

Tartu Ülikool
Geograafia instituut

**AUTOMAATNE VALGLATE JA VOOLUVEEKOGUDE LEIDMINE
SAAREMAA JA MUHU DEM MUDELILT**

Magistritöö geoinformaatikas

Tambet Kikas

Juhendaja: Tõnu Oja

Tartu 2005

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS	3
2. ANDMESTIK JA METOODIKA	5
2.1 Kõrgusmudel	5
2.1.1 Kõrgusmudeli olemus, vead	6
2.1.2 Tehnikad	7
2.1.3 Tehnika valik	9
2.1.3.1 Lähima väärtusega interpoleerimine	9
2.1.3.2 Kriging	13
2.1.3.3 Semivariogramm	16
2.2 Reljeefiandmed	17
2.2.1 Interpoleerimine	19
2.2.1.1 Ettevalmistav osa	19
2.2.1.2 Tööpiirkondade valik	22
2.2.1.3 Interpoleerimisparameetrite valik	24
2.3 Automaatne valglate ja vooluvete leidmine DEM´ist	25
2.3.1 DEM´i käsitlemise vanem, kaheksa voolusuuna ideoloogia	28
2.3.2 DEM´i käsitlemise uuem, kaldenurgal põhinev ideoloogia	32
2.4 MapInfo töövahend StreamBuilder	36
3. TULEMUSED JA ARUTELU	39
3.1 Natural Neighbour interpoleerimistulemuste võrdlus	39
3.2 Kriging interpoleerimistulemuste võrdlus	40
3.3 Natural Neighbour ja Kriging tehnikaga interpoleeritud mudelite võrdlus	41
3.4 Sobivaima interpoleerimislahendi leidmine, DEM´ide täitmine	45
3.5 Automaatselt leitavate vooluveekogude sobitamine tegeliku vetevõrguga	50
3.5.1 Vooluveekogude sobitamine tegeliku vetevõrguga, rasterlahendus	52
3.5.2 Vooluveekogude sobitamine tegeliku vetevõrguga, raster-vektorlahendus	54
3.6 Automaatne valglate leidmine	56
3.6.1 Hierarhilise valglate süsteemi koostamine	59
3.6.1.1 Valglate leidmine aukudega DEM´ist	59
3.6.1.2 Valglate leidmine aukudeta DEM´ist	60
4. KOKKUVÕTE	62
5. SUMMARY	65
KASUTATUD KIRJANDUS	68

1. SISSEJUHATUS

Reljeefist on mõjutatud pea kõik olulisemad maastikul esinevad nähtused: muldade levik, taimkate, maakasutus, alade põllumajanduslik kasutus, liikide elupaikade paiknemine, vetevõrgustik jne. Lisaks on topograafilised karakteristikud, eriti maapinna kalle, kesksel kohal valglate dünaamika analüüsimisel, erosioonimudelite rakendamisel ja aladel mingi tegevuse sobivuse hindamisel. Kõrgusmudeli abil tehtavad analüüsid on eriti olulised keskkonnaküsimuste ja planeeringute puhul. Seetõttu võib kõrgusmudelit pidada geoinfosüsteemi optimaalse rakendamise üheks eelduseks.

Kõrgusmudeleid saab koostada mitmel viisil ja selleks võib kasutada erinevaid lähteandmete allikaid. Levinumad lähteandmete allikad on paberkaartide kõrgusinfo, aero- ja ortofotod, satelliitpildid, lennukitelt tehtavad mõõdistused kasutades radar- ja lidartechnoloogiat, välitööde käigus tehtavad mõõdistused.

Kõige enam kasutatakse tänaseni kõrgusmudeli koostamiseks paberkaartide samakõrgusjooni. Kaardid skaneeritakse, transformeeritakse sobivasse projektsiooni, kõrgusjooned digitaliseeritakse ja interpoleeritakse. Praktikas on selline meetod end õigustanud ka suuremahuliste tööde puhul, eriti kui kasutada on tagasihoidlikud rahalised vahendid, mis ei võimalda lausalisi uusi mõõdistamisi. Teine traditsioonilisem kõrgusandmete saamise viis on aerofotode analüüs. See nõuab spetsiaalse aparatuuri olemasolu ning kontrollpunktide määramist looduses. Sõltumata sellest, kas tegemist on digitaal- või analoogkujutisega, vajatakse kõrgusarvu ehk z-koordinaadi saamiseks vaadeldavast alast stereofotot. Satelliitpilte on kõrgusmudelite koostamiseks kasutatud vähem, kuid kiire areng digitaalses fotogrammeetrias, satelliitpiltide lahutuse paranemine ja andmete kättesaadavamaks muutumine teeb sellest olulise andmeallika.

Samakõrgusjoontelt kõrgusmudeli koostamisel on kõige aeganõudvam kaardilt samakõrgusjoonte digitaliseerimine ja digitaalandmete interpoleerimine kõrgusmodeliks. Isojooned võivad olla digitaliseeritud käsitsi või poolautomaatselt, sõltuvalt lähteandmete kvaliteedist. Töömahu vähendamiseks võib kõrgusandmeid sisestada valikuliselt, hõlmates tihedamalt näiteks reljeefi iseloomulikke alasid ja lisades mäeharjade ja orupõhjade kõrgused. Oskuslikul valikul mudeli täpsus sel juhul oluliselt ei kannata. Samuti võib täpsuse huvides reljeefi iseloomulikumat teadaolevaid kõrgused (järve pind, inimtekkelised pinnad) ette anda. Peale joonte digitaliseerimist tuleb maatriksmudeli puhul andmeid ruumiliselt interpoleerida, et nõ. täita joonte vahelised alad. Sagedamini on kasutatav pöördvõrdeline kauguskaalutud (*Inverse Distance Weighted*) meetod, kus mudelis arvutatakse igale pikslile kõrgusväärtus lähimate teadaolevate kõrguste keskmisena, kusjuures lähemalasetsevatele punktidele omistatakse suurem kaal kui kaugemalasetsevatele punktidele.

Kõrgusmudeli olemasolu suurendab oluliselt geoinfosüsteemi analüüsipotentsiaali. Kõrgusmudeli täpsus aga mõjutab selle baasil tehtavate analüüside ja modelleerimiste tõepärasust. Suur osa kõrgusmudeli täpsusest sõltub lähteandmete kvaliteedist ja

esinemissagedusest, mistõttu teatud juhtudel tuleb teadlikult soovitud tulemuse saavutamiseks lähteandmetega manipuleerida neid valikuliselt lisades või kaotades.

Kõrgusmudelit saab kasutada erinevate hüdroloogiliste modelleerimiste lähteandmetena (Tarboton and Ames, 2001). Igale punktile maastikus on võimalik leida valgla, ehk ala millelt kogunenud vesi seda punkti läbib, valglate leidmine on baasiks kõikide veemajanduskavade koostamiseks (Lundin, 2000). Valgla põhiste majandusmudelite väljatöötamine eeldab võimalikult täpset informatsiooni valgla piiride, vooluveekogude ja vee hulga kohta (Abedalrazq et al., 2005). Teades valgla suurust on võimalik hinnata ülesvoolu vooluhulka, mis mingit punkti läbib ning kindlaks teha muutused vee keemilises koostises. Väga tasastel ja väikese pindalaga aladel on valglate leidmine keeruline ja vigaderohke. Vigade vähendamise üheks võimaluseks on koostatud reljeefimudeli sobivas suunas muutmine, alandades kõrgusandmeid olemasolevate vooluveekogude kohal.

Käesoleva töö eesmärk on luua Saaremaa ja Muhu saare suurema täpsusklassi reljeefimudel, leida sobivaim interpoleerimisviis kõrgusmudeli koostamiseks, eesmärgiga kasutada seda mudelit hüdroloogilise modelleerimise lähteandmetena. Leida sobivaim viis lähteandmete muutmiseks detailsemate modelleerimiste läbiviimisel. Lähteandmeid on teatud juhtudel vajalik muuta selleks, et täpsustada automaatselt leitavate vooluveekogude voolusänge võrrelduna tegelike kaardistatud vooluveekogudega. Suurema vooluveekogude ja alamvalglate täpsuse saavutamiseks tuleb lähteandmetega manipuleerida eelkõige väga tasastel aladel, muudetud voolusängidega aladel ja situatsioonides, kus algandmed ei kajasta voolusängide sügavat lõikumist pinnasesse. Kasutades täpsustatud kõrgusmudelit on eesmärk koostada Saaremaa ja Muhu saare hierarhiline valglate andmekogu.

2. ANDMESTIK JA METOODIKA

2.1 Kõrgusmodel

Reljeef mõjutab looduses toimuvaid protsesse nii otseselt kui kaudselt. Reljeefi põhiste arvutuste ja analüüside tegemiseks tuleb koostada vastav looduslikku pinda kopeeriv mudel. Mõistet pinnamudel kasutatakse paljudes tarkvarades, see sobib ka muude nähtuste kirjeldamiseks, mis omavad kolmandat mõõdet, või mida saab visualiseerida ruumiliselt ning mis vastavad kirjeldatud tingimustele.

Reaalne pind moodustub lõpmatust hulgast punktidest. Pinna mudeli loomiseks tuleb mingil moel valida lõplik hulk punkte, mille interpoleerimisel saaks omakorda võimalikult täpselt taasesitada esialgset ehk looduslikku pinda. Lisaks peab mudel lubama kasutada võimalikult lihtsalt saadavaid algandmeid ning võimaldama efektiivset info salvestust ja töötlust (Krusberg, 1997).

Reljeefist sõltuvate looduslike protsesside ja nähtuste modelleerimiseks ning simulatsioonide koostamiseks kasutatakse digitaalset kõrgusmudelit. Kõrgusmudelilt on leitavad mitmed olulised morfomeetrilised näitajad nagu nõlva kalle, nõlva suund jt. (Farenhorst et al, 2003). Kõrgusmudeleid on võimalik esitada mitmel kujul ja nende tähistamiseks on mitmeid erinevaid mõisteid, levinumad on võrkmodel (rastermodel) ja kolmnurkmodel, rohkem tuntud ingliskeelsete lühendite kaudu DEM ja TIN.

