAB kivimite erinevate filtratsioonitakistuste tõttu esinevad selles vaheldumisi lasuvad vettandvad ja vettpidavad kihid, mis levikuulatuse ja stratigraafilise kuuluvuse järgi liigestatakse veeladestikeks ja veepidestikeks ning need omakorda madalamat järku üksusteks – veelademeteks ja veepidemeteks (Perens, Vallner 1997; Vallner 2002, 1996a). Kõige peal on kõikjal leviv pinnasevee ladestik (hüdrogeoloogiline indeks Q+Pz), millesse kuulub pinnakattes ja osalt aluspõhja pealmistes kihtides sisalduv (enamasti surveta) põhjavesi (joonis 3). Kagu-Eestis suhteliselt väikesel alal paiknevad Ülem-Devoni dolomiidid ja dolomiidistunud lubjakivid moodustavad ülalt esimese vaid aluspõhjakivimitest koosneva veeladestiku (D₃). Järgmine, valdavalt liivakivide ja aleuoliitidega esindatud Ülem-Kesk-Devoni veeladestik (D₃₋₂) jääb Häädemeeste-Kallaste joonest lõuna poole. Ülalt esimeseks regionaalseks veepidestikuks on Lõuna-Eestis Kesk-Devoni Narva lademe savikad kihid (D₂Nr). Põhja- ja Kesk-Eestis ning Lääne-Eesti saartel on oluline veevarustuse allikas lubjakividest ja dolomiitidest koosnev ja sageli karstunud Siluri-Ordoviitsiumi veeladestik (S-O). Rohkem kui 150 m sügavusel lasuvad karbonaatkivimid moodustavad oma suure filtratsioonitakistuse tõttu ülalt teise regionaalse ulatusega Siluri-Ordoviitsiumi veepidestiku (S-O_r). Selle all paikneb liivakividest ja aleuoliitidest koosnev Ordoviitsiumi-Kambriumi veeladestik (O-Cm). Järgneb kogu EAB-s leviv Kambriumi veepidestik (Cm_r), milles eristakse Lääne-Eestis Lükati-Sõru (Lk-Sr) ja ida pool Lükati-Lontova (Lk-Ln) veepide. Sügavamal asub Kambriumi-Vendi liivakive ja aleuoliite hõlmav Kambriumi-Vendi veeladestik (Cm-V). Selle ülemiseks osaks on Mandri-Eestis Voronka veelade (Vr) ja alumiseks – Gdovi veelade (Gd). Nende vahele jääb Kotlini veepide (Kt). Lääne-Eesti saartel levib Kambriumi veepidestiku all Voosi veelade (Vs). Kõige sügavamale jääb Proterosoikumi veeladestik (PR), kuhu kuulub aluskorra kristalse vundamendi ülemine ligikaudu 100 m paksune lõhestunud osa.



Joonis 3. Põhjaveekihtide läbilõige (asukoht näidatud joonisel 2).

EHA abil määratud EAB põhjavee kujunemise ja liikumise (geofiltratsiooni) põhiparameetrid on esitatud tabelis 1 (Vallner 1997; Vallner, Porman, in press). Need näitavad, et EAB kivimite poorides ja lõhedes on põhjavett ligikaudu 1800 km^3 . Uut põhjavett tekib sademevee maasse imbumise (infiltratsiooni) tagajärjel ligikaudu $3.2 \text{ km}^3/\text{a}$ või $100 \text{ m}^3/\text{s}$, mis pindala kohta teeb keskmiselt $70 \text{ mm}/\text{a}$ või $2,4 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$. Kõige intensiivsem on põhjavee toitumine tugevasti karstunud karbonaatkivimitest koosnevatel Põhja-Eesti kõrgustikel, kuid ka Lõuna-Eesti kõrgustikel ületab see keskmise kuni kaks korda. Põhjavesi liigub kõrgematelt aladelt madalamate poole ja väljub veekogudes. Pinnakattes ja aluspõhja ülemistes kihtides voolab lähimate lahtiste veekogude poole valdavalt surveta (vabapinnaline) põhjavesi, mille tase jääb enamasti maapinnast mõne meetri sügavusele. Allapoole, vettpidavate kihtide vahele imunud põhjavesi on survealine (võib kerkida katvast veepidemest kõrgemale) ja liigub suuremate jõgede kesk- ning alamjooksude poole, kuhu suubub tõusvate vooludena. Jõgedesse voolab põhjavett kokku $72 \text{ m}^3/\text{s}$. Kõige alla jääb põhjavee regionaalne voolusüsteem, mis toitub nii Lõuna-Eesti kõrgustikelt kui ka EAB-sse kagu ja lõuna poolt tulevast põhjaveest. Alumisest

voolusüsteemist tungib vahetult merre põhjavett $8 \text{ m}^3/\text{s}$, maa-alune veevahetus Läti ja Venemaaga on väiksem kui $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Väljapumpamine maapõuest joogi- ja tarbevee saamiseks ning kaevanduste kuivendamiseks oli 2013. a. keskmiselt $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Maapinnast kuni 100–150 m sügavuseni on põhjavesi enamasti mage, kuid sügavamal selle soolsus suureneb, ulatudes kontsentratsioonideni 4–5 g/l Kagu-Eestis ja 22 g/l Edela-Eestis.

1.5. Eesti arteesiabasseini hüdrogeoloogiline arvutimudel

EHA hõlmab kõik ülalmainitud hüdrogeoloogilised üksused (joonis 3). Mudeli baasvariandi puhul esindavad neid 13 üksteisel lasuvat virtuaalset mudelikihti (Vallner 2003, 2013; Vallner, Porman, in press). Kaevanduste kuivendamise ja veevarustuse komplitseeritud probleemide lahendamiseks on konstrueeritud ka EHA täiendavad variandid, milles veeladestikud on liigestatud kohalike veepidemete järgi veelademeteks detailsemalt. Säärased mudelid koosnevad kuni 22 kihist, kuid suurema täpsuse saavutamiseks võib kihte veelgi lisada. Mudeldamisala katab ortogonaalne, mudeldamisristküliku külgedega paralleelne arvutusvõre, mis jaotab ala horisontaaltasandil lõuna-põhja suunas veergudeks ja lääne-ida suunas ridadeks. Võre samm võib olla X- ja Y-koordinaadi suunas vabalt valitav ning regulaarne või irregulaarne. Mudeli baasvariandi võre samm on $1000 \cdot 1000 \text{ m}$, kuid mitmete probleemide täpsemaks uurimiseks on võret kohati lokaalselt tihendatud kuni sammuni 125–250 m (Marandi, Vallner 2010; Vallner et al. 2015). Regionaalsete üldistavate uuringute jaoks võib võtta võresammuks $4000 \cdot 4000 \text{ m}$. Mudeli kõige ülemise kihi virtuaalne ülemine pind ühildub nüüdisreljeefiga, s.o. – maismaa pinna ja veekogude põhjaga. Ülemise kihi alumine pind vastab aluspõhja pealispinna absoluutkõrgusele.

Mudeli tarkvaraks on rahvusvaheliselt tunnustatud ja laialdaselt kasutatav programmipakett Visual MODFLOW Classic, mis võimaldab mudeldada mittestatsionaarset geofiltratsiooni ja põhjavee ingredientide transporti hüdraulikaliste omaduste poolest heterogeenses poorses keskkonnas (Schlumberger 2015a). MODFLOW imitatsioonimudel baseerub teist järku osatuletistega paraboolset tüüpi diferentsiaalvõrrandil, mis kirjeldab konstantse tihedusega vee statsionaarset või mittestatsionaarset filtratsiooni poorses filtratsioonitakistuse poolest heterogeenses keskkonnas (Fetter 2014):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t},$$

kus K_{xx} , K_{yy} and K_{zz} on filtratsioonikoefitsendid x -, y - ja z -teljel dimensiooniga [LT^{-1}]; h on vee rõhk [L]; W on süsteemi negatiivne või positiivne allikas [T^{-1}]; S_s on poorse keskkonna elastne mahutavus [L^{-1}] ja t on aeg [T].

Konkreetsel olukorral väljendamisega tuleb võrrand lahendada antud alg- ja rajatingimustel. Visual MODFLOW järgi on modelleerimise lähteandmetena antavateks rajatingimusteks brutinfiltratsioon, evapotranspiratsioon (auramine põhjavee pinnalt ja pinnaseniiskust kasutavast taimestikust), Dirilecht tingimuse (modelleerimisala mingil rajal antakse konstantne rõhk), Naumanni tingimus (rajal antakse konstantne rõhu gradient, mille erijuhuks on 0-väärtus), Cauchy tingimus (rajal antakse modelleerimisega arvatud rõhust sõltuv vool seosega:

$$Q = C (H_b - H_m),$$

Kus Q on mudeli mingisse rajaplokki sisenev või sealt väljuv vool dimensiooniga [L^3T^{-1}]; H_b rajale antud algrõhk [L]; H_m mudeli poolt arvatud rõhk ja C raja veejuhtivus [L^2T^{-1}]) ning viimase modifikatsioonid – veekogu- ja dreeningimused. Geofiltratsiooni kirjeldava diferentsiaalvõrrandi rajatingimuse moodustab ka negatiivse punktallikana W antav põhjavee väljapumpamine kaevudest (Vallner 2002).

Lähtulevikus võetakse kasutusele täiustatud programmpakett Visual MODFLOW Flex (Schlumberger 2015b). Mudel lahendab geofiltratsiooni ja –migratsiooni kirjeldavate fundamentaalsete diferentsiaalvõrrandite süsteemid uusimate numbriliste meetoditega. Lahendusteks vajalikud alg- ja rajatingimused on mudelisse sisestatud hüdrogeoloogiliste kaardistamiste, linnade ja asulate põhjaveevaru uuringute, põhja- ja pinnavee seire jm materjalide alusel. Arvutuste adekvaatsuse saavutamiseks on mudel detailselt kalibreeritud põhjavee 1976., 1990., 1998., 2006. ja 2013. a. tasemete ja neile vastavate miinimumvooluhulkade järgi hüdrograafilises võrgus ja ka põhjavee keemilise ning isotoopkoostise alusel. Mudeli abil saab arvutada põhjaveekihtkonna kõikide punktide jaoks igaks ajamomendiks põhjavee hüdraulilise rõhu, filtratsioonivoolu suuna, kiiruse ja hulga; samuti põhjavee ingredientide kontsentratsiooni, nende transpordivoo suuna, kiiruse ning hulga (joonis 3). Võib koostada üksikasjalikke regionaalseid ja lokaalseid vee- ning ainebilansse (tabel 1).

EHA sobib hästi nii EAB regionaalseteks üldistavateks alusuuringuteks, kui ka ratsionaalseteks rakendusuuringuteks. EHA tervikuna ja selle lokaalsed arendused on

praktikas aprobeeritud põhjavee optimaalse eksploatatsioonirežiimi määramise ning reostusainete transpordi analüüsimisega. Seejuures on koostatud rida iseseisvaid mudeleid, ent kõik need haakuvad funktsionaalselt EHA-ga ja täiendavad üksteist vastastikku. (Bruin et al. 2006; Gavrilova et al. 2010; Marandi, Vallner 2010; Sørliet et al. 2004; Vallner 2011, Vallner et al. 2015). Läbiviidud modelleerimistega on rekonstrueeritud põhjavee looduslik rõhk ja kvaliteet põhjaveekihtkonnas, millest lähtudes võib hinnata hilisemate tehismõjustuste määra. Mudeli abil saab ka prognoosida maksimaalse võimaliku usaldusväärsusega põhjavee tulevikuseisundeid (Vallner 2013). EHA sihtgrupiks on kõik Eesti veeprobleemidega tegelevad spetsialistid ja eriteadlased ning seda saab kasutada efektiivse õppevahendina ülikoolides.