Rasterkujuga on andmete organiseerimise vorm, kus andmeid esitatakse regulaarselt paiknevate elementide ehk pikslite kaupa (Jagomägi, 1999). Piksel (cell) on pinna või ruumi väikseim jagamatu ühik, mis tekib mosaiikimise ehk tessellatsiooni tulemusena, (ruum jagatakse ühesuguse kindla kujuga osadega korrapäraseks võrguks). Mosaiikimist kasutatakse asukohakesksete või pidevate nähtuste kujutamisel (maapinna kõrgus). Vaadeldaval nähtusel on piksli piires kokkuleppeliselt ühesugune väärtus (Krusberg, 1997).

DEM kõrgusmudeli puhul sisaldab rasterkujutise iga piksel numbrilise väärtuse, mis väljendab ruuduga piiritletud maa-ala keskmist kõrgust. Maa-ala suurust, mille kohta kõrgusnumber on salvestatud, nimetatakse kõrgusmudeli lahutuseks. Madala resolutsiooniga kõrgusmudel sisaldab vähem detaile ja kõrge resolutsiooniga mudel rohkem detaile. Väikese lahutusega on näiteks mudel, mille iga ruudu küljepikkus looduses on 100 m, suure lahutusega aga mudel, mille ruudu küljepikkus looduses on 10 m.

TIN-mudel on teine GIS-ides kasutatav kõrgusmudeli tüüp, mis arendati DEM-mudelitele alternatiiviks. Eesmärgiks oli luua maatriksmudelist efektiivsem ja täpsem mudel. Neid iseloomustab:

- kõrguspunktide mittekorrapärase paiknemine,
- punktide omavaheline ühendatus kolmnurkadeks,
- vaadeldava ala täpne võrgustikuga katmise võimalus.

Punktid salvestatakse ebakorrapärase paiknemisega. Eeliseks peetakse, et punktide tihedus on keerukama reljeefiga aladel suurem ja laugetel aladel väiksem. Erinevalt ruudustikumudelitest saab igale geograafilisele punktile määrata täpse kõrgusarvu. TIN mudel kasutab vektorformaati. GIS-is hoitakse kõrgusmudeli kolmnurkelemente polügoonidena. Igal võrgustikupunktil on kõrgusväärtus. Kolmnurkade servadega on seotud kaldenurga suurusest mõjutatud atribuutinfo. Iga kolmnurkelement on tasapind.

Erinevate arvutuste tegemiseks kasutatakse peamiselt võrkumodelit ehk raster-kõrgusmudelit DEM, kus iga rastrielement ehk piksel omab atribuudiväärtust, mis tähistab kõrgust.

Kõrgusmudeli loomiseks, puuduvate andmete leidmiseks kasutatakse interpoleerimist. Interpoleerimine on punktile väärtuse andmine teda ümbritsevate punktide väärtuste põhjal (Jagomägi, 1999).

Mudel on lihtsustatud reaalsus, mis väljendab või kirjeldab kõige tähtsamaid elemente ja nende vahelisi seoseid. Mingite protsesside modelleerimine sisaldab endas teoreetilisi kontseptsioone ja arvutusmeetodeid, mis kirjeldavad, kujutavad ja simuleerivad protsesse, mis toimuvad reaalses maailmas (Mitasova ja Mitas, 1998). Mudelid jagunevad (Mitasova ja Mitas, 1998) põhimõtteliselt:

- empiirilised – vaadeldud andmete statistiline analüüs,
- protsessil põhinevad – nähtuste ja protsesside matemaatiline seletus.

Interpoleerimismeetodeid ja tehnikaid on erinevaid, valik millist tehnikat kasutatakse sõltub nii lähteandmete olemusest ja täpusest, kui lõpptulemuse olemusest ja vajalikkusest/eeldatavast täpsusest. Interpoleerimis- ja modelleerimistehnika valik erinevate ülesannete lahendamiseks tuleneb ka sellest, millist konkreetset tarkvara või takvarade tooteperekondi töö teostamisel kasutatakse.

2.1.1 Kõrgusmudeli olemus, vead

Reljeefimudeli puhul on tegemist statistilise pinnaga, kuigi erinevalt teiste loodusnähtuste modelleerimisest, kus tegemist on ainult matemaatilise konstruktsiooniga, eksisteerib reljeef ka tegelikkuses. Reljeefimudeli koostamisel saame enamasti, sarnaselt teistele nähtustele, kasutada ainult teatud punktides mõõdetud väärtuseid, mistõttu ei väljenda koostatud mudel kunagi reaalsust ilma vigadeta.

Kõrgusmudeli täpsus sõltub väga paljudest asjaoludest, eelkõige aga lähteandmete täpsusest ja interpoleerimise viisist. Interpoleeritud andmete täpsuse puhul tuleb mõista, et need on andmed, mille puhul vead jäävad teatud piiridesse.

Ükski kaart ei ole vigadeta ja kui me kasutame uute kaardiliste andmete koostamiseks juba koostatud kaarte, siis kanduvad seal esinevad vead edasi ka uutele kaartidele (Straus, 2001).

Suures osas kasutatakse algandmetena reljefimudelite koostamisel jätkuvalt olemasolevaid paberkaarte, mille kvaliteet mõjutab otseselt koostatava mudeli täpsust.

Üldjoontes mõjutab reljefimudeli täpsust (teatud täiendustega) samade parameetrite summa, mis on iseloomulik kõigi GIS andmete kvaliteedile (Jagomägi, 1999):

- asukohatäpsus – lähteandmetes esinenud viga kandub edasi, täpsuse võimalik muutumine näiteks skaneerimise, transformeerimise ja digitaliseerimise käigus, interpoleerimisel tekkinud vead,
- atribuuditäpsus – lähteandmetes esinenud viga kandub edasi, digitaliseerimise käigus omistatakse joonetele või punktidele vale atribuut, künkad muutuvad orgudeks või vastupidi
- täielikkus – lähteandmetes esinenud viga kandub edasi, skaneerimisel ja digitaliseerimisel tehtud vead, halb skaneerimise kvaliteet ei võimalda objekte tuvastada või mõni objekt jääb digitaliseerimata,
- ajakohasus – lähteandmetes esinenud viga kandub edasi, ajas toimunud muutused, näiteks künkad kaevandamise käigus kadunud, teetammide rajamine jne,
- asjakohasus – valitud interpoleerimisel liiga suur või liiga väike piksel, mis ei võimalda andmeid analüüsida, või tekitab „müra“.

Erinevad interpoleerimistehnikad mõjutavad oluliselt reljefimudeli morfoomeetrilisi parameetreid nagu aspekt ja nõlvakalle, millest omakorda sõltuvad hüdroloogiliste mudelite täpsus ja tõepärasus.

2.1.2 Tehnikad

Interpoleerimismeetodeid on erinevaid, neil kõigil on teatavad erinevused. Iga meetod kasutab erinevate parameetrite väärtuseid mis mõjutavad lõpptulemust. Millist meetodit ja milliste parameetrite väärtustega kasutada, sõltub andmete iseloomust. On mitmeid erinevaid interpoleerimismeetodite grupeerimise võimalusi.

Üldjoontes võib interpoleerimismeetodeid klassifitseerida kahte suurde gruppi: lokaalsed ja globaalsed meetodid. Lokaalsed meetodid opereerivad uute andmepunktide leidmiseks väiksemate tsoonidega kui globaalsed meetodid. Samas võimaldavad globaalsed meetodid leida ja kõrvaldada globaalsed variatsioonid, tulenevalt andmete üldisest trendist. Teine võimalus on klassifitseerida meetodid täpseteks ja ligikaudseteks. Täpsed meetodid ennustavad uue andmepunkti väärtuse täpselt mõõdetud andmepunktide väärtuste järgi ja ebatäpse meetodiga leitud uute andmepunktide väärtused ei ole lähteandmetega identsed. Võrreldes statistiliselt kahe meetodi erinevusi saab hinnata mudeli kvaliteeti (Burroughs ja McDonnel, 1998). Täpsete lokaalsete meetodite hulka võib lugeda IDW interpoleerimismeetodi. IDW meetod oletab, et uue andmepunkti väärtus on kauguskaalutud keskmine mõõdetud andmepunktide väärtus otsinguraadiuse sees, mis leitavat andmepunkti

ümbriseb. Lisaks arvestatakse punktidevahelist kaugust, omistades suurema mõju lähemal asuvatele punktidele. IDW on üldjuhul kiire interpoleerimismeetod, kuid on väga tundlik üksikute ja klastrina esinevate andmepunktide suhtes.

Vastavalt tööpõhimõtetele jagunevad algoritmid kolme suurde gruppi (Jagomägi, 1999):

- kauguskaalutud interpoleerimine eeldab, et mida kaugemal asuvad punktid üksteisest, seda vähem mõjutab nende väärtus uute punktide väärtuseid,
- trendipinnad kasutavad kõikide etteantud punktide väärtuseid ja loovad vastava funktsiooniga üldise pinna,
- kriging arvestab nähtuse kolme omadust – üldist trendi, kohalikke variatsioone ja „müra“, andes lõpptulemusena ka hinnangu interpoleeritud tulemuse täpsusele.

Enamlevinud interpoleerimismeetodid on:

- lähima naabri (väärtuse) - *Nearest neighbor*,
- pöördkaugusega kaalutud - *Inverse distance weighted*,
- nelinurkne, bilineaarne – *Bilinear*,
- kriging - *Kriging (best linear unbiased estimator)*,
- splain – *Spline*.

Splain – on tükiti polünoomiaalne pind. Valimi punktide vahel kasutatakse erinevate kordajatega (aga sama astmega) polünoome nii, et tekkiv pind läbib täpselt valimi punkte ja on samal ajal ülemineku kohtades sujuv (pidev ja diferentseeruv) (Krusberg, 1997).

Interpoleerimismeetodi valikut mõjutavad ka lähteandmete täpsus ja ulatus (Gao, 1998), mille järgi omakorda võib interpoleerimismeetodeid jagada lokaalseteks ja globaalseteks (Peralvo, 2003). DEM-ilt on leitavad erinevad näitajad: aspekt, nõlvakalle, voolujoonte pikkused, profiili-, tangentsiaalsed-, kontuuri- ja pikisuunalised kõverused, valgla ja alamvalglate lahkmeejooned jne. (Straus, 2001). Reljeefivormide näitajad mõjutavad otseselt kirjeldatavat protsessi ja modelleerimise tulemuse täpsust, seetõttu on interpoleerides oluline valida DEM'ile õige lahutusvõime (Straus, 2001). Lahutusvõime ehk resolutsiooni mõju lõpptulemusele on suurem tasastel aladel, kus suhteliste kõrguste vahed on väikesed (Clarke and Burnett, 2003). Liiga hea lahutus suurendab kindlasti „müra“ loodava mudeli andmestikus ja võib tekitada tehislisku reljeefi, mis omakorda mõjutab hilisemat modelleerimise täpsust. Reljeefimudeli silumiseks, või lokaalsete suhteliste kõrguste erinevuste rõhutamiseks kasutatakse tihti erineva toimega filtreid. Filter on funktsioon, mis vaatab andmeid läbi liikuva akna (tavaliselt 3x3 pikslit) ja arvutab akna keskele jäävale punktile uue väärtuse, kasutades selleks kõikide aknasse jäävate punktide väärtuseid ja mingit matemaatilist funktsiooni. Levinumad on kõrgpääs (*high-pass*) - ja madalpääsfiltrid (*low-pass*).

2.1.3 Tehnika valik

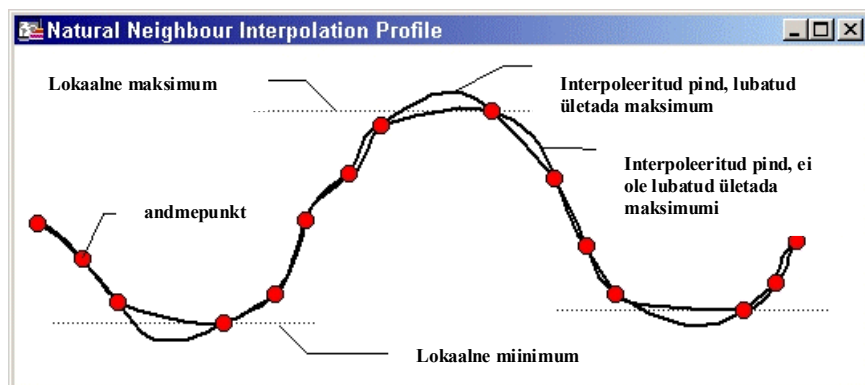
Erinevate tarkvarade interpoleerimistehnikad kasutavad sarnaseid mõisteid ja nimetusi ning nende üldine ideoloogia on sarnane, kuid sisuliselt on siiski tegemist erinevate lähenemistega. Universaalset interpoleerimismeetodit, mis sobiks kõikidele erinevatele andmetele, ei ole paraku olemas. MapInfo Professional baastarkvara kasutatav rasteranalüüsi programm Vertical Mapper toetab kuut interpoleerimistehnikat:

- triangulatsioon koos silumisega (*Triangulation with Smoothing*),
- pöördkaugusega kaalutud interpoleerimine (*Inverse distance weighted*),
- lähima naabri tavaline ja arendatud interpoleerimine (*Natural Neighbour, simple, advanced*),
- täisnurkne, bilineaarne (*Rectangular, bilinear*),
- kriging,
- kasutaja poolt defineeritud (*Custom Point Estimation*).

2.1.3.1 Lähima väärtusega interpoleerimine

Vertical Mapper kasutab vektorandmetest interpoleerimise lähteandmetena MapInfo formaadis punktobjektide faili, vajadusel genereeritakse punktid joon- ja pindobjektide nurgapunktidest või vastavalt etteantud sammule teatud vahemaa tagant piki joonobjekti või pindobjekti väliskontuuri.

Lähima väärtusega interpoleerimine on geomeetriline hinnangu andmise tehnika, mis kasutab andmepunkti ümber tekitatud lähima naabri regioone. See tehnika on täpne ja efektiivne kui kasutatavad ruumilised andmed on olemuselt koondunud või lineaarselt jaotunud. Lähima naabri tehnika eristab lähteandmete punktifailis lokaalsed miinimum- ja maksimumväärtused ning võimaldab seetõttu vajadusel sätestada nende lokaalväärtuste ületamise. Seetõttu on selle tehnikaga võimalik luua reaalsusele sarnaseid pinnamudeleid andmetest, mis on väga hõredalt jaotunud, või millel on väga lineaarne ruumiline jaotus (joonis 1).

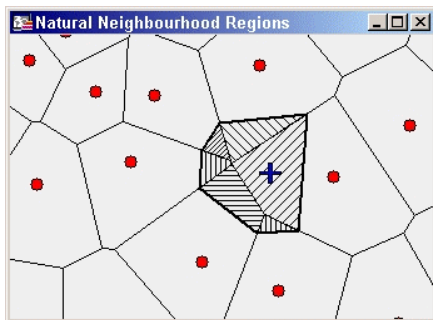


Joonis 1. Lähima väärtusega interpoleerimise profiil.

Interpoleeritud pind on selgelt kontrollitud originaalandmepunktidega ning iga punkti juures on selle väärtus esile toodud, see võimaldab vajadusel punkti väärtusi ületada või mitte täita. Põhimõtteliselt võimaldab lähima väärtusega interpoleerimine kasutada kauguskaalutud tehnikat, et määratleda iga võrgustikupunkti uus väärtus. Nagu on näha joonisel 2, luuakse iga andmepunkti jaoks kõigepealt lähima naabri piirkond (Voronoi diagramm, Delaunay tesselatsioon).

Delaunay kriteerium – punktid ühendatakse omavahel sirgjoontega nii, et moodustub kogu pinda kattev kolmnurkade võrk. Moodustuvad kolmnurgad ise on alati tasapinnalised. Delaunay kriteeriumi korral kehtib tingimus, et suvalise kolmnurga tippudest läbi tõmmatud ringjoone sisse ei tohi jääda teisi punkte. Moodustuvad kolmnurgad on võimalikult võrdnurksed, sellega väheneb oht, et tekib pikki kitsaid kolnurki, mis on arvutuslikus mõttes tülikad ning ühe kolmnurga suvaline punkt on lähemal selle kolmnurga tipule (valimi punkt) kui teiste kolmnurkade tippudele.

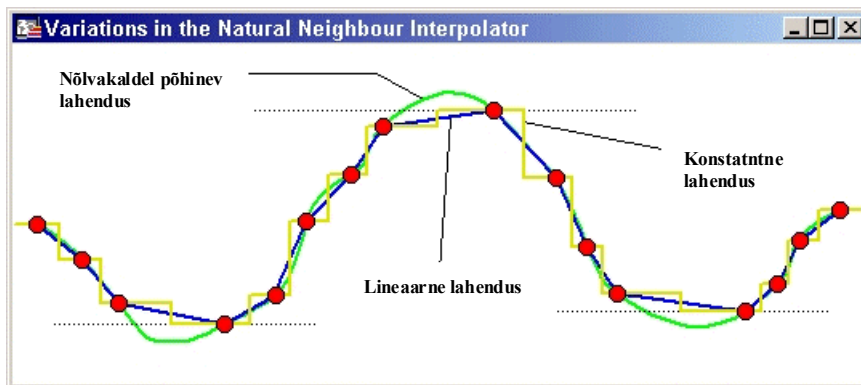
Seejärel luuakse uues koordinaatvõrgustikus iga sõlmpunkti juurde uus lähima naabri piirkond, mis efektiivselt katab (kirjutab üle) iga punkti piiritleva lähima naabri piirkonna erinevaid kindlaks määratud osi. Uue koordinaatvõrgustiku väärtus arvutatakse ümbritseva punkti väärtuste keskmisena (proportsionaalselt vastavalt iga punkti lõikuvale pinnale).



Joonis 2. Lähima väärtuse regioon.

Valida on võimalik kolme lähima naabri tehnika vahel (joonis 3):

- konstantse väärtusega lahend – iga koordinaatvõrgustiku sõlmpunkt võtab endale aluskihiks oleva lähima naabri piirkonna väärtuse,
- lineaarne lahend - koordinaatvõrgustiku väärtus määratakse punkti ümbritseva lähima naabri piirkondade väärtuste keskmistamisega ja kaalumise vastavalt alale, mis on piiratud võrgustikupunkti ümber moodustatud ajutise lähima naabri piirkonnaga,
- nõlvakaldel põhinev lahend - võrgustikupunkti väärtus määratakse iga ümbritseva lähima naabri piirkonna ja kaalutud ala ekstrapoleeritud kalde keskmistamisega nii nagu lineaarsegi lahendi puhul. Külgnevaid punkte uurides määratletakse, kas see punkt esindab kohtväärtuse maksimum- või miinimumpiiri. Kui jah, siis sellele väärtusele määratakse kaldeväärtuseks 0 ja pind toob selle punkti esile kas seda väärtust suurendades (ületades) või jättes täitmata.



Joonis 3. Lähima väärtuse interpoleerimistehnikate variatsioonid.

Interpoleerimisparameetrite valimine toimub samm sammult nn *wizard*-vormis, kõige esimeseks sammuks on määratleda, kuidas toimub andmepunktide koondamine arvutamiseks. Valida on kolme võimaluse vahel:

Samm edasi (*forward steping*) – see meetod on kiire ja efektiivne ning sobib enamusele lähteandmetest, eriti siis kui andmed asetsevad ruumis juhuslikult ja hajutatult. Andmepunktide grupeerimine algab kaardiakna vasakust ülemisest servast ja punkte käsitletakse vastavalt määratud otsinguraadiusele. Liikumine toimub vasakult paremale ja ülevalt alla. Punktid, mis satuvad otsinguraadiuse sisse, märgistatakse vastavalt ja neid ei kasutata enam teiste grupeerimiste puhul. Protsessi lõpuks genereeritakse vastavatest gruppidest uued andmepunktid.

Parve tihedus (*cluster density*) – kasutatakse tavaliselt kui visuaalselt on võimalik hinnata andmepunktide koondumist parvedesse. Tavaline näide on majapidamiste kaupa elanike tiheduse näitamine maapiirkondades, kus klastrid tekivad külade kohale ja külade vahele jäävad tühimikud. Grupeerimine toimub vastavalt etteantud otsinguraadiusele ja tervet andmehulka vaadatakse korraga, kõigepealt tekitatakse uued andmepunktid tihedamalt paiknevatest andmepunktidest ja märgistatakse vastavalt, kuni kõige hõredamate piirkondadeni välja.