2. Materjalid

2.1. Vajalikud andmed ja nende kättesaadavus

Pinnakatte kujundi määramiseks läheb vaja punktandmeid pinnakatte ülemise ja alumise pinna kõrguste kohta, mis üldjuhul on matemaatiliselt kirjeldatavad funktsioonina $H = F(X, Y, Z)$, kus H on vaadeldava punkti absoluutne kõrgus ja X , Y ja Z on selle koordinaadid Cartesiuse ruumis. Kuna geoloogiliste ja eriti geofüüsikaliste uuringutega fikseeritakse ning registreeritakse pigem aluspõhja pealispind kui sellega praktiliselt identne pinnakatte alumine pind, siis allpool pööratakse palju tähelepanu just aluspõhja pealispinna andmetele.

Käesoleva töö jaoks otsiti ja koguti andmeid kõikidest teada olevatest allikatest. Esmajoonel kasutati teaduslikke publikatsioone – raamatuid ja artikleid. Põhjalikult uuriti mitmesugustes fondides ja arhiivides säilitatavaid käsikirjalisi aruandeid ja kaarte ning kättesaadavaid digitaliseeritud andmebaase. Enamik andmetest oli originaalkujul punktide kaupa tabelites, kuid palju väärtuslikku teavet andsid ka kaartide isojooned ja kihtide vertikaalsed läbilõiked ning erinevatel eesmärkidel konstrueeritud nn pinnafailid.

Maapinna andmeid oli suhteliselt lihtne saada, sest nende kogumisega ja täpsustamisega tegeletakse senini aktiivselt. Tänu moodsatele mõõteseadmetele ja –meetoditele on säärase andmete kvaliteet enamasti väga hea ja hulk küllaldane. Seevastu pole piisavalt usaldusväärseid aluspõhja pealispinna kõrgusi. Põhiosa aluspõhja kõrgusandmetest pärineb nõukogude ajast, nad on jäänud digitaliseerimata ja nende korrektsus äratab sageli kahtlusi. Tänapäeval tehakse Eestis geoloogilisi uuringuid vähe ja süsteemilt. Aluspõhja kõrgusi registreeritakse enamasti mõne muu tegevuse kõrval (näit. puurkaevude rajamisel jm ehitustöödel), ent neid andmeid on tülikas ja kallis koguda.

2.2. Andmekogud

Maa-ameti geoloogia osakonnal on korralik andmebaas nii alus- kui pealiskorra andmete kohta. Enamik maismaad hõlmavatest geoloogilistest baaskaardilehtedest on kahjuks aga paber kandjal. Igal aastal uuendatakse geoloogia digitaalandmebaasi mõne baaskaardi lehe

võrra, liikudes Põhja-Eestist lõuna suunas. Eestist on siiani jõutud digitaliseerida vaid Paldiskist Narvani sisemaa suunas 40–60 kilomeetri laiune lõik Põhja-Eestis ja kaks Lõuna-Eesti kaardilehte, kuid edaspidi kavatsetakse digitaliseerida kõik Eesti geoloogilise baaskaardi lehed. Maa-amet väljastab oma kogudes olevaid andmeid kõigile soovijatele.

Keskkonnaagentuuri hallataval Keskkonnaregistris on olemas ka rohkem kui 28 000 üle Eesti suhteliselt ühtlaselt jaotunud puurkaevu andmestik, kust võib leida puurimisel määratud pinnakatte paksuse ja olulisemate startigraafiliste üksuste kirjeldused koos kaevu asukoha koordinaatidega. Need andmed on Exceli-formaadis tabelina samuti kõigile soovijatele kättesaadavad.

Merealuste alade kohta pole alus- ja pealiskorra andmeid sama lihtne leida, kui maismaa kohta. Läänemere, seal hulgas Soome lahe, Väinamere ja Riia lahe kohta on tehtud uurimusi, puuritud auke ja teostatud seisimokustilisi uuringuid, kuid enamik merealustest andmetest on hoiul arhiivides paber kandjatel või pole avalikuks kasutamiseks saadaval.

Eesti Geoloogiakeskuse Geoloogiafondi arhiivis on kõik selle asutuse ja tema eelkäija ENSV Geoloogia Valitsuse tehtud uuringuid. Aruanded on paber kandjatel ja valdavalt vene keeles. Aruanded sisaldavad tekstiosa ning kaartide ja tabelite kogumeid. Andmed on kõigile soovijatele kättesaadavad ja eritasu eest võib tellida nende koopiaid.

Maa-amet haldab maapinna kõrgusandmeid ning omab nende kvaliteetset andmekogu. Kõrgusandmed on GeoTIFF-vorminduses nii rasterkaardi kui ka ASCII XYZ-tekstifailina. Kasutada saab 5-, 10-, 25-, 50- ja 100-meetrise resolutsiooniga rasterkaarte kas üksikute kaardilehtede kaupa või tervet Eestit katva kaardina. Andmeid kogutakse aerolaserskaneerimisega ja andmebaase uuendatakse igal aastal. Maapinna kõrgusandmed on kättesaadavad kõigile soovijatele.

Merepõhja kohta on Veeteede Ametil olemas korralikud batümeetria andmed, mida rakendatakse Eesti territoriaalmere sügavus- ja navigatsioonikaartide koostamisel. Hallatakse nõukogude ajast pärit andmeid ja kogutakse aktiivselt uusi andmeid. Käesolava töö jaoks on kasutatud ka Euroopa Liidu administreeritavat Läänemere batümeetria andmebaasi BSBD (*The Baltic Sea Bathymetry Database*), kuhu on kogutud kõigi Läänemere-riikide ametlikud merepõhja reljefi kõigile vabalt kättesaadavad sügavused.

Läti ja Venemaa aladele ulatuva mudeli osa maapinna kõrgusandmed võeti NASA *SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1* andmebaasist, mis on NASA SRTM (*Shuttle Radar*

Topographic Mission) projekti tulem. See andmebaasi (maailma digitaalne kõrgusmudel 90-meetrise rastersammuga) võivad kasutada kõik soovijad.

Lisaks mainitud andmebaasidele kasutati ka EHA varasemate variantide pinnakihi digitaliseeritud andmeid.

Viited kasutatud andmekogudele ja –baasidele on väljatoodud kirjanduse ja allikate loetelus töö lõpus.

2.3. Kasutatud andmestiku spetsiifika

2.3.1. Maapind ja merepõhi

Maismaa moodustab uuritavast alast 64% ning on Eestis põhjalikult uuritud ja kaardistatud. Maa-ameti toetatud LIDAR mõõtmiste tulemusena on koostatud rida järk-järgult täpsemaid Eesti digitaalseid kõrgusmudeleid, mida kasutatakse nii igapäeva praktiliste ülesannete täitmisel kui ka teaduslikeks uurimusteks. Käesolevas töös kasutati maismaa kõrguste määramiseks 25-meetrise digitaalset raster-kõrguskaarti, kus iga 25 m tagant on määratud kokku 74 832 675 maapinna kõrguspunkti. Käsitletava ala Venemaa ja Läti piirkondade maapinna kõrgus võeti NASA maailma kõrgusmudeli rasterkaardilt. Kasutatud 5 319 654 mõõtmispunkti omavaheline vahekaugus oli 90 m ja nad andsid vajaliku täpsusega tulemuse.

Mere, samuti Peipsi-Pihkva ja Võrtsjärve põhi osa moodustab uuritavast alast kokku 36% ning on detailselt kaardistatud. Käesolevas töös kasutatud andmed on saadud Veeteede Ameti ja Läänemere batümeetria (BSBD) andmebaasist. Pinnaveekogude sügavusi mõõdistatakse erinevate kajaloodidega. Hüdrogeograafia Infosüsteemist (HIS) saab vaadata, kas ja kui tihedalt on erinevad piirkonnad kaardistatud. Andmed on XYZ-vorminduses. Kokku saadi merealade kohta üle 300 000 sügavuspunkti, ent need olid jaotunud maismaa punktidest ebahühtlasemalt. Punktide tihedus oli keskmiselt 20 kuni 100 punkti ruutkilomeetri kohta. Kuna aga Veeteede ametist saadud andmed ei katnud kogu uuritavat ala, lisati puuduolevad punktid käesolevasse töösse Rootsi ja Soome riiklike hüdrograafiateenistuste poolt koostatud Läänemere batümeetria andmebaasist. Need punktid on esitatud regulaarse ortogonaalse võrena, mille sammuks on 500 m. Peipsi ja Lämmijärve sügavusandmed pärinevad samuti

Veeteede Ametist, kuid ei ole, seoses poole Peipsi järve kuulumisega Vene Föderatsiooni koosseisu tervikliku ulatusega. Puuduolevad andmed lisati mitmesugustelt kaartidelt. Võrtsjärve sügavusinformatsioon on enam-vähem terviklik. Pihkva järve kohta kasutati EHA varasemaid andmeid.

2.3.2 Aluspõhja pealispind

Aluspõhja pealispinna kõrgused Eesti maismaal saadi Maa-ameti puurkaevude ja geoloogiliste puuraukude digitaliseeritud andmebaasist, kuid nagu ülal mainitud, see kattis vaid piiratud osa uuritavast alast. Neid täiendati Keskkonnaagentuuri puurkaevude registri ja EHA andmetega, mis hõlmavad küll kogu ala, ent on ebaühtlase paigutusega.

Mere alla jääva aluspõhja kõrguste hankimine oli vaevalisem, sest neid koondavat konkreetset digitaliseeritud andmebaasi pole. Maa-amet on Põhja-Eestis merepõhja kaardistanud Narva lahes umbes 5 km laiuse ribana, Letipea neeme ja Pärisea poolsaare vahel 18 km laiuse riba ning Pakri poolsaarest loode pool umbes 1000 km². Enamik Eesti territoriaalmere alla jääva aluspõhja andmeid saadi Eesti Geoloogiakesksuse meregeoloogiliste kaardistustööde aruannete juurde kuuluvatelt kaartidelt (Mamedov et al 1968; Malkov et al 1986; Talpas et al 1989; Petersell et al 1992; Talpas et al 1994). Kaardid skaneeriti ja nendel kujutatud kõrguste isojooned digialiseeriti käsitsi ArcGIS-i vahenditega. Üksikuid, kuid olulisi punkte saadi ka avaldatud trükistest (Raukas et al. 1991; Lutt et al. 1993). Viidatud trükistelt kogutud andmetest moodustati XYZ-struktuuriga Exceli tabel mis imporditi pärast koordinaatide sobivasse vormi teisendamist ArcGIS-i. Osa andmeid saadi Läti Ülikoolilt T. Saksi vahendusel. Peipsi järve alla jääva aluspõhja kõrguse korrigeerimiseks kasutati EHA andmebaasi ja A. Miideli uurimust (2009). Kõiki nimetatud allikatest kogutud aluspõhja kõrgusi kontrolliti hoolikalt ja võrreldi omavahel, Seepärast saab seda andmestikku pidada üldiselt usaldusväärseks, kuigi kohati mattunud orgude piirkonnas võinuks olla rohkem mõõtmispunkte.

3. Metoodika ja tulemused

3.1. Mudeldamise andmebaas

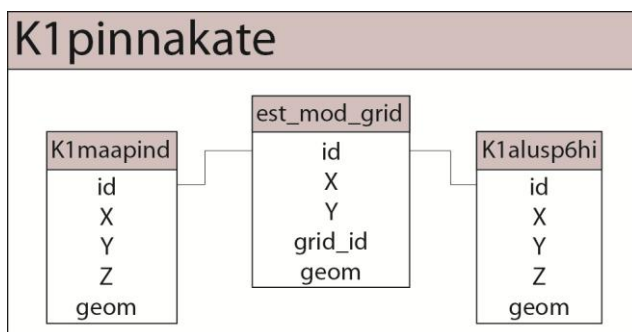
Andmekogude analüüs näitas, et uuritava ala kohta polnud senini koostatud iseseisvat, nii maismaad kui akvatooriumi ühise osana käsitlevat digitaalset andmebaasi, mille alusel saanuks luua pinnakatte kujundi digitaalmudeli. Eksisteeris küll vastav EHA andmebaas, kuid see oli kasutatav vaid koos mudeliga ja vajab täiustamist. Seepärast tuli kogutud andmestikust luua kõigepealt digitaalne koondandmebaas, mis annab andmetest selge süstematiseeritud ülevaate ja laseb andmeid automatiseeritult töödelda kaasaegsete vahenditega. Säärane, nn geoandmebaas võimaldab ruumipäringu abil kasutaja suva järgi valida ja sortida erinevate piirkondade ja kihtide andmeid.

Esimese sammuna seati Tallinna Tehnikaülikooli Infotehnoloogia osakonna kaasabil Linuxiga opereeritavasse virtuaalserverisse üles objekt-orienteeritud andmebaas. Seadistati selle haldamisprogramm PostgreSQL koos postGIS nimelise lisaga, mis võimaldab andmeid esitada ArcGIS-ga töödeldatavas nn *shapefile* (SHP-faili) vorminduses. PostgreSQLi abil konstrueeriti ruumiandmebaas (K1pinnakate) hoiustamiseks kogutud ja töödeldud pinnakatte andmeid.

Maismaa pealispinna andmete jaoks konverteeriti 38 Maa-ameti 25-meetrise sammuga kõrguste rasterkaardi lehte samasuguse sammuga punkt SHP-failideks terve Eesti ulatuses. Kokku genereeriti 74 832 675 võrepunkti. Sama korralditi ka mudeli piiridesse jääva Läti ja Venemaa alla jäävate alade väljalõigatud NASA 90-meetrise rasterkaardi maismaa-aladel, kusjuures genereeriti 5 319 654 võrepunkti. Mere ja järvede alla jäävate kõrguste andmed olid XYZ-failidena, tuli neist esmalt SHP-failid vormindada, kokku üle 300 000 võrepunkti. Genereeritud SHP-failid imporditi K1pinnakate andmebaasi, kus nad sisestati üksikshaaval maismaad ja merepõhja hõlmavasse K1maapind tabelisse.

Aluspõhja pealispinna andmete süstematiseerimist alustati kõikide kogutud XYZ-failide, kus atribuutandmeteks olid punktide ruumikoordinaadid, sh Z-koordinaat sügavuse või absoluutkõrgusena, SHP-failideks salvestamisega. Maa-ameti ning Läti Ülikoolilt saadud punktandmetel olid koordinaadid ja kõrgusväärtused olemas, kuid teiste andmekogude andmed vajasisid täiendavat töötlemist, et neid ArcGIS-s kasutukõlblikuks muuta. Kaartidel esitatud kõrguste isojooned digitaliseeriti ning konverteeriti 100-meetrise vahega punktideks

ja nende jaoks määrati X- ja Y-koordinaadid. Kasutati ka akustilise aluspõhja sondeerimisel saadud läbilõikeprofile (Lutt et al. 1993), kust võeti profiilile märgitud punktide sügavused ja koordinaadid, mille alusel moodustati eraldiseisev punktifail. Peale nimetatute töödeldi täiendavalt ka Keskkonnaagentuuri puurkaevude ja EHA pinnakatte paksuse andmeid. Nende puhul olid olemas küll X- ja Y-koordinaadid, kuid vajaliku aluspõhja sügavuse asemel olid antud erinevate kihtide esinemis sügavused maapinnast. Aluspõhja kõrguse saamiseks tuli kõigepealt stratigraafilise info alusel Kvaternaari kiht välja sortida ning seejärel sortida ka pinnakatte kihi paksuse maksimaalse väärtuse alusel. Seejärel lahutati maapinna kõrgusest Kvaternaari kihi pakseim väärtus. Saadud SHP-failid imporditi koos teiste aluspõhja kõrgusi kirjeldavate SHP-failidega Postgre SQL andmebaasi K1pinnakate ning lisati kõiki aluspõhja andmeid koondavasse tabelisse K1aluspõhi.



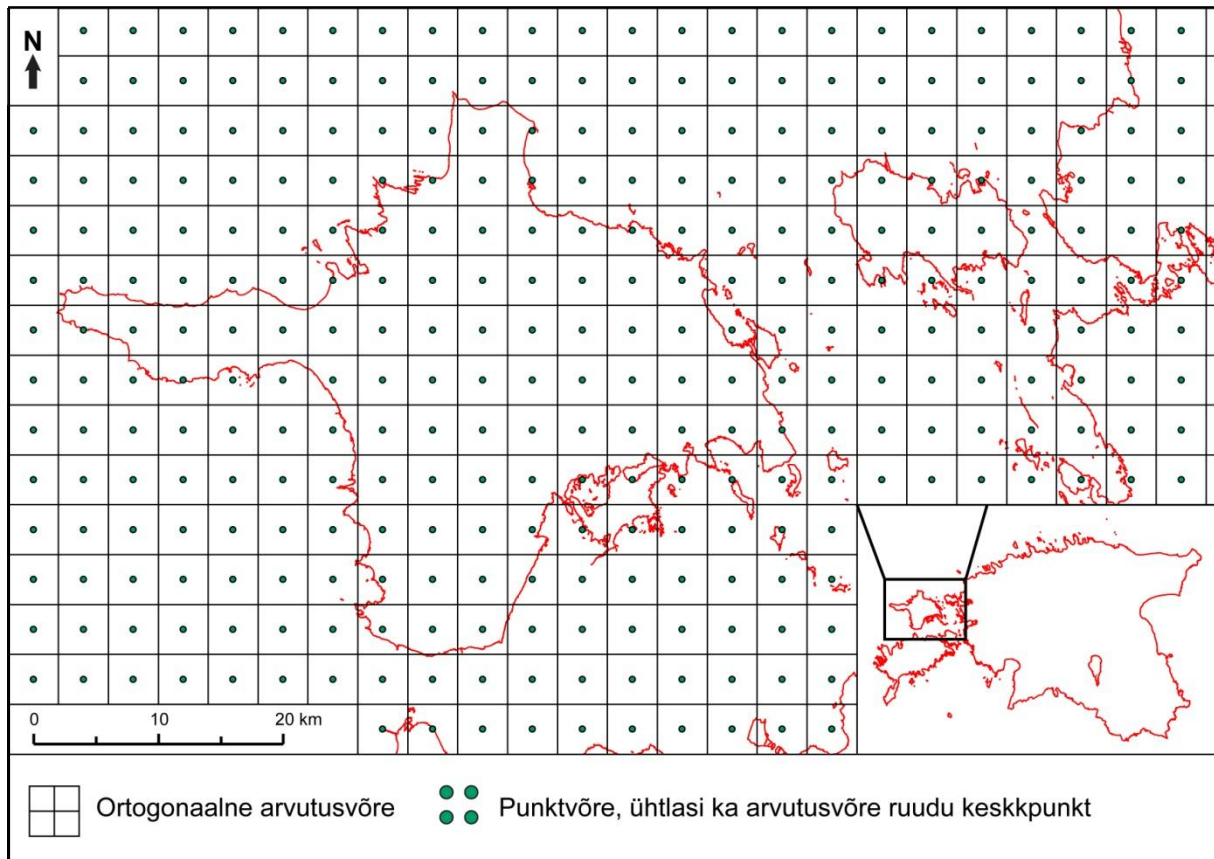
Joonis 4. Pinnakatte andmebaasi struktuur.

Tabelite K1maapind ja K1aluspõhi moodustavad ühtse pinnakatte kihi andmebaasi K1pinnakate (joonis 4), milles on maapinna ja aluspõhja pealispinna absoluutsed kõrgused (Z) X- ja Y-koordinaatidega määratud punktides.

3.2. Pinnakatte kujundi digitaalmudel

Pinnakatte kujundi loomist alustati EHA variandi et27_1 (võresamm 4 km · 4 km) pinnakatte digitaalmudeli impordiga geoinformaatika programmi ArcGIS (ESRI 2011). Sellest loodi punktvõre fail K1pind (K1) ning selle alusel genereeriti ArcGIS-s ortogonaalse võre SHP-fail est_mod_grid sammuga 4 km · 4 km kus iga ruudu keskpunkti tähistas faili K1 punkt. Faili K1 struktuuri alusel moodustati pealmise pinna K1pind_top (Top) ja alumise pinna K1pind_bot (Bot) keskmise absoluutse kõrguse ning samuti keskmise paksuse K1pind_thick (Thick) failid. Parameetreid top, bot ja thick nimetame edaspidi pinnakatte

lasuvuselementideks ja nende asend arvutusvõre suhtes on näidatud joonisel 5. Punktid indekseeriti vasakult paremale (läänest itta) ja ülevalt alla (põhjast lõunasse).



Joonis 5. Arvutusvõre ja tema suhtes asuv punktvõre.

Edasi imporditi K1pinnakate andmebaasi ka 4 km · 4 km arvutusvõre shape fail `est_mod_grid` (joonis 4), et määrata maapinna ja aluspõhja keskmine absoluutne kõrgus igas arvutusvõre ruudus. Selleks koostati eraldi *spatial join*-ruumipäring `est_mod_grid` ja K1pinnakate vahel ning saadi maapinna kõrguste 4 km · 4 km punktvõre-fail (`K1_top`) mis seejärel eksporditi SHP-failina uuesti ArcGIS-i edasiseks töötlemiseks.

Samasuguse päringuga, `est_mod_grid` ja K1aluspõhi vahel saadi ka 4 km · 4 km punktvõre-fail `K1_bot`. Kontroll ArcGIS-ga näitas, et mõnedes piirkondades oli kasutatud digitaalandmestik liiga hõre käesoleva töö jaoks piisava täpsuse saavutamiseks. Selle korvamiseks korrigeeriti digitaalset pinda käsitsi olemasolevate aluspõhja kõrguskaartide järgi.

Maapinna ja aluspõhja pealispinna kõrgusi kirjeldavad failid `K1pind_top.shp` ja `K1pind_bot.shp` liideti ArcGIS-s *join table*-funktsiooniga failile `K1pind.shp`. Antud failis

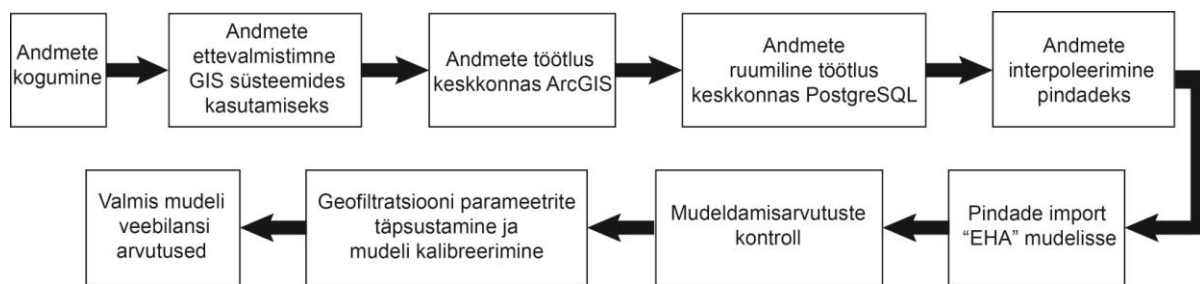
arvutati ka loodud kihi paksus ülemise ja alumise pinna kõrguste vahena. K1pind.shp sisaldab uuritava ala X- ja Y- koordinaatide määratud punktides järgmised pinnakatte lasuvuselemente (meetrites):

Top – pealispinna absoluutne kõrgus;

Bot – alumise pinna absoluutne kõrgus;

Thick – kihi paksus.

Faili K1pind.shp saab kasutada kogu uuritava ala või selle osade pinnakatte mahu arvutamiseks. Seega moodustab fail K1pind.shp koos juurdekuuluva süstematiseeritud andmebaasiga K1pinnakate uuritava ala pinnakatte kujundi digitaalmudeli. Andmebaasi K1pinnakate täiendamise ja täpsustamisega võib pinnakatte kujundit operatiivselt korrigeerida.