Ruut lähenemine (*square cell*) – kasutatakse peamiselt statistiliste pindalaliste analüüside läbiviimiseks nn ühikut hektari või muu pindalaühiku kohta ja tahetakse vältida ülekatteid. Uued andmepunktid tekitatakse vastavalt otsinguraadiusele, mitte risküliku tsentroidi.

Reljeefiandmete koondamiseks sobib ilmselt kõige paremini samm edasi tehnika. Järgnevalt tuleb määratleda otsinguraadius andmepunktide grupeerimiseks. Otsinguraadiusega fikseeritakse kaugus igast andmepunktist, mille sisse jäävaid lähteandme punkte tulemuse arvutamisel kasutatakse. Otsinguraadiuse abil saab arvutustest välja jätta kaugemad punktid, mis tõenäoliselt arvutatavat väärtust ei mõjuta. Vertical Mapper'i puhul kasutatakse

arvutamiskauguse määratlemiseks raadiust, mitte diameetrit. Viimasena tuleb määratleda, kuidas arvutatakse uus väärtus, miinimum, maksimum, keskmine jne., ilmselt on enamusel juhtudel sobivaim keskmine väärtus (*Average value*).

Järgmise sammuna tuleb valida sobiv arvutusmeetod, kas konstantse väärtusega lahend, lineaarne lahend või nõlvakaldel põhinev lahend (joonis 3). Reljeefiarvutuste tegemiseks on tavaliselt sobivaim nõlvakaldel põhinev meetod, millele lisaks tuleb ette anda kaldenurga faktor (*Skeweness factor*). Kaldenurga faktoriga saab määratleda kaalud lähimale punktile rastrolemendi väärtuse arvutamisel. Väärtusvahemikud on vastavalt 0,001 – 999, mida suurem on väärtus seda sarnasem on tulemus konstantsele arvutusmeetodile. Lisaks saab määratleda kaalukõvera, mis omistab suurema mõju lähemal asuvatele punktidele, sõltuvalt sellest, kui suur on punkti lähima väärtuse regioon. Kaalu faktor (*Weight Factor*) võimaldab iga andmepunkti nõlvaväärtust arvutades defineerida läheduses olevate kolmnurkade mõju suurus. Kasutatakse ainult nõlvameetodil lähima naabri interpoleerimisel. Kaalufaktori suurenedes suureneb kaugemate andmepunktide relatiivne mõju. Eksponent (*Exponent*) võimaldab varieerumist, kui nõlvalahendust kasutades arvutada igale andmepunktile nõlvaväärtus, siis defineerib see lähedal olevate punktide abil mõju eksponentsiaalse languse. Eksponenti suurendades väheneb kaugemate punktide suhteline mõju.

2.1.3.2 Kriging

Kriging kui andmete analüüsi meetod on oma nime saanud Lõuna-Aafrika mäeinseneri D.G.Krige nime järgi ja kasutab juhusliku välja struktuuri kirjeldamiseks variogrammi. (Toompuu, 2005).

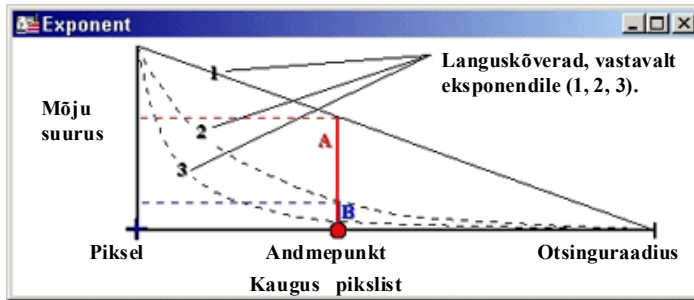
Kriging on geostatistiline interpoleerimistehnika, mis kasutab uutele genereeritavatele võrgupunktidele väärtuste arvutamiseks nii andmepunktide kaugusi kui ka nende vaheliste kaldenurkade väärtuste erinevusi.

Kriging arvutus on kaalutud lineaarne kombinatsioon olemasolevate punktide väärtuste põhiselt uutele punktidele väärtuse leidmiseks. Korralikult rakendades on kriginguga võimalik tuletada kaalusid, mille tagajärjeks on optimaalne ja nihketa hinnang. Selle abil on võimalik vähendada vea hälvet ja sättida ettearvatavad vead 0-ni nii, et ei tekiks üle- ega alahindamisi. Põhimõtteliselt järgitakse fikseeritud vea väärtusi, mida arvutustel ei ületata.

Kriging funktsiooniga on võimalik konstrueerida andmetest semivariogramm, mida kasutatakse läheduses asuvate punktide kaalumiseks. See annab võimaluse mõista ja modelleerida lähteandmete põhi-lõuna, ida-lääs suunalisi trende.

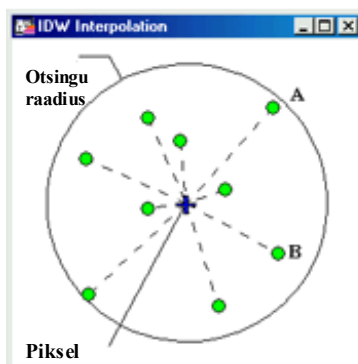
Krigingu puhul on unikaalne see, et selle abil on võimalik arvutada iga interpoleeritud võrgupunkti viga, võimaldades mõõta (hinnata) loodud mudeli usaldatavust. Krigingu tõhusus sõltub semivariogrammi ja suunamudelit iseloomustavate parameetrite korrektsetest spetsifikatsioonidest (st keskmine väärtus kas muutub või ei muutu vahemaade muutudes). Kuna kriging on robustne interpoleerimistehnika, siis isegi lihtne parameetrite valik võimaldab anda hinnangu, mis on võrreldav teiste koordinaatidevõrgustiku hindamisviisidega. Iga punkti optimaalse lahendi hindamiseks krigingu abil kasutatakse kokkulepitult arvutusaega. Kuna sobivate parameetrite katse-eksitusmeetodil väljavalimiseks kulub täiendavalt aega, siis tuleks krigingut kasutada vaid sellistel juhtudel, kus on nõutav parim hinnang, olemas on hea kvaliteediga andmed ning vigade hindamine on väga olulise tähtsusega.

Kriging on pöördkaugusega kaalutud (IDW) interpoleerimisele sarnane *kaalutud liikuva keskmise tehnika*. IDW puhul hinnatakse iga koordinaatvõrgu sõlmpunkti ringi raadiusesse langevate proovipunktidega. Iga punkti arvutatud väärtuse mõju suurus põhineb iga punkti kaalutud kaugusel hinnatava koordinaatvõrgu sõlmpunktist. Teiste sõnadega öeldes, punktidel, mis on sõlmpunktile lähemal, on suurem mõju arvutatud väärtusele kui kaugematel punktidel. Üldine seos proovipunkti mõjuhulga ja selle kauguse vahel on määratud IDW eksponentasetusega nagu näidatud allpool (joonis 4).



Joonis 4. IDW interpoleerimisel kasutatavad languskõverad.

IDW interpoleerimise puuduseks on see, et ta kohtleb kõiki otsitavasse raadiusesse langevaid punkte ühtviisi. Näiteks kui eksponent 1 on määratud, siis kasutatakse otsitavas raadiuses olevate punktide kaalude kindlaks määramisel lineaarset kauguskõverat. Hoolimata punktide geograafilisest asetusest sõlmpunkti suhtes (ilmakaarte suunad), kasutatakse sama toimingut kõigi punktide puhul välja arvatud sektorotsingu meetodi rakendamisel. Samal ajal kasutab kriging proovipunktide kaugusest ja suunast sõlmpunkti suhtes ning punktide klasterdamise viisist tulenevalt erinevaid kaalumiskõveraid (joonis 5).



Joonis 5. IDW interpoleerimine.

Joonis iseloomustab IDW interpoleerimisel punktide mõju arvutatud väärtusele, mis toetub samale kauguskõvera funktsioonile kui üks punkt asetseb koordinaatvõrgu sõlmpunktist kirdes (punkt A) ja teine kagus (punkt B). Kriginguga on võimalik koordinaatvõrgu sõlmpunkt välja arvutada kasutades otsinguraadiuse iga punkti jaoks erinevaid kaalutud funktsioone.

Enne interpoleerimise algust arvutatakse katselise semivariogrammi tekitamise ja kujule ligikaudse matemaatilise mudeli valimisega iga võimalik kauguskaalutud funktsioon. Matemaatilise mudeli kasutamine annab võimaluse kindlaks määrata üha enam kaugenevate andmepunktide sobivaid kaalusid.

Vertical Mapperi krigingu interpoleerimismeetodeid on võimalik rakendada kahel kujul – punktina või rühmana. Tarkvara siseselt eristatakse kolme krigingu võimalust:

Tavaline kriging

Meetod eeldab et andmed on „püsivalt“ vastuolulised ja muutuva väärtusega otsinguraadiuse sees. Meetod eeldab, et andmetel on muutumatu hälve ja muutuv keskmine väärtus otsinguraadiuse sees. On usaldatav ja soovitatav enamiku andmete puhul.

Lihtne kriging

Meetod eeldab, et andmetel on püsiv hälve ja püsiv keskmine väärtus ning keskmine väärtus tuleb endal sisestada.

Universaalne kriging

See meetod kirjeldab tõest geostatistilist lähenemist piirkonna trendipinna interpoleerimisele. Kõigepealt ehitatakse andmevoogu iseloomustav pind, seejärel arvutatakse pinna jääkväärtus. Universaalse krigingu puhul võib andmevoo pinna kirjeldamiseks kasutada hulkliikme avaldist, mille valemiks on:

$$F(x, y) = a_{20} * x^2 + a_{11} * xy + a_{02} * y^2 + a_{10} * x + a_{01} * y + a_{00},$$

kus a_{00} on alati olemas, kuid harva arvutusele eelnevalt 0-na (nullpunktiks) määratud. Siiski võib teisi koefitsiente nullpunktiks määrata. Soovitatav asetus on esimese astme hulkliige, mis väldib ettearvamatu käitumist väljapool andmepiire.