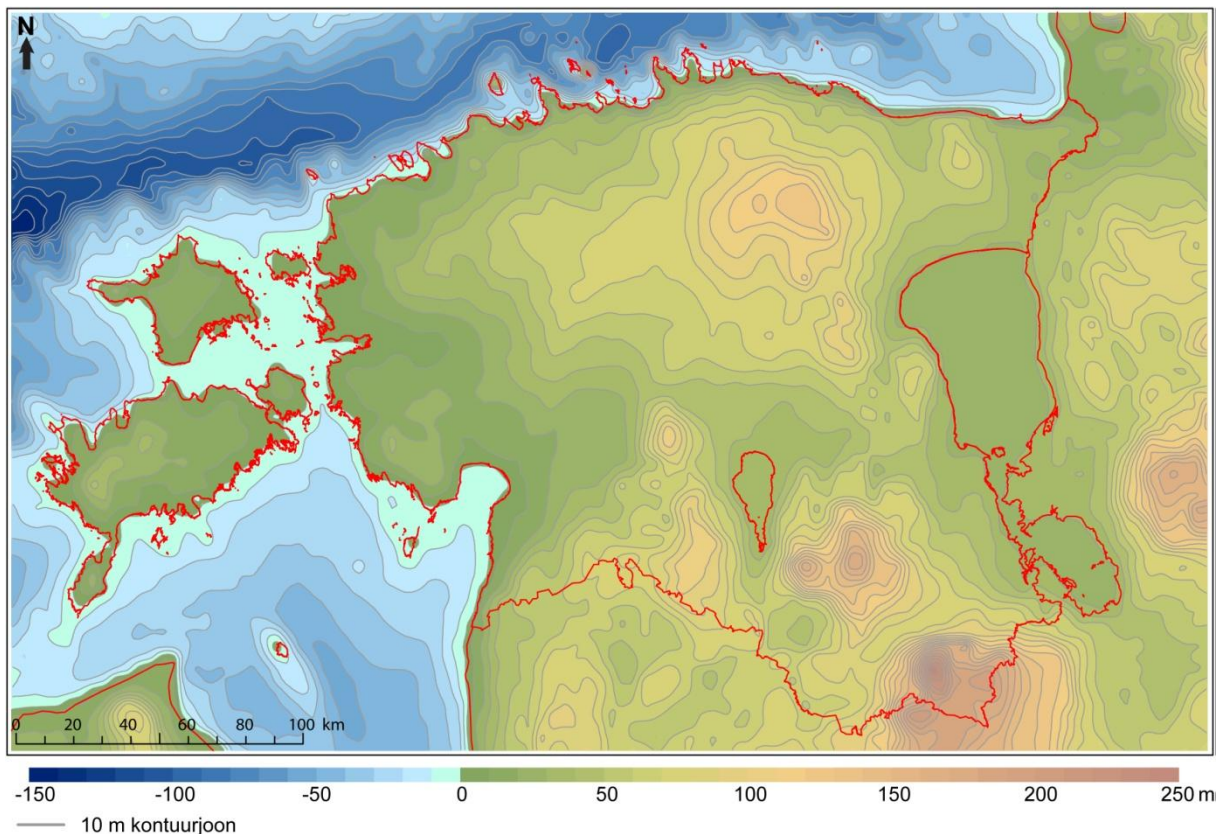
Joonis 6. Töö käik.

3.3. Mudeldatud lasuvuselemendid

3.3.1. Pinnakatte ülemine ja alumine pind

Punktvõre-failidest K1pind_top, K1pind_bot ja K1pind moodustati ülevaate saamiseks ja kontrolliks ArcGIS-ga interpoleeritud ja ekstrapoleeritud pinnad maapinnast, aluspõhja pealispinnast ning pinnakatte paksusest. Selleks kasutati geoinformaatikast tuntud *kriging*-meetodit (Marinoni 2003), sobivad kaardid valiti välja hulga katsetuste tulemusena. Ülemise ja alumise pinna visuaalseks ruumiliseks kontrolliks kasutati ArcScene-i (ESRI 2011) võimalusi.

Pinnakatte kõrgust kirjeldava faili K1pind_top andmete võrdlemisel EHA variandi et_27_1 vastava failiga selgus, et nimetatute vahe maismaal polnud oluline. Seevastu merealal ilmnesid olulised kõrguste erinevused, sest EHA konstrueerimise algusajal polnud võimalik kasutada tänapäeval kättesaadavad täpseid andmeid. Võrreldes Maa-ameti detailsete kõrgusmudelitega on pinnakatte kõrguste fail K1pind_top generaliseeritud, kuid peegeldab õigesti maapinna reljeefi üldist iseloomu.

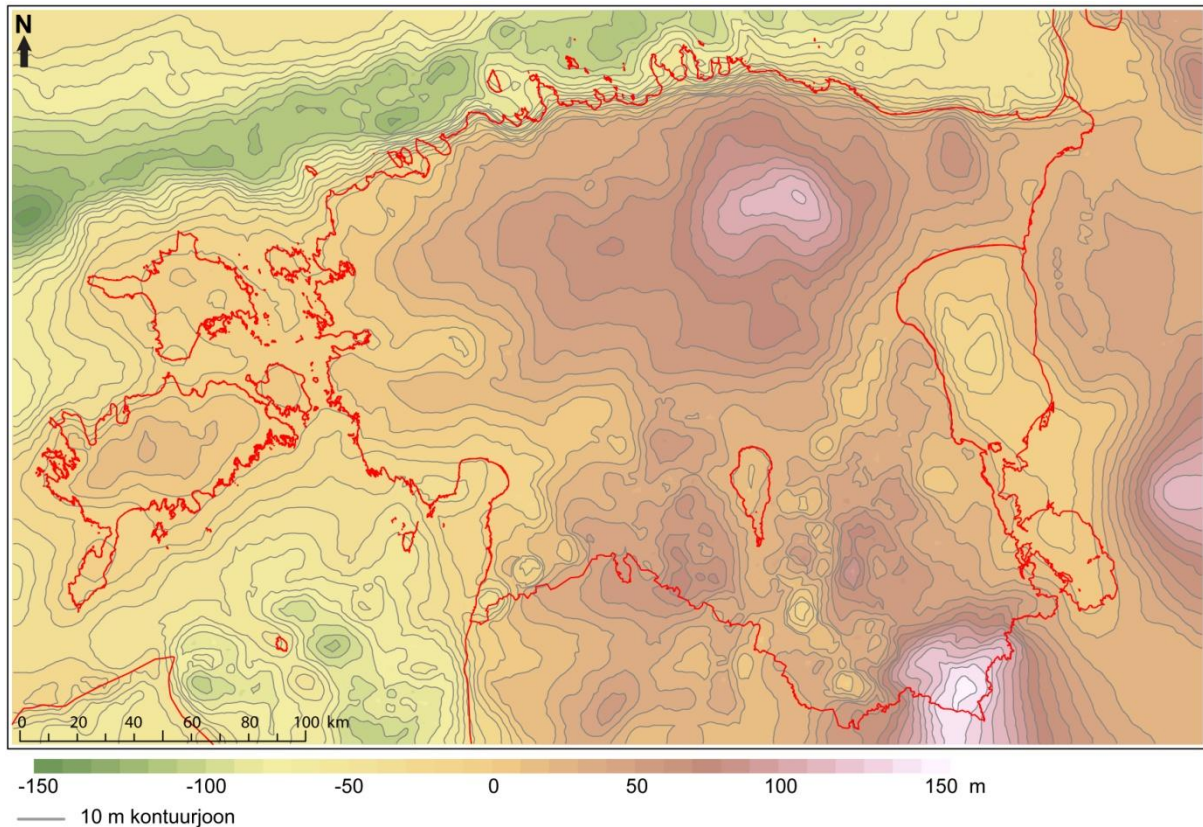


Joonis 7. Interpoleeritud maapinna pealispind.

Fail K1pind_top on täiesti rahuldava täpsusega kasutamaks seda EHA variant et27_1 puhul. Joonisel 7 on esitatatud faili K1pind_top alusel koostatud mudeldamisala 10-meetriste kõrgusvahedega reljeefikaart mis üheskoos näitab nii maapinna kui ka suurveekogude põhja absoluutkõrgusi võrdse küllalt suure täpsusega. Selline digitaalkaart on sobiv üldistavateks teaduslikeks uurimusteks, kuna ArcGis-i vahenditega saab sellele kanda mis tahes reljeefi või geograafiaga seonduva lisainfo kihte.

Teiseks tähtsaks EHA täiustamise komponendiks on pinnakatte alumise pind K1pind_bot. Selle faili alusel genereeriti ArcGIS-i vahenditega 10-meetriste vahedega aluspõhja reljeefi kaart, mis on kujutatud joonisel 8. Kaardil on selgesti näha tänapäeva Soome lahe keskel

voolanud nn Ürg-Neeva org. Samuti on eristatavad Matsalu lahe alune org ja Lõuna-Eestis Mustvee-Valga suunaline vagumus. Reljeefi suurvormidest on näha Peipsi-Pihkva nõgu, Lääne-Eesti tasandik, Harju-Viru lavamaa, Pandivere, Sakala, Otepää ja Haanja kõrgustikud ning Kesk-Saaremaa ja Jõhvi kõrgendik. Kasutatud 4 km · 4 km arvutusvõre tiheduse tõttu pole kogu ulatuses tuvastatavad Põhja-Eesti ürgorud, kuid EHA varianti et27_1 impordituna tõstab fail K1pind_bot hüdrogeoloogilise mudeli adekvaatsust merega seotud probleemide lahendamisel.

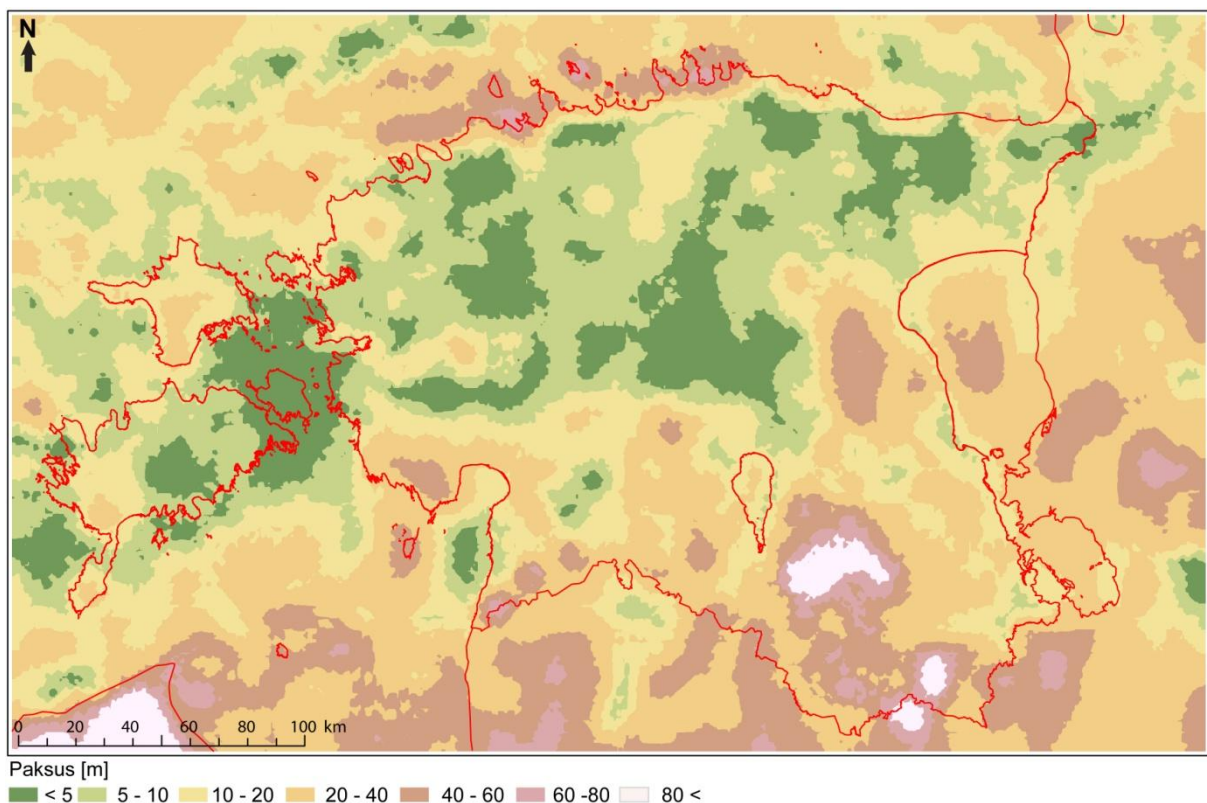


Joonis 8. Interpoleeritud aluspõhja pealispind.

3.3.2. Pinnakatte paksus ja maht

Pinnakatte paksus saadi faili K1pind ülemise ja alumise pinna vahena ning vastav paksusi esindav kaart saadi interpoleerimise ja ekstrapoleerimise meetodil. Kvaternaari kiht on Eestis peamine ehitusalus, ehitusmaterjalide allikas ning muldade emakivimina on selle paksuse tundmine meile tähtis paljude praktiliste probleemide lahendamisel. Saadud pinnakatte paksuste kaardilt on näha aluspõhja mattunud orgude piirkondi ja suundi, kuna reeglina on

seal kõige paksem pinnakatte kiht. Teatava anomaaliaena võib Pärисpea ja Juminda poolsaare juures täheldada suhteliselt paksemat pinnakatte kihti. Samasugune fenomen esineb ka Viimsi ja Pakri poolsaarte vahel. Pinnakate on kõige paksem seal, kus aluspõhja pealispind jääb 60 kuni 90 meetrit allapoole merepinda. Kindlasti on sellises paksuse anomaalias oma osa ka 4 km · 4 km sammuga punktvõrel, mis väiksema tiheduse korral annaks kindlasti täpsema paksuse pinnakihi. Kesk-Eestis ja Pandivere kõrgustikul on valdavalt õhuke pinnakate, lõuna poole liikudes pinnakatte paksus suureneb. Oma osa mängivad siin ka saarkõrgustikud, mis kogusid enda peale pudedaid setteid. Seal küünib pinnakatte paksus kohati üle 100 meetri.



Joonis 9. Interpoleeritud pinnakatte paksus.

Võrdluses K. Kajaku koostatud Eesti pinnakatte paksuste kaardiga (lisa 1) on töö autori saadud pinnakatte paksuse jaotumus üldjoontes sama. Paksuste suuremaid erinevusi on näha Põhja-Eestis aluspõhja ürgorgude piirkonnas, Nõva-Noarootsi piirkonnas, Matsalus, Lääne-Saaremaal ja Ikla-Mõisaküla-Valga vahelisel alal. Erinevuste peamiseks põhjuseks võib pidada pinnakatte paksuste kaardi valmistamise meetodikat. Kui töö autor kasutas selleks mehhanistlikku interpoleerimise *kriging*-meetodit siis K. Kajaku kaart on eriala-spetsialisti poolt välja joonestatud ja tugineb suuresti ka intuitsioonile.

Pinnakatte maht arvutati Eesti arteesiabasseini piires (koos seda ümbritseva Venemaa ja Läti alaga) ning saadi ülemise ja alumise pinna seosena. Pinnakate on väga oluline veerežiimi kujundaja ning selles kihis liikuvad veed võivad reostuse korral kiiresti ja laiaulatuslikult kanda edasi mürgiseid aineid, mis on (elu)ohtlikud nii taimedele, loomadele kui ka inimestele. Seepärast on pinnakatte maht vajalik arvutamaks põhjavee vahetuse aega erinevate hüdrogeoloogiliste üksuste (tabel 3) või rajoonide vahel. Pinnakatte mahud on esitatud EAB kohta rajoneeritud alade kaupa (lisa 2) ning tabelis 1.

Tabel 1. Pinnakatte mahud.

Rajoonid	Pindala (km ²)	Maht (km ³)
EHA maismaa	59600	1224
EHA meri	26416	486
Eesti maismaa	43392	768
Võrtsjärv	272	4
Peipsi järv	2896	77
Pihkva järv	672	17
Läänemeri, Väinameri, Liivi laht	16192	261
Läänemeri, Soome laht	10224	224
EHA Venemaa osa	10016	278
EHA Läti osa	2352	80
EAB Kvaternaari piirkond	64256	1160
Devoni avamus	23664	797
Siluri-Ordoviitsiumi avamus	62352	912

3.4. Eesti hüdrogeoloogilise mudeli täiustamine

3.4.1. Pinnakatte kujundi import ja mudeli kalibreerimine

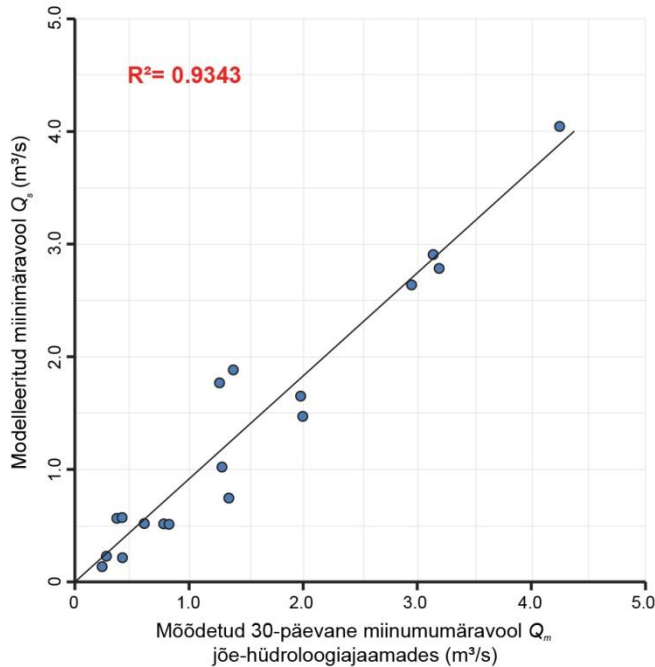
Käesoleva töö peatülesanne on EHA kui EAB kaasaegse ja tõhusa uurimisvahendi täiustamine. Sellega taotletakse mudeli adekvaatsuse parandamist kõikide EAB-ga seonduvate veeprobleemide kompleksel käsitlemisel ja uute võimaluste loomist mudeli edasiseks arendamiseks. Kuna EHA kavatakse lähitulevikus üle viia senisest paindlikumale tarkvarale Visual MODFLOW Flex, siis selle hõlpsamaks juurutamiseks läheb tarvis etteantud täpsusega mudelipindade genereerimise autonoomset süsteemi, mis võib automaatselt arvesse kõik andmebaasi kantud muudatused. Säärase süsteemina võib toimida pinnakatte kujundi mudel K1pind.

Selle mudeliga loodud pinnakatte ülemise ja alumise pinnna punktvõre-failid, vastavalt K1pind_top ning K1pind_bot, imporditi EHA varianti et27_1 Visual MODFLOW Classic-u vahenditega, Nimetatud failide sisestamiseks avati tööväli *Import*, kus aktiveeriti operaator *Import Elevation*, mille abil esmalt fikseeriti käsitletav mudelikiht. Järgnevalt valiti üksikshaaval mudeli uuenduseks loodud punktvõre-failid ja genereeriti vajalikud mudelipinnad. Niimoodi loodud uus EHA variant salvestati nimega et27_1_A.

Variant et27_1_A käivitati ja sellega tehti kõik ettenähtud mudeldamisarvutused kontrollimaks pinnakatte lasuvuselementide korrektsiooni mõju. Selgus, et mudeldatud põhjavee äravool jõevõrku erines jõevõrgu hüdroloogiajaamade jaoks statistiliselt hinnatud sooja perioodi keskmisest 30-päevasest miinimum-äravoolust kohati rohkem kui 20%. Säärase liiga suure kõrvalekalde põhjuseks oli korrektsioonist tingitud pinnakatte absoluutkõrguse muudatused. Visual MODFLOW abil tehtavate arvuste puhul oleneb põhjavee äravoolu intensiivsus suurel määral pinnaveekogude põhja asendist maapinna ja veekogu taseme suhtes. Pindade korrektsiooni käigus see suhe muutus ja tekitas mudeldatud ning mõõdetud äravoolude liiga suure lahknevuse.

Kirjeldatud puuduse kaotamiseks kalibreeriti mudel et27_1_A uuesti miinimum-äravoolu järgi. Selleks varieeriti pinnaveekogude põhja kõrgust 20 jõe-hüdroloogiajaama valgla piirides seni, kuni mudeldatud ja statistiliselt hinnatud äravoolu erinevus valglat sulgevas lävendis polnud suurem kui 20%. Seejuures jälgiti suure-mõõtkavaliste topograafiliste kaartide ja erialakirjanduse järgi (Järvekül 2001), et veekogu põhja korrigeeritud kõrgus

oleks reaalselt võimalik. Paljukordsete kalibreerimisarvutustega saavutati mudeldatud ja statistiliselt hinnatud (mõõdetud) äravoolude korrelatsioonikordaja väärtuseks 0,93 (joonis 10). Selline tulemus näitab, et mudel et27_1_A reprodutseerib praktiliselt adekvaatselt põhjavee miinum-äravoolu kalibreerimisega hõlmatud piirkonnas.



Joonis 10. Miinum-äravoolu kalibreerimisgraafik.

EHA et-seeria mudelid on juba varem detailselt kalibreeritud ka arvutatud ja mõõdetud põhjavee rõhkude järgi (lisa 3). Läbiviidud kontroll näitas, et pinnakatte lasuvuselementide ja pinnaveekogude põhja kõrguste korrigeerimine pole oluliselt mõjutanud põhjavee mudeldatud ja mõõdetud rõhkude vahelise korrelatiivse seose tihedust. Kuna mudel et27_1_A on hästi kalibreeritud korraka kahe kriteeriumi – põhjavee äravoolu ja rõhkude järgi – siis võib seda pidada väga usaldusväärseks EAB veeprobleemide uurimise instrumendiks.

3.4.2. Põhjavee äravoolu mudel ja detailne veebilanss

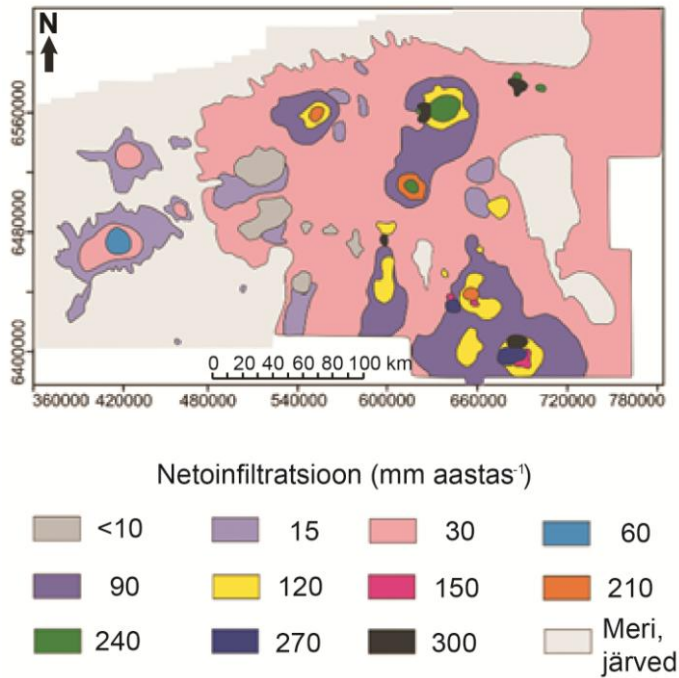
Käesoleva tööga loodud hüdrogeoloogilist mudelit et27_1_A võib käsitleda ka kui EAB piirides kujunenud põhjavee äravoolu mudelit. Kuna Eesti tingimustes üldiselt kujuneb jõevõrgus kuival ajal esinev miinum-äravool praktiliselt vaid põhjaveest, siis põhjavee äravoolu mudel on ühtlasi ka pinnavee miinum-äravoolu mudeliks. Visual MODFLOW

River-mooduli käivitamisega võib et27_1_A abil arvutada põhjavee äravoolu kõikidesse punktidesse, mis EHA mudeldamisalal on defineeritud kui pinnaveekogud. Viimaste hulka kuuluvad rakendatud mudeldamise kontseptsiooni alusel nii pinnavee-juhtmed (jõevõrk) kui ka suurjärved ja meri. EHA mittestatsionaarse (ajast sõltuva) arvutusrežiimi sisselülitamisega saab määrata põhjavee sesoonse äravoolu dünaamika infiltratsiooni (sademete maapõue imbumise) ja aurumise muutumisest sõltuva protsessina. Säärane küllalt usaldusväärne mudel võib anda olulise panuse Eesti veekeskkonna probleemide holistilisse lahendamisse, sidudes kliimaelemendid funktsionaalselt geofiltratsiooni ja –migratsiooniga. Kujukalt ilmneb see detailsete veebilansside koostamisel, mille aluseks on võrrand

$$I = R + P + M \pm V \pm S,$$

kus I on netoinfiltratsioon (koguinfiltratsioon miinus aurumine põhjavee pinnalt), R on põhjavee äravool jõevõrku, P on põhjavee väljapumpamine maapõuest, M on põhjavee otseäravool mere, V on EAB ja naaberpiirkondade põhjaveevahetus ning S on nn akumulatsiooniliige.