Kasutades kriging tehnikat tuleb läbida neli sammu:

- andmepunktide koondamine,
- krigingu parameetrite sätestamine,
- variogrammi viimistlemine,
- kriging arvutuse teostamine.

Interpoleerimisparameetrite sätestamine toimub sarnaselt lähima väärtusega interpoleerimistehnikale, alates kattuvate andmepunktide eemaldamisest. Kõigepealt määratakse vahemaa, millel asuvaid andmepunkte liidetakse ja tehnika, mismoodi uutele punktidele väärtused omistatakse, kas miinimum, maksimum, keskmistatud, või punktide väärtuste summa. Uus leitav andmepunkt asetatakse tavaliselt arvutuses kasutatud andmepunktide geomeetrilisse keskpunkti. Järgnevalt määratakse arvutatava piksli suurus kasutatavates mõõtühikutes ja piiritletakse otsinguraadius, mille keskmis asub andmepunkt, mille väärtust arvutusteks kasutatakse. Lisaks on võimalik piiritleda mitu andmepunkti minimaalselt ja mitu andmepunkti maksimaalselt otsinguraadiuses võib esineda. Kriging tehnika üks olulisemaid osi on semivariogrammi koostamine lähteandmetest.

2.1.3.3 Semivariogramm

Andmemudeli koostamine annab hea võimaluse visualiseerida, kuidas punktandmed läbi ruumi muutuvad, samas ei võimalda see hinnata kuidas andmed mingis etteantud suunas muutuvad ja kui suur on vastava suuna muutumise trend. Suunatrend on sarnaste väärtustega andmepunktide kalduvus paigutada lineaarselt või eraldiseisvana. Tihti on suunatrende mitu, kuid üks neist on domineeriv. Osaline muutuja väljendab punktidevahelist suhte määra. Lähedal asuvate punktide muutuja on null, kuna puudub erinevus, kui punkti võrrelda iseendaga, kauguste kasvades suureneb ka erinevus. Mingist vahemaast alates on muutuja peaaegu sama, mis tervel mudeli pinnal, see on suurim kaugus, kus pinnal asuvad kaks andmepunkti üksteist mõjutavad.

Muutuja arvutamine andmepaaridele toimub erinevate vahemaadega kõigis suundades, algset distantssi (*lag*) suurendatakse aste astmelt sama väärtuse võrra 10, 20, 30 jne. läbi kõigi andmete. Kõiki andmepunkte võrreldakse kõikide ülejäänud andmepunktidega, et määrata kindlaks millised punktid jäävad esmasest võrdlusdistantist välja. Kui sellised punktid leitakse, määratakse nendele punktidele muutuja sõltuvalt nende asukohast ja geograafilisest orientatsioonist. Sama meetodit aksutatakse kõikide *lag* distantside puhul ja näidatakse tulemust semivariogrammil.

Semivariogramm on graafik, mis näitab muutuja suurust y teljel asuva punkti ja x teljel kujutatava vahemaa vahel. Semivariogramm võimaldab lugeda andmete suunatrende. Sellel on võimalik analüüsida erinevusi ainult distantstist sõltuvalt, jättes arvestamata kuidas andmepunktid on orienteeritud, sellist semivariogrammi nimetatakse suunavabaks. Vajadusel saab genereerida ka mitmesuunalisi semivariogramme, kus samaaegselt näidatakse admetrende ühel graafikul eri suundades. Selliselt saab leida informatsiooni andmete ruumilise jagunemise kohta ehk leida isotroopsuse ja anisotroopsuse. Vajadusel saab mudeli arvutamisel suundi (kaheksa suunda) muuta või neid ette anda, määrates nii nurga kui sektori nurga kraadides ja *lag* distantssi.

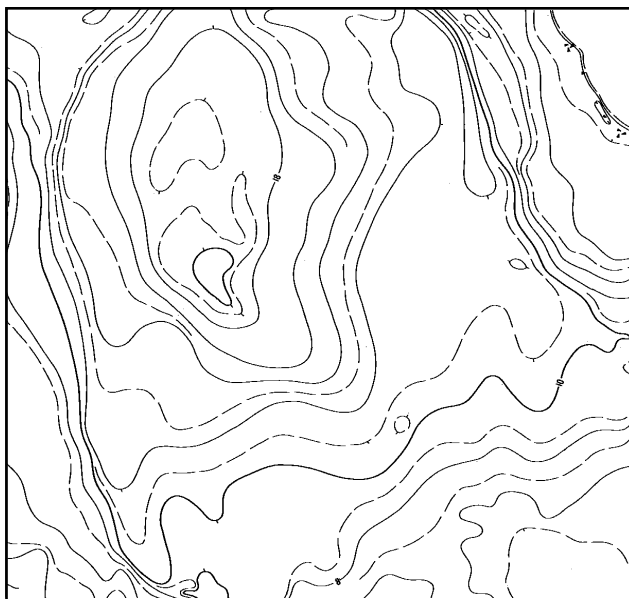
Peale esmase semivariogrammi koostamist saab arvutada mudeli kõvera mis oleks semivariogrammile võimalikult sarnane. Verical Mapper võimaldab kasutada erinevaid semivariogrammi mudeleid: sfääriline, eksponentsiaalne, augu efekt jt.

2.2 Reljeefiandmed

Kõrgusmodelite koostamiseks on võimalik kasutada mitmeid erinevaid lähteandmete allikaid. Sõltuvalt lähteandmete vanusest ja koostamise meetodikast on võimalike andmeallikate täpsusklass ja katvus väga erinev. Lähtuvalt konkreetse töö eesmärgist on reljeefiandmete valikukriteeriumiks lähteandmete kvaliteet, ehk nii vertikaal- kui horisontaalsuunaline täpsus ja ala katvus ning valikut mõjutab oluliselt ka andmete hind.

Reljeefimudeli koostamise lähtematerjaliks valiti NSVL Geodeesia ja Kartograafia Peavalitsuse poolt 1980-ndatel aastatel koostatud 1 : 10 000 topograafilise kaardi reljeefikiht. Reljeefikihi tarbimisväärtust suurendas asjaolu, et seda kihti hoitakse trükikiledel, lahus ülejäänud andmetest, samas tuleneb sellest ka teatud andmete kadu, kuna trükikilel ei kajastu kõrguspunktide andmed. Trükikiled skaneeriti TIF rasterformaati, kokku ca 240 lehte ja skaneeritud pildid koolutati (vorbiti) Eesti Põhikaardi projektsiooni.

Kogu töö kõige aeganõudvam protsess oli rasterkaartide digitaliseerimine ja joonte väärtustamine kõrgusandmetega ning vigade kontroll. Rasterandmete kvaliteet on väga erinev (joonis 6, 7).



Joonis 6. Väljavõte 1: 10 000 topokaardi reljeefikihist, hea kvaliteedi näide.

Samakõrgusjooned on selged ja pidevad, neid on võimalik digitaliseerida poolautomaatselt, ilma kadudeta. Digitaliseerimisel ja digitaliseeritud isojoonte väärtustamisel kõrgusandmetega on vigade osakaal suhteliselt väike.



Joonis 7. Väljavõte 1: 10 000 topokaardi reljeefikihist, halva kvaliteedi näide.

Samakõrgusjooned ei ole selgelt eristatavad, esinevad katkendlikult ja ei ole pidevad. Poolautomaatset digitaliseerimist ei ole võimalik rakendada ilma kadudeta ja digitaliseerimise käigus esinevate vigade osatähtsus oleks väga suur. Selliseid kaardiruute esineb eriti sagedasti Saaremaa lõunaosas, kus reljeef on üldiselt tasane, absoluutkõrgused väikesed, aga eristuvad mõne meetrised lokaalsed tõusud ja langused. Sellistel juhtudel on otstarbekam samakõrgusjooned digitaliseerida käsitsi.

Joonte väärtustamisel atribuutidega peab olema väga hoolikas, kuna kõrgusandmed tuleb lugeda kaardilt, vastavalt etteantud sammule, pidevalt jälgides langus ja tõusumärke (märkides võib esineda vigu). Õigete atribuutide leidmine vahetult digitaliseerimise käigus võib teatud olukordades, kus reljeef ei järgi üldist langus või tõusutrendi, olla väga keeruline.

Vigade vältimiseks tuleks kogu piirkond digitaliseerida ja alustada joonte väärtustamist piirkonna servaaladelt, kus isojoonte kvaliteet on parem ja kõrgusarvud selgelt eristuvad ning alles siis anda atribuudid katkendlikele kõrgusjoontele.

Atribuudiväärtuste esmane kontrollimine ja leitud vigade kõrvaldamine joonetasandil ei välista ikkagi teatud vigade säilimist kõrgusjoonte andmefailis. Tavaliselt tulevad sellised jämedamad vead välja juba esimesel interpoleerimisel ja tulemuste visuaalsel hindamisel.

2.2.1 Interpoleerimine

Reljeefimudeli loomisel ja interpoleerimismeetodi valikul tuleb lähtuda lõpptulemuse vajadustest, ehk milliseid ruumilisi analüüse ja nähtuste modelleerimisi antud mudeli baasil tegema hakatakse. Meetodi valikul on kindlasti oluline ka see, mis tarkvaraga interpoleerimist teostatakse, antud juhul kasutatakse baastarkvarana MapInfo Professional ja rasterandmete töötlemiseks programmi Vertical Mapper. Käesoleva töö eesmärk ei ole mitte reljeefianalüüs iseenesest vaid eesmärgiks on leida sobivaimad reljeefimudelid automaatseks valglate arvutamiseks kohalikul tasandil ja ülepinnaliselt.

Arvestatades andmete üldist olemust ja vajadust töö erinevates etappides lähteandmetega manipuleerida, kasutatakse kõrgusmudeli interpoleerimiseks töö esimeses etapis võrdlusena kahte, lähima väärtuse (*Natural Neighbour*) ja kriging (*Kriging*) tehnikat.