Teatavasti on netoinfiltratsiooni I otsene mõõtmine lüsiimeetritega väga kallis ja töömahukas. Seepärast kasutatakse seda meetodit üldiselt vaid üksikute väikeste, kuid veevahetuse seisukohalt väga oluliste piirkondade uurimiseks. Empiiriliste valemite alusel saab I väärtust hinnata küll ka ulatuslikel aladel, ent enamasti pole tulemused küllalt veenvad. Ometi saab I määrata esitatud võrrandist, kuna selle parema poole liikmed R , P , M ja V on otseselt arvutatavad EAB jaoks mudeliga et27_1_A. Viimase väljunditele tuginedes koostati joonisel 11 näidatud I pindalalise jaotumuse kaart (Vallner, Porman, in press).



Joonis 11. Netoinfiltratsiooni pindalalise jaotmise kaart.

Mudeli et27_1_A abil koostati tabelis 2 esitatud EAB detailne veebilanss kõikide peamiste hüdrogeoloogiliste üksuste jaoks nende omavahelises seostatuses (Vallner, Porman, in press). Muu hulgas ilmneb sellest bilansist selgesti pinnakatte kui kõige olulisema bilansiüksuse osakaal.

Tabel 2. EAB põhjaveevoolud looduslikes tingimustes ($10^3 \cdot \text{m}^3/\text{ööp.}$).

Hüdro- geoloogiline üksus	Sissevool (Q_{in})			Väljavool (Q_{out})			Vee- vahetus ^a
	Küljelt	Ülalt	Alt	Küljelt	Üles	Alla	
Q	4.1	6809.1 ^b	4345.8	15.2	6255.6 ^c 762.1 ^d	4888.2	11159
D ₃	3.1	194.2	<0.1 ^e	16.6	<0.1	180.6	197.2
D ₃₋₂	77.2	2562.1	0.2	464.2	1943.4	231.9	2639.5
D ₂ Nr	20.9	374.6	251.5	1.8	364.3	281	647.1
D ₂₋₁	48.5	281.7	101	22.5	330.4	78.3	431.2
S-O	100	2592.9	234.5	74.6	2679.3	173.5	2927.4
S-O _r	0.1	90	33.1	0.1	38.3	84.9	123.3
O-Cm	15.5	84.9	12.8	25.9	64.8	22.5	113.2
Cm _r	<0.1	21.7	12.1	0.2	12.4	21.2	33.8
Vr	9	20.1	12.8	2.6	24.8	14.5	41.9
Kt	0.3	8.9	7.4	0.3	7.3	8.9	16.5
Gd	15.2	15.5	3.9	6.3	25.2	3.1	34.6
PR	1.5	3.8	0	0.1	5.2	0	5.3

^a Sissevool hüdrogeoloogilisse üksusse või väljavool sellest ($Q_{in} = Q_{out}$).

^b Netoinfiltratsioon.

^c Äravool jõevõrku või järvedesse.

^d Otseäravool merre.

^e Vooluhulgad alla $100 \text{ m}^3/\text{ööp.}$ pole summeerimisel arvesse võetud.

Tabelites 1 ja 2 alusel arvatud veevahetuse kestvused hüdrogeoloogilistes üksustes (Vallner, Porman, in press) on toodud tabelis 3.

Tabel 3. Põhjavee hulgad ja veevahetuse parameetrid. Arvud veergudes joondada vertikaalselt suurusjärkude järgi.

Hüdro-geoloogiline üksus	Maht (km ³)	Efektiivne poorsus	Põhjavee hulk A (km ³)	Aastane veevahetus E (km ³ /a)	Täieliku veevahetuse kestvus $T = A/E$ (aastad)
Q	1163	0.3	349.0	4.073	86
D ₃	15	0.03	0.4	0.072	6
D ₃₋₂	1633	0.15	244.9	0.963	254
D ₂ Nr	1347	0.01	13.5	0.236	57
D ₂₋₁	1331	0.15	199.7	0.157	1269
S-O	4366	0.03	131.0	1.069	123
S-O _r	10658	0.01	106.6	0.045	2368
O-Cm	4371	0.05	218.5	0.041	5289
Cm _r	1598	0.01	16.0	0.012	1295
Vr	740	0.15	111.0	0.015	7259
Kt	414	0.15	62.2	0.006	10323
Gd	1751	0.15	262.6	0.013	20792
PR	7157	0.01	71.6	0.002	36994
Kokku	36543		1786.9		

4. Arutelu ja järeldused

Käesoleva töö tulemused näitasid, et loodud pinnakatte digitaalne andmebaas ja pinnakatte kujundi arvutimudel on piisava täpsusega komponent, et rekonstrueerida EHA pinnakattekiht. Samuti saab geoandmebaasi põhjal terve Eesti arteesiabasseini või valitud piirkondade ulatuses erinevate geoloogia probleemide lahendamiseks ja uurimiseks moodustada pindu pinnakatte ja aluspõhja pealispindade kohta, arvutada ja visualiseerida pinnakatte paksust ning hüdrogeoloogia jaoks vajalikke pinnakatte mahtusid.

Uuendatud pindadega EHA varianti et27_1_A saab edukalt kasutada EAB piirides kujunenud põhjavee äravoolu mudelina, kui ka pinnavee miinimum-äravoolu mudelina, kuna kuival ajal esineb miinimum-äravool praktiliselt põhjaveest.

Üheks antud töö tulemuste täpsuse puudujäägiks võib kindlasti pidada mõningate aluspõhja piirkondade pealispinna kõrguste andmepunktide ebapiisavat esinemistihedust (Väinameri, Pärnu laht, Muhu ja Kihnu vaheline ala, Läänemere põhjabassein) või piiratud ligipääsu nagu näiteks Hiiumaast läände jääv Läänemere osa. Sealsete alade aluspõhja pealispinna kõrgusandmete ja pinnakatte paksuse täpsus ei ole kindlasti nii hea kui Mandri-Eesti või Põhja-Eesti akvatooriumi aladel.

Teiseks nõrgaks punktiks loodud pinnakatte kujundi digimudeli juures võib pidada kasutatud arvutusvõre (võresamm $4 \text{ km} \cdot 4 \text{ km}$) sammu suurust, mis pindade interpoleerimise käigus teatud pinnavorme (eriti aluspõhja mattunud orud) ei pruugi korrektselt või mitte üldse välja joonistada. Kasutatav võresamm oli tingitud et-seeria mudeli $4 \text{ km} \cdot 4 \text{ km}$ võre struktuurist mille põhjal pinnad ehitati ja hiljem mudelisse imporditi.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et loodud failid K1pind_top ja K1pind_bot on täiesti rahuldava täpsusega kasutamaks seda EHA variant et27_1 tehtavate arvutuste puhul. Uuendatud EHA mudel on heaks vahendiks uurimaks ja lahendamaks Eesti veekeskkonna probleeme nii teaduslikust kui ka rakenduslikust aspektist ning õppevahendiks õpilastele veega seotud erialadel.

EHA täpsuse parandamiseks on kavas mudel importida uuemasse Visual MODFLOW Flex 2014.2 versiooni, et koostada veelgi täpsemat pinnakatet ja teisi hüdrogeoloogilisi üksusi imiteerivat irregulaarse võresammuga mudelit (rõhutades reljeefseid alasid – aluspõhja orud, mis on olulised (joogi)veehaarded ning mis võimaldab teha täpsemaid arvutusi väljakiilduvate

hüdrogeoloogiliste kihtide kohta. Visual MODFLOW Flex 2014.2 versioonis on võimalik EHA mudel ühildada hüdroloogilise mudeli MIKE SHEga mudeli pinnavee modelleerimise täpsuse tõstmiseks. Lõpliku sammuna on eesmärgiks EHA mudeli arendamine integreeritud Eesti hüdroosfääri kompleksmudeliks.

Kokkuvõte

Käesoleva tööga loodi esmakordselt iseseisev Eesti arteesiabasseini (EAB) pinnakatte kujundi arvutimudel K1pind.shp koos seda toetava digitaalse andmebaasiga K1pinnakate. Viimast võib pidada EAB kõige täiuslikumaks, nii mereala kui ka maismaad hõlmavaks pinnakatte digitaalseks andmebaasiks. Mudeliga saab automatiseeritult genereerida etteantud tihedusega SHP-punktvõre faile, mis kirjeldavad pinnakatte ülemist ja alumist pinda. Pinnakatte ülemine digitaliseeritud pind ühtub mudeldamisala maismaal maapinnaga. Mudeli pinnaveekogudena eristatud piirkondades langeb pinnakatte ülemine pind kokku jõevõrgu, järvede või mere põhjaga. Pinnakatte alumine pind on samastatav kõvade aluspõhjakiivimite pealispinnaga. Pinnakatte alumise ja ülemise kihi vahele jääv ruum on võrdne pinnakatte paksusega.

Pinnakatte kujundi määramiseks läks tarvis punktandmeid pinnakatte ülemise ja alumise pinna kõrguste kohta. Neid otsiti ja koguti kõikidest teadaolevatest allikatest. Uuriti teaduslikke publikatsioone, fondide ja arhiivide käsikirjalisi aruandeid ja kaarte ning kättesaadavaid digitaliseeritud andmebaase. Kasutati mahukaid andmekogusid, mida haldasid Maa-amet, Keskkonnaagentuur, Veeteede amet ja Eesti Geoloogiakeskus. Enamik nendes asutustes säilitatavatest andmetest olid arhiveeritud punktide kaupa tabelites, kuid palju informatsiooni saadi ka kaartidelt, kihtide vertikaalsetelt läbilõigetelt ning juba koostatud pinnafailidest. Peale nimetatute kasutati L. Vallneri poolt 2002. a. konstrueeritud Eesti hüdrogeoloogilise arvutimudeli (EHA) varasemaid andmeid.

Olemasoleva informatsiooni töötlemist alustati andmete representatiivsuse hindamise, sortimise ja nendest SHP-failide moodustamisega, mis imporditi PostgreSQL-andmebaasi. Andmetöötluse peamiseks vahendiks oli ArcGIS koos *spatial join*-ruumipäringutega. Nende abil liidendati funktsionaalselt EHA, käesoleva töö käigus loodud uus pinnakatte digitaalne andmebaas ja mudeldamisala pinnakatte kujundi lasuvuselemente genereeriv punktvõre SHP-failide süsteem.

Mudeliga K1pind.shp genereeritud pinnakatte ülemine ja alumine pind on kooskõlas teiste uurijate poolt määratud vastavate kõrgustega kasutatud ruutvõre punktides. Ruutvõre regionaalse või lokaalse tihendamise või mitte-nelinurksete arvutusvõrede kasutamisega on saavutatav mõõdetud ja mudeliga arvatud kõrguste praktiline ühtivus. Pinnakatte kujundi loodud digitaalmudel laseb hõlpsasti arvutada pinnakatte mahtusid. Käesolevas töös on

esmakordselt suurima võimaliku täpsusega määratud pinnakatte maht eraldi EHA ja EAB merealal ning maismaal, diferentseerituna maastikuelementide ja aluspõhja avamuste vahel. Pinnakatte mudeliga genereeritud digitaalkaardid on sobivad üldistavateks teaduslikeks uurimusteks, kuna ArcGis-i vahenditega saab neile kanda mis tahes muu, asukohaga seonduvat informatsiooni.