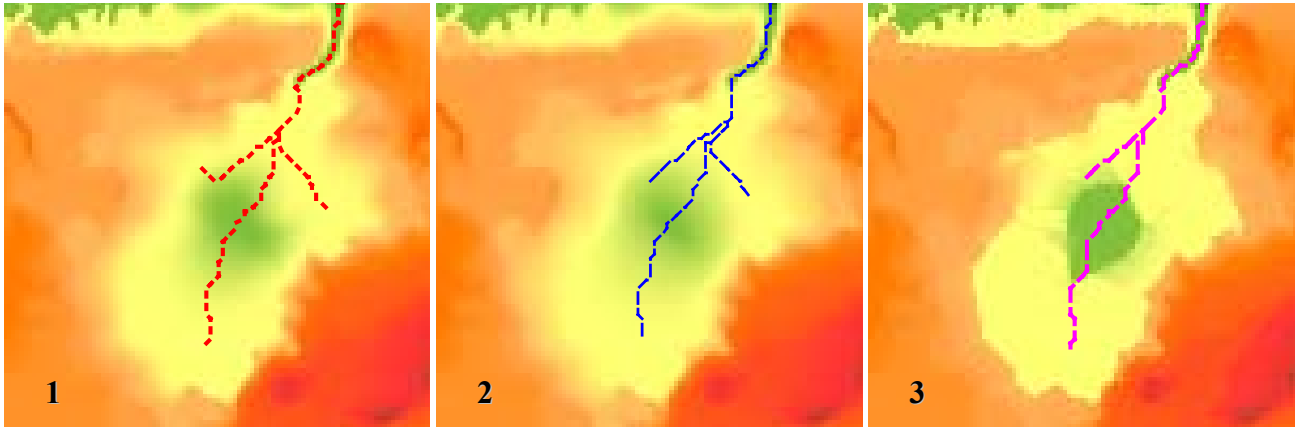
Vertical Mapper kasutab vektorandmetest interpoleerimise lähteandmetena MapInfo formaadis punktobjektide faili. Punktobjektid genereeritakse vastavalt vajadusele nii pindalaliste kui ka joonobjektide nurgapunktidest või piki joonobjekti või pindalalise objekti väliskontuuri vastavalt etteantud sammule. Antud töös tekitati punktifail samakõrgusjoonte nurgapunktidest, kuna automaatse digitaliseerimise käigus genereeriti nurgapunktid piisavalt suure sagedusega, ei olnud tarvidust piki joont nurgapunktide arvu suurendamiseks.

Ettevalmistava etapina valiti suvaline prooviruut ja teostati erinevate muutujatega kolm katselist interpoleerimist lähima väärtusega tehnikaga ja kolm kriging tehnikaga. Ettevalmistava etapi eesmärk oli võrrelda väiksemal alal visuaalselt, samade tingimustega interpoleeritud mudelite erinevusi ja mõjusid automaatselt leitavate vooluveekogude ja valglate leidmisele ning kasutada võrdlustulemusi edaspidise töö teostamiseks.

2.2.1.1 Ettevalmistav osa

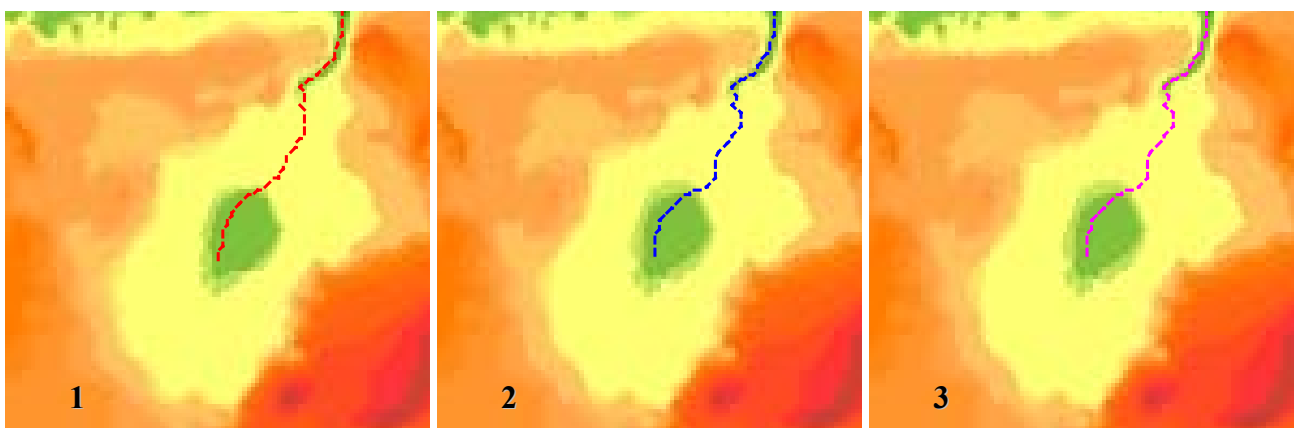
Esiteks tehti interpoleerimine lähima väärtusega tehnikaga, kõigil kolmel juhul jäeti muutumatuks 2 parameetrit, piksli suurus ja andmepunktide koondamise kaugus ning kõigil kolmel juhul kasutati nõlvakaldel põhinevat lahendit. Muudeti parameetreid kaldenurga faktor, kaalu faktor ja eksponent. Kaldenurga väärtusvahemikud saavad olla 0,001 – 999, kaalu faktori ja eksponendi vastavad muutujad saab määratleda vahemikus 0,1 – 10. Esimesel juhul anti kõikidele muutujatele väärtusteks 1. Teisel juhul suurendati kaldenurga faktorit 20-ni ja anti kaalufaktorile ning eksponendile keskmised võimalikest väärtustest, vastavalt 5 ja 5. Kolmandal juhul suurendati kaldenurga faktorit 300-ni ja kaalufaktorile ning eksponendile anti võimalikud suurimad väärtused, vastavalt 9 ja 9. Viimase sammuna leiti igale mudelile vastavad vooluveekogud (joonis 8).

Kolme erijuhu visuaalsel võrdlemisel selgub, et suurimad erinevused ilmnevad prooviala keskele jääval tasasel alal leitud vooluveekogudes. Esimese ja teise juhu omavahelised erinevused on selgelt väiksemad, kui mõlema erinevused kolmanda juhuga. Samas ilmneb, et kaldenurga faktori, kaalu faktori ja exponendi faktori muutmisest tulenevad erinevused ja mõjud vooluveekogude leidmisele on minimaalsed suurema langusega ja selgelt eristuvates voolusängides.



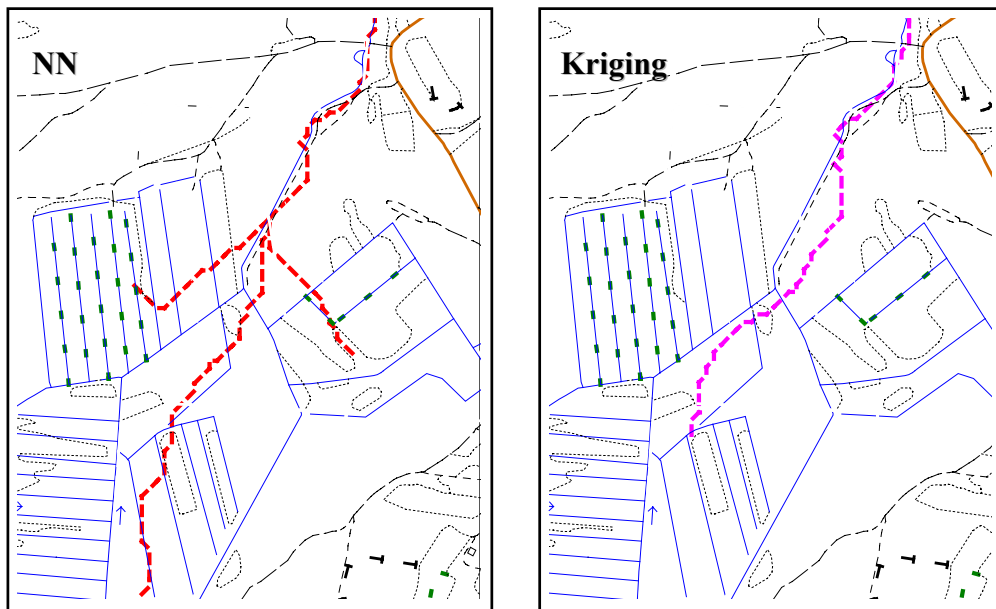
Joonis 8. Lähima väärtuseg tehnikaga interpoleeritud katselised mudelid ja automaatselt leitud vooluveekogud.

Kriging tehnikaga interpoleeritud mudelitel jäeti muutmata samuti piksli suurus ja sarnaste väärtustega punktide koondamise kaugus. Otsinguraadius ei saa üldjuhul olla suurem kui lähteandmete kaardiala suurus, *Lag* distantisi suurenedes muutuja kasvab lineaarselt mingi piirini (vt semivariogramm). Muudeti vastavalt andmepunktide otsinguraadiust astmeliselt 1, 5, 10 ja *Lag* distantisi 10, 15, 20 ja variogrammi häälestust (joonis 9).



Joonis 9. kriging tehnikaga interpoleeritud katselised mudelid ja automaatselt leitud vooluveekogud.

Kriging tehnikaga arvatud kolme mudeli visuaalsel võrdlemisel sisuliselt erinevusi ei ole, ka leitud vooluveekogud kattuvad kõigil kolmel juhul peaaegu terves ulatuses. Võrreldes kummagi tehnikaga leitud esimese juhu vooluveekogusid põhikaardi situatsiooniga (joonis 10).