Mudeliga K1pind.shp genereeritud pinnakatte ülemise ja alumise pinna punktvõre-failide importimisega EHA varianti et27_1 loodi uus, pinnakatte osas adekvaatsem regionaalne hüdrogeoloogiline mudel et27_1_A. Sellega saab täpsemalt uurida kliimaelementide ja geofiltratsiooni vahelisi seoseid ning konstrueerida EAB pinnavee miinimum-äravoolu arvutimudel. Nende võimaluste alusel koostati EAB detailne filtratsioonibilanss ja määrati vaba vee hulk, aastane veevahetus ja täieliku veevahetuse kestvus EAB iga peamise hüdrogeoloogilise üksuse jaoks.

Digital model of the shape of the Quaternary cover of the Estonian Artesian Basin

Andreas Porman

Summary

Objective of this paper was to create a digital model of the shape of the Quaternary cover. Database includes both sea and land as a whole. Quaternary deposits of the Hydrogeological model of Estonia (HME) were upgraded by the digital surface geometry model created. The new, improved and calibrated model enables to examine in greater detail relationships between groundwater and surface water and to create a minimum surface runoff (base-flow) computer model.

To determine the geometry of the Quaternary cover, elevation data of the upper surface and the lower bedrock surface is needed. Bedrock surface is considered to be substantially indential to the bottom of the ground surface because bedrock's surface and surface cover bottom follow each other in extent of the area under consideration. Data for the research was searched and collected from all available sources such as survey reports, maps and manuscripts of different archives and from digitized geodatabases. Most of the data were text files in XYZ-format, in Excel workbook tables or as ArcGIS geodatabase but a lot of information was also obtained from charts, the vertical cross-sections of the layers and already constructed surfaces. Some of the data from HME earlier versions were also used.

The creation process of the digital database of the geometry of the Quaternary cover started by preparation and processing the data collected. The data was imported into ArcGIS shapefile format and was then imported using PostGIS extension into PostgreSQL database for further processing. In PostgreSQL database, ground surface and bedrock surface data were merged into single database K1pinnakate.

To create the digital model of the geometry of the Quaternary cover, the first model layer of the HME was exported and imported in ArcGIS. Based on the imported model layer, a point file was generated and around each point was built a 4 km · 4 km grid which was used for further work. The same 4 km · 4 km grid was then imported in PostgreSQL K1pinnakate database. There it was used to determine the average absolute height of ground and bedrock

surface for each grid centroid. To that end, a series of special spatial join queries were formed to give height values to each square of the 4 km · 4 km grid of which two separate files were created: upper surface and bedrock surface layer. Final step in the process was to re-export created layers into ArcGIS where the thickness of the Quaternary cover was calculated by subtracting bedrock surface height from ground cover surface.

The main task of this paper is to upgrade HME into a more effective investigative tool. To achieve this, upper surface and lower bedrock surface files were imported into HME version et27_1 using the means of Visual MODFLOW Classic and was saved as a version et27_1_A. Model startup showed that in some places the modeled groundwater runoff into hydrological network differed of the measured runoff more than 20%. The difference was caused due to the correction of Quaternary deposits in the HME.

To remove the inconsistency between modeled and measured values, a new series of the HME calibrations was conducted. To this end the riverbed thickness and the river stage were adjusted in 20 catchment areas that ended with river gauging stations. Calibrations were continued until difference between modeled and measured data were less than 20% and correlation coefficient exceeded 0.9.

In conclusion the upgraded HME model version et27_1_A reproduces adequate minimum groundwater runoff in river gauging stations that were used in calibration. HME can be successfully used as a tool for modelling groundwater movement and base flow in the boundaries of Estonian Artesian Basin.

Tänuavaldused

Autor tänab kõiki, kelle abiga käesolev töö valmis. Eriti tänab autor oma juhendajaid, kes olid töö valmimise juures suureks abiks, samuti saadud materjalide eest Vilniuse Ülikooli Hüdrogeoloogia ja rakendusgeoloogia instituudi professor Robert Mokrikut ja Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia instituudi erakorralist teadurit Rein Vaherit. Antud töö valmis ETF grant 8948 toetusel.

Kasutatud kirjandus

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

Bruin de, E. F. L. M., Vliegenthart F. J. L., Shipper P., Pallo T., Antons P., Botterweg, T., Reincke K. J., Boomen van den R., Kotta J., Vassiljev A., Perens R., Vallner L., Kivinukk A. 2006. Harju sub-river basin district water management plan. Amsterdam, Tallinn, Ministry of Environment of the Republic of Estonia, Grontmij Nederland bv, ELLE (Estonian, Latvian & Lithuanian Environment), ECORYS Research and Consulting, Witteveen+Bos, The Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe.

Fetter, C. W. Jr. 2014. Applied Hydrogeology, Fourth Edition. Pearson New International Edition, Harlow.

Gavrilova O., Vilu R., Vallner L. 2010. A life cycle environmental impact assessment of oil shale produced and consumed in Estonia. Resources, Conservation and Recycling, 55, 232–245.

Gomez, S., Xu, S. 2013. Glatsiaalsete pinnavormide eristamine Kirde_Estis LiDARi andmestiku abil. Rmt.: Verš E., Nemliher R., Amon-Veskimeister L., Truuver K., Ehrlich K. (toim.) Aeg. Schola Geologica IX. Eesti Looduseuurijate Selts, Tartu, lk 41-45.

Järvekülg A., 2001. Eesti Jõed. Tartu Ülikooli kirjastus, Tartu.

Kajak, K., 1999. Eesti kvaternaari setted, Seletuskiri. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.

Kalm, V., 2012. Ice-flow pattern and extent of the last Scandinavian ice sheet southeast of the Baltic Sea. Quaternary Science Reviews, Elsevier, 44, 51-59.

Malkov, B., Kiipli, T., Rennel, G., Tammik, P., Dulin, J., 1986. Balti mere Eesti NSV territooriumiga piirneva shelfiala regionaalne geoloogilis-geofüüsikaline uurimine mõõtkavas 1:200 000 1984.-1985.a. Eesti NSV Geoloogia Valitsus, Tallinn.

Mamedov, E., Polonskaja, J., 1968. Aruanne Riia Elekrouuringulise Rühma nr D-8-3/7/67 töödest Riia lahe akvatooriumis. Aruanne.

- Marandi A., Vallner L. 2010. Upconing of saline water from the crystalline basement into the Cambrian-Vendian aquifer system on the Koplü Peninsula, northern Estonia. *Estonian Journal of Earth's Sciences*, 59, 4, 277–287.
- Marinoni, O., 2003. Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach. *Engineering Geology*, Elsevier, 69, 37-45.
- Miidel, A., Noormets, R., Hang, T., Floden, T., Bjerkeus, M., 2009, Bedrock geology and topography of the Lake Peipsi depression, eastern Estonia. *GFF*. Taylor and Francis, England, 133, 15-22.
- Miidel, A., Raukas, A., Tavast, E., Vahe, R., 2006, Influence of the bedrock topography on oil shale mining in North-East Estonia. *Oil Shale*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 23, 4, 313-327.
- Mokrik, R. 2003. Baltijos baseino paleohidrogeologija. Vilniaus universitatas. Vilnius.
- Mokrik, R., 1997, The Palaeohydrology of the Baltic Basin. Vendian & Cambrian. Tartu University Press, Tartu.
- Perens, R., Vallner, L. 1997. Water-bearing formation. In: Raukas, A., Teedumäe, A., (eds.). *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 137–145.
- Porman, A., Vallner, L. 2014. Regional groundwater model of Estonia and its hydrological developments. *Ettekanne*.
- Petersell, V., Talpas, A., Zhukov, S., Tammik, P., Fokin, A., 1992. Rahvusvahelise koostöö raames koostatud Balti mere geoloogilis-geofüüsikaliste uuringute vahearuanne. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn.
- Rattas, M., 2007. Spatial distribution and morphological aspects of eskers and bedrock valleys in North Estonia: Implications for the reconstruction of a subglacial drainage system under the late Weichselian Baltic ice stream. *Geological Survey of Finland, Special Paper*, 46, 63-68.
- Raukas, A., Karhima, A., 2007. Ice shaped landscapes in Estonia and Southern Finland. *MTÜ GeoGuide Baltoscandia*, Tallinn.

Raukas, A., Tavast, E., Vaher, R., 2007. Vasavere ancient valley , its morphology, genesis and importance in the economy of North-East Estonia. *Baltica*, Vilnius, 20, 13-18.

Raukas, A., Kajak, K. 1997. Quaternary cover. In: Raukas, A., Teedumäe, A., (eds.). *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 125–136.

Raukas, A., 1995. *Eesti. Loodus*. Valgus, Tallinn.

Raukas, A., Hyvärinen, H., 1991. *Geology of the Gulf of Finland*. Estonian Academy of Sciences, Tallinn.

Sørli J.-E., Bityukova L., Sæther O.-M., Rudolph-Lund K., Kahru A., Vallner L., Petersell V., Razgonjajev A., Põllumaa L. 2004. *Estonia, the oil shale industry. Risk based environmental site assessment of landfills*. Oslo, Norwegian Geotechnical Institute.

Talpas, A., Kivisilla, J., Kõrvel, V., Mardla, A., Petersell, V., Popova, L., Rennel, G., Skitiba, A., Tammik, P., Fokin, A., 1989, Soome lahe regionaalne geoloogilis-geofüüsikaline uuring M 1:200 000 kaardilehtedel O-35-II (idaosa), O-35-III 1986.-1989.a. *Eesti Geoloogia*, Tallinn.

Talpas, A., Kask, J., Väling, P., Mardla, A., Sakson, M., Genno, 1994, Balti mere shelfiala geoloogiline kaardistamine lehtedel O-34-VI, O-34-XII, O-35-I,II. *Eesti Geoloogiakeskus*, Tallinn.

Tavast, E. 1997, Bedrock topography. In: Raukas, A., Teedumäe, A., (eds.). *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 252–255.

Tšeban, E., 1975, *Eesti NSV põhjavesi ja selle kasutamine*. Valgus, Tallinn.

Vaher, R., Miidel, A., Raukas, A., Tavast, E., 2010. Ancient buried valleys in the city of Tallinn and adjacent area. *Estonian Journal of Earth Sciences*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 59, 1, 37-48.

Vallner L. 2013. Aeg hüdrogeoloogiliste protsesside mõjurina ja selle arvestamine. Rmt.: Verš E., Nemliher R., Amon-Veskimeister L., Truuver K., Ehrlich K. (toim.) *Aeg. Schola Geologica IX*. Eesti Looduseuurijate Selts, Tartu, lk 25–37.

Vallner, L. 2011. Punktrestostuse mõju mudelid. Projekti lõpukoolituse ja lõpuseminari materjalid. Jätkusuutlik põhjaveeseire süsteem Ida-Viru maakonnas. Tartu, Keskkonnaministeerium, Tartu Ülikool, Tallinna Tehnikaülikool, Eesti Geoloogiakeskus, 48–60.

Vallner L. 2003. Hydrogeological model of Estonia and its applications. *Proc. Estonian Acad. Sci. Geol.* 52, 3, 179–192.

- Vallner L. 2002. Eesti hüdrogeoloogiline mudel. Tallinn, Eesti Geoloogiakeskus.
- Vallner, L. 1997. Groundwater flow. In: Raukas, A., Teedumäe, A., (eds.). *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Estonian Academy Publishers, Tallinn, 137–152.
- Vallner, L. 1996a. Groundwater. In: Raukas, A., (ed.). *Estonian Environment. Past, Present and Future*. Ministry of the Environment of Estonia, Tallinn, 60–71.
- Vallner, L. 1996b. Hydrogeological modelling of mine dewatering in the karstified Pandivere Upland, Estonia. *Proc. Estonian Acad. Sci. Geol.*, 45, 2, 53–67.
- Vallner, L. 1996c. Kirde-Eesti hüdrogeoloogiline mudel. Eesti Geoloogiakeskus, Tallinn
- Vallner, L., Gavrilova, O., Vilu, R. 2015. Environmental risks and problems of the optimal management of the oil shale semi-coke and ash landfill in Kohtla-Järve, Estonia. *Science of the Total Environment*, 524–525 (2015), 400–415.
- Vallner, L., Porman, A (in press). Groundwater flow and transport model of the Estonian Artesian Basin and its hydrological developments. *Hydrology Research*.
- Virbulis, J., Bethers, U., Saks, T., Sennikovs, J., Timuhins, T., 2013. Hydrogeological model of the Baltic Artesina Basin. *Hydrogeology Journal*. Springer.
- Йодкажис В. И. (ред.) 1989. Регионал'ная гидрогеология Прибалтики. Mokslas, Vilnius.
- Таваст, Е., Раукас, А., 1982. Релеф коренных пород Естони. Valgus, Tallinn.