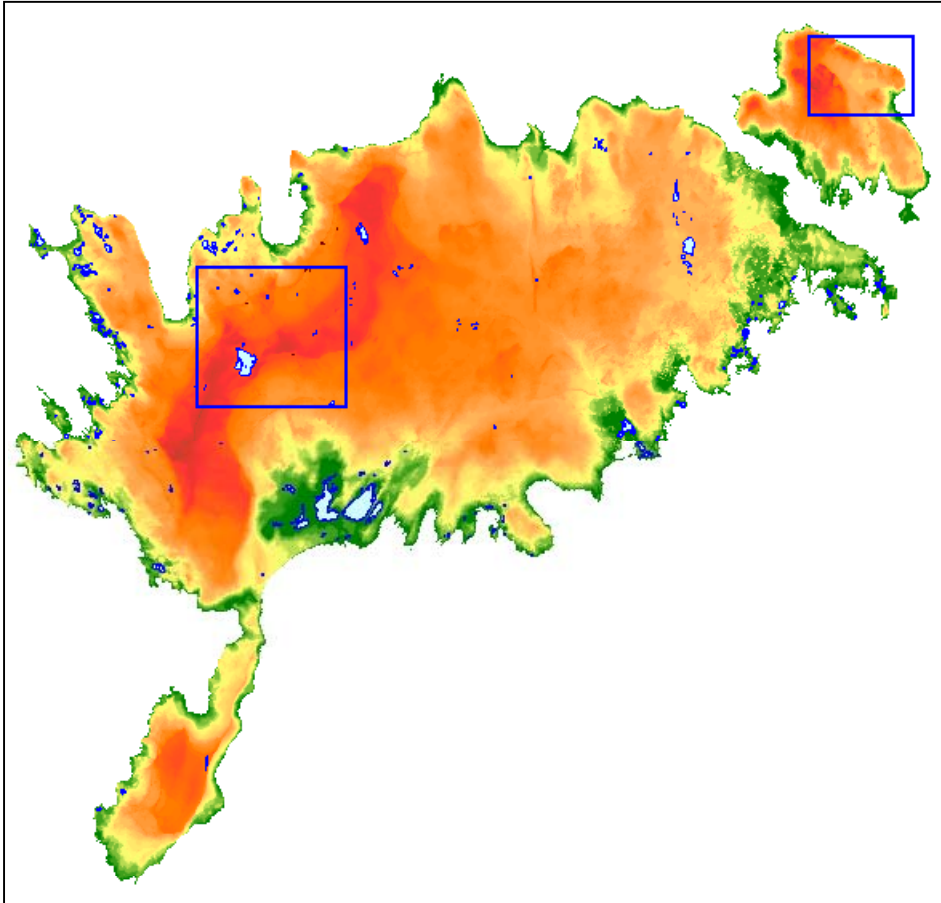
Joonis 10. Erinevate tehnikatega katseliselt leitud vooluveekogude ja põhikaardi situatsiooni võrdlus.

on näha, et mõlema tehnikaga leitud voolujooned langevad kokku omavahel ja järgivad küllaltki täpselt ka tegelikku voolusuunda prooviala põhjaosas, prooviala kesk ja lõunaosas järgib tegelikku voolusuunda paremini lähima väärtusega mudelilt leitud vooluveekogu.

Üldjoontes lähtutakse edaspidises töös katselise interpoleerimise tulemuste võrdlusandmetest. Võrdlusest selgub, et sellise tihedusega lähteandmete puhul on sobilikum kasutada lähima väärtusega interpoleerimise puhul kaldenurga faktori, kaalu faktori ja exponendi määramisel väikseid või alla keskmise väärtuseid. Kriging tehnika puhul väiksemal proovialal otsinguraadiuse ja *Lag* ditantsi muutmine märgatavaid erinevusi vooluvete leidmisel ei andnud, mistõttu edaspidi kasutatakse töös vastavalt väiksemaid ja keskmisi väärtuseid.

2.2.1.2 Tööpiirkondade valik

Lõpptulemuste erinevuste analüüsiks ja situatsioonide võrdlemiseks valiti tööpiirkondadeks reljeefiolemuselt erinevad alad Saaremaa loodeosas ja Muhu saare kirdeosas (joonis 11).

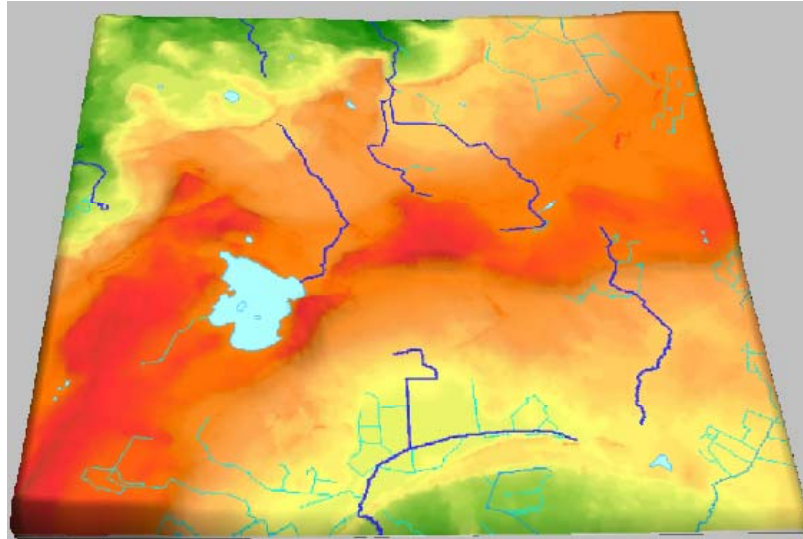


Joonis 11. Tööpiirkondade asendiskeem.

Alade valiku kriteeriumiks oli nende võimalikult suur omavaheline topograafilise situatsiooni erinevus. Töö lõppeesmärgist sõltuvalt, modelleerida saari ülepinnaliselt, tuleneb vajadus vaadelda hilisema hüdroloogilise modelleerimise seisukohast probleemseid erijuhte nagu sulglohud (karst) ja väga tasased ning maaparanduse käigus muudetud voolusängidega piirkonnad. Eraldi tähelepanu tuleb pöörata piirkondadele, kus lähteandmed mingil põhjusel oluliselt muudavad tegelikke voolusuundi ja mõjutavad läbi selle automaatse valglate leidmise täpsust.

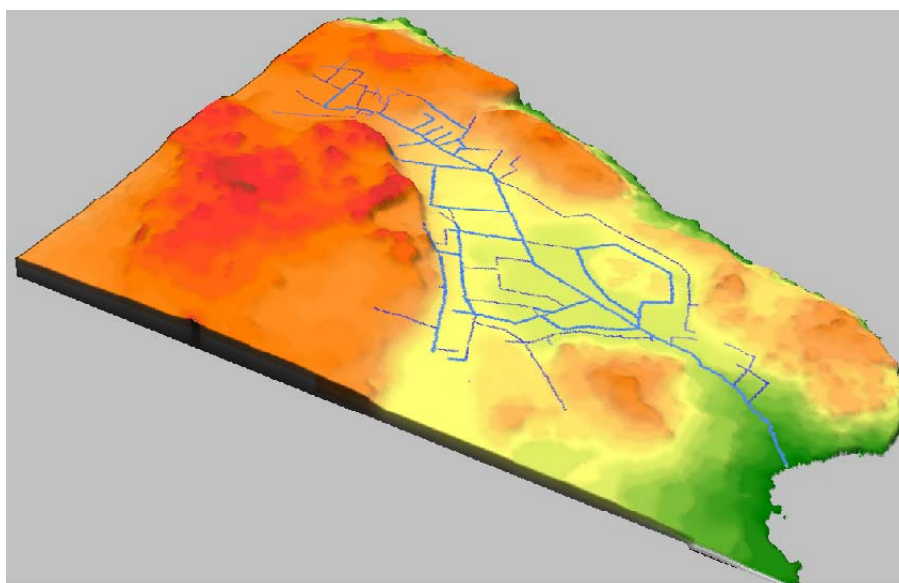
Saaremaa prooviala on automaatselt leitavate vooluveekogude ja valglate leidmise seisukohast väga keeruline piirkond. Prooviala asub Saaremaa „keskkõrgustikul“ kus absoluutkõrguste ja suhteliste kõrgute vahe on Eesti tingimustes üsnagi suur. Valdavalt on tegemist kuhjeliste pinnavormidega ja tüseda pinnakattega piirkonnaga. Peamised setted on

liivad, kruusad, eristusteta moreen, ning soosetted. Alale jääb läbivooluga suur järv, mitmed voolusängid suubuvad karsti, esineb väga sügavalt pinnasesse lõikuvaid voolusänge, mis reljeefi lähteandmetes ei kajastu ja seetõttu tekib situatsioon kus vesi piltlikult peaks voolama vastumäge, alal esineb ka mitu maaparandusobjekti (joonis 12).



Joonis 12. Saaremaa prooviruudu skeem.

Muhu saarel asuv prooviala on väga tasase reljeefiga ja väikese kallakuga ning väga tugevalt muudetud voolusängidega ning tiheda kraavitussvõrguga piirkond. Prooviala asub Muhu saare kirdeosas, kus absoluutsete ja suhteliste kõrguste vahed on väikesed. Geomorfoloogiliselt vahelduvad alal kuhjetasandikud sootasandike ja alvaritega. Peamised setted on liivad, kruusad ja erinevad soosetted. Ala pakub huvi eelkõige kui piirkond, kus lõpptulemuse täpsustamiseks on vaja tunduvalt mõjutada lähteandmeid (joonis 13).



Joonis 13. Muhu prooviruudu skeem.

2.2.1.3 Interpoleerimisparameetrite valik

Interpoleerimisparameetrite valimisel lähtuti ettevalmistava etapi tulemustest ja lähtuvalt lõppeedmärgist leida võimalikult täpselt ja omavahel võrreldavalt valglad nii globaalselt kui lokaalselt. Võrreldavuse saavutamiseks koostati *Natural Neighbour* ja *Kriging* tehnikatega kolm samade interpolateerimisparameetritega ja erineva pikslisuurusega mudelit vastavalt 20 m, 30 m ja 40 m. Piksli suuruse valikul on määravaks lähteandmete täpsus üheltpoolt ja lõpptulemuse usaldatavus ning täpsus teiselt poolt. Piksli suuruse valikul on määravaks ka uurimisala suurus ja interpolateerimistehnika, kuna lähteandmeteks on 1 : 10 000 paberkaardi samakõrgusjooned ei ole otstarbekas koostada mudelit väiksema piksli küljepikkusega kui 10 m. Liiga väike piksel selliste lähteandmete juures tõstaks oluliselt arvutusmahtu (eriti *Kriging* tehnika puhul) ja tekitaks arvutusmüra, millest kokkuvõttes mudeli täpsus väheneks. Hüdroloogilise modelleerimise seisukohast on samuti oluline valida optimaalne piksli suurus sõltuvalt lähteandmete tihedusest. Valides liiga väikese piksli küljepikkuse genereeritakse suur hulk ühel kõrgusel, ilma kaldenurga ja suunata piksleid, mis raskendavad hiljem vooluveekogude ja valglate leidmist (Thompson, Bell and Butler, 2001).