Interneti allikad

G@PS 2015 Groundwater and global palaeoclimatic signals. International scientific project (G@PS) supported by UNESCO IGCP and INQUA TERPRO Committee: <http://www.gw-gps.com/>

Viimati vaadatud: 17.05.2015

Geoloogilised andmed: <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Geoloogilised-andmed/Geoloogiline-baaskaart-p39.html>

Viimati vaadatud: 04.02.2014

Eesti territoriaalmere sügavusandmed:

<http://195.80.112.238:8080/HIS/Avalik?REQUEST=Main>

Viimati vaadatud: 15.01.2014

ESRI 2011. ArcGIS Tutorila Center:

http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/What_is_ArcGIS/00v200000007000000/

Viimati vaadatud: 20.05.2015

Kõrgusandmed – LIDAR kõrguspunktid: <http://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Naidisandmed-p428.html>

Viimati vaadatud: 30.01.2014

Läänemere sügavusandmed: <http://data.bshc.pro/#2/59.4/22.3>

Viimati vaadatud: 20.01.2014

NASA maailma digitaalne kõrgusmudel:

<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>

Viimati vaadatud: 08.09.2014

Pinnakatte paksuse kaart: <http://www.ut.ee/BGGM/eestigeol/index.html>

Viimati vaadatud 24.04.2014

Puurkaevude andmed: <http://register.keskkonnainfo.ee/>

Viimati vaadatud: 25.01.2014

Schlumberger 2015a. Visual MODFLOW 2011.1 User's Manual. Schlumberger Water Services, Kitchener, On, Canada. Online:

http://trials.swstechnology.com/software/Visual_MODFLOW/2011/Manuals_and_Guides/VMOD-2011.1_Manual.pdf

Viimati vaadatud 15.03.15

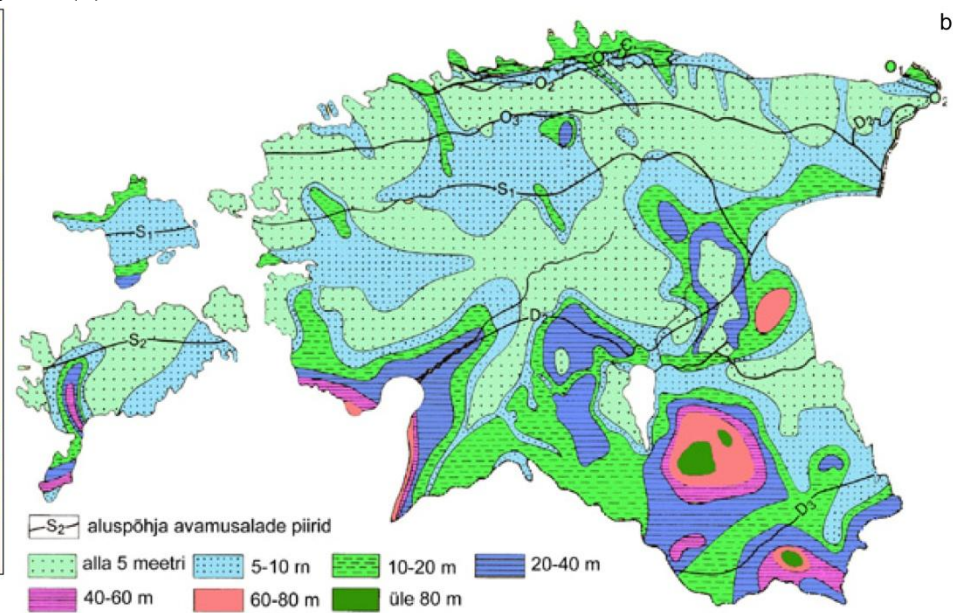
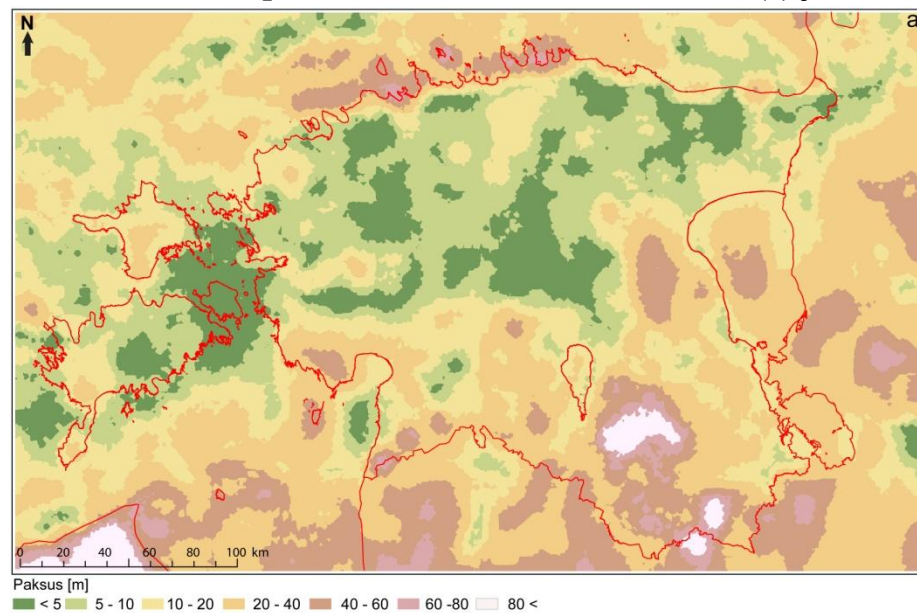
Schlumberger 2015b. Visual MODFLOW Flex. Schlumberger Water Services, Kitchener.

Online: http://trials.swstechnology.com/software/Visual_MODFLOW/Flex

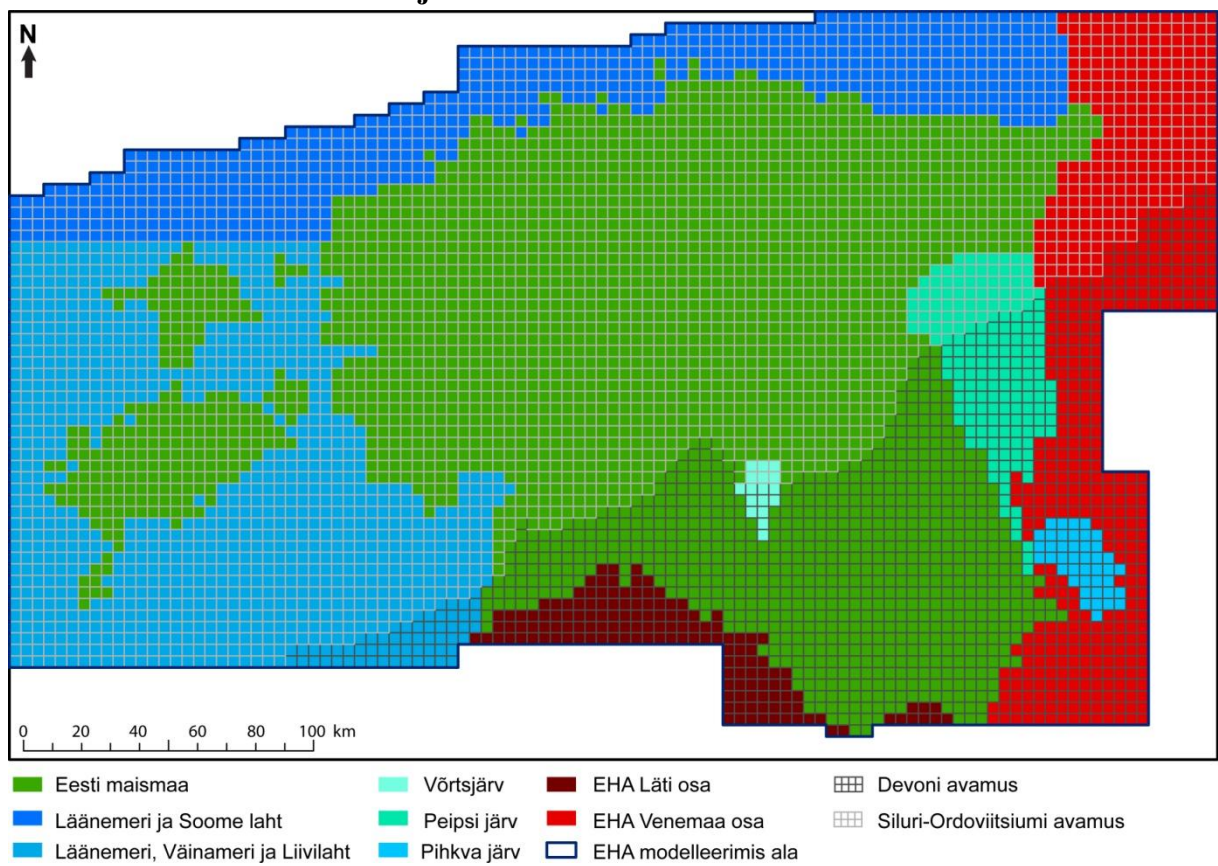
Viimati vaadatud 15.03.15

Lisad

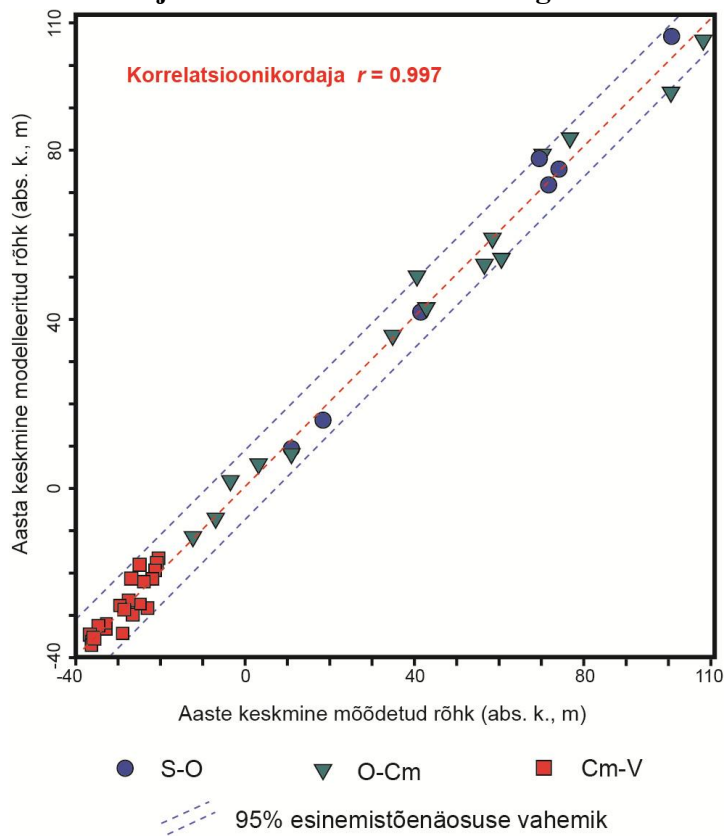
Lisa 1. Pinnakatte paksuse kaartide võrdlus töö autori (a) ja K. Kajaku (b) vahel.



Lisa 2. Pinnakatte mahtude rajoonid mudelis.



Lisa 3. Põhjaveerõhkude kalibreerimisgraafik.



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, _____ Andreas Porman _____,
(*autori nimi*)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose _____

_____ Eesti arteesiabasseini pinnakatte kujundi arvutimudel _____
_____,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on _____ Leo Vallner, Raivo Aunap & Rein Vaikmäe _____,
(*juhendaja nimi*)

- 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, **25.05.2015**