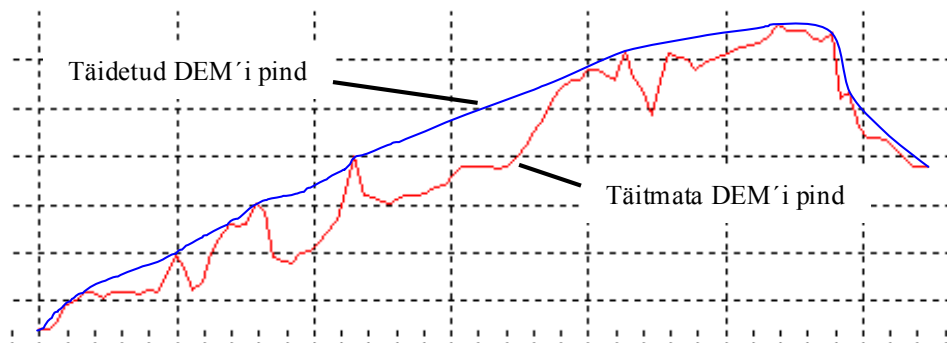
Liiga suure küljepikkusega piksel muudaks lõpptulemuse usaldatavust kuna teatud kohtades, kus lähteandmete tihedus on suur, nagu järsemad positiivsed ja negatiivsed nõlvad, annaks liiga suur piksel arvutustes ebasobiva tulemuse. Tulemus mõjutaks tunduvalt just selliseid morfoomeetrilisi näitajaid nagu nõlvakalle ja voolusuund, mis on olulised valglade ja vooluveekogude automaatseks leidmiseks.

2.3 Automaatne valglate ja vooluvete leidmine DEM'ist

Reljeefist on looduslikus maastikus otseselt mõjutatud vooluveekogude paiknemine, voolu hulk, selle kõikumine ja energeetiline potentsiaal. Automaatne morfomeetriseliste näitajate leidmine DEM'ist on arvestatav alternatiiv välitöödel tehtavatele mõõdistamistele ja kaardi tootmisele. DEM'i kasutatavus ja sobivus, erineva täpsusklassi modelleerimiste läbiviimiseks sõltub lähteandmete kvaliteedist ning interpoleeritud mudeli resolutsioonist. Alternatiivina DEM'ist valglate leidmisele on katseliselt leitud valglaid eelnevalt kaardistatud vektorkujul vooluveekogude nurgapunktidest, kasutatades *Triangular Irregular Network* (TIN) meetodit (Dillabaugh, 2002).

Automaatne vooluvete ja valglatega seotud näitajate leidmine on vähem subjektiivne ja arvutuste käigus leitakse rohkem parameetreid, kui traditsiooniliste käsitsi tehtavate mõõdistuste puhul (Tribe, 1992). Eeliseks võib lugeda ka seda, et andmed on digitaalkujul, mis võimaldab nende edasist analüüsi erinevate GIS vahenditega. Hilisemate vigade vältimiseks on tähtis leida sobiv interpoleerimisalgoritm (Desment, 1997). Väga oluline on jälgida, et vooluvete ja valglate algoritmid töötaksid korrektselt ka väga tasastel aladel (Mackay, Band, 1998).

DEM'i resolutsioonist ja interpoleerimisvigadest tulenevad vead (augud, väärlõhud, liiga väikese kaldega alad) mõjutavad hüdroloogiliste parameetrite leidmise täpsust tunduvalt rohkem tasastel aladel kui mägedes, arvutuste tegemiseks tuleb augud täita (joonis 14).



Jooni 14. Näide täitmata ja täidetud DEM'i ristlõikest

Reljeefimudeli horisontaalse- ja vertikaalse resolutsiooni suhe omab märkimisväärset mõju genereeritava reljeefimudeli parameetritele, mis on seotud kõrguserinevustega. Näiteks nõlvakalle leitakse kahe piksli vahelise nurga jagamisel nendevahelise kaugusega, kuna kõrgusandmed antakse tihti täisarvudena mõjutab see nurga suurust oluliselt, eriti tasastel aladel, kus väiksegi muutus vertikaalses suunas omab suurt tähtsust. Väga suuri resolutsioonist tulenevaid ebatäpsusi ei saa vältida ega kaotada ka silumiste ja filrite

kasutamiseks. Liiga suur resolutsioon ei võimalda kõrgusinfot edasi anda piisavalt täpselt, samas liiga väike resolutsioon on arvutusmahukas ja kannab kaasa arvutustel tekkivat „müra“.

Hüdroloogiliste parameetrite täpsuse sõltuvust DEM'i resolutsioonist on uurinud mitmed uurijad (Garbrecht and Starks 1995, Zhang and Montgomery 1994, Barsington and Richards 1996, jt). Garbrecht ja Martz (1994) võtsid aluseks 30 m horisontaallahutusega DEM'i ja vähendasid järk-järgult piksli täpsust. Leiti rasti koefitsient jagades piksli pindala keskmise alamvalgla pindalaga. Täpsusanalüüs leidis, et piksli suurus peab olema väiksem kui 5% alamvalglast, et leida valgla parameetrid 10% täpsusega. Jõuti järeldusele, et ei saa toota täpsemaid andmeid kui on DEM'i resolutsioon, mis ei võimalda täpsemalt eraldada vooluvetevõrku ega valgla piire. Vastavalt soovitatavale tulemuse täpsusele tuleb valida ka resolutsioon.

Zhang ja Montgomery (1994) kasutasid uuringute läbiviimisel suure resolutsiooniga DEM'e ja jõudsid järeldusele et 10 m täpsusega rastermudel peaks olema hüdroloogiliste parameetrite modelleerimiseks sobilik enamikul juhtudel.

Garbrecht ja Marz (1996) lisavad, et resolutsiooni valik ja sobilikkus sõltuvad ka uuringuala suuruselt ja reljeefi olemusest. Modelleerimise lõpptulemuse täpsust mõjutavad tunduvalt rohkem suure resolutsiooniga DEM'id (Vivoni, 2003). Piirangud seab ka arvutusmahukas ja arvutusteks kuluv aeg ning arvutiresurss, mitte ainult DEM'i koostamisel vaid ka hilisemal analüüsil. Resolutsiooni valik sõltub kindlasti ka modelleerimise algoritmist, kui arvutused tehakse alamvalgla baasil, ei pruugi resolutsioon olla väga väike, kuna kõik väärtused keskmistatakse alamvalgla ulatuses ning väiksemad vead ja müra ei mõjuta arvutusi nii palju.

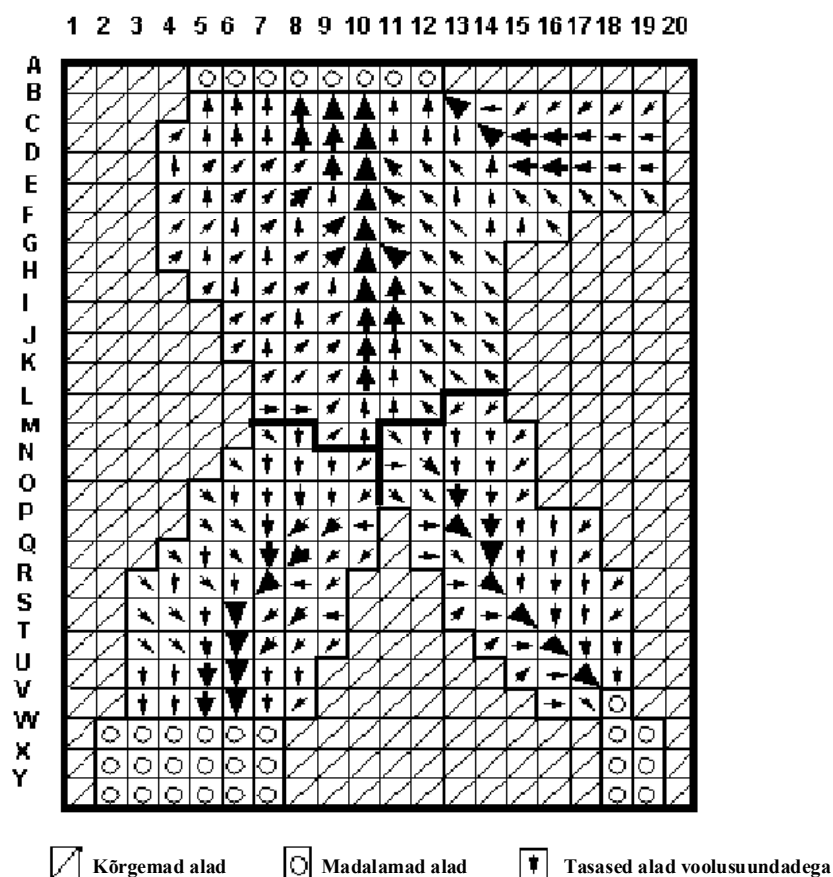
Kokkuvõtteks ei ole olemas unikaalset resolutsiooni mis sobiks kõikidele algandmetele ja hilisematele modelleerimistele ning analüüsidele. Valik tuleb teha sõltuvalt algandmete täpsusest, nähtuse iseloomust, uuringuala ulatusest, soovitud tulemuse täpsusest, arvutiressursist ja ka hinnast.

On mitmeid meetodeid kuidas käsitleda auke, sulglohe ja tasaseid alasid DEM'ist automaatses valglate ja vooluvete leidmise protsessis. Band (1986) täidab augud väärtuseni, kus vool ei katke, tingimusel et vesi ei voolaks samasse pikslisse tagasi. Callaghan ja Mark (1984) siluvad mudelit filtritega, Jenson ja Dominge (1988) töötavad välja meetodi, kus vaadatakse mudelit tervikuna ja võimaldades täita DEM'i kuni lohu või augu madalaima väljavoolu kõrguseni. Teatud juhtudel (lisaks looduslikult esinevatele) on sulglohud tekkinud DEM'i interpoleerimise käigus, kus arvutusmüra on tekitanud takistused vooluteedele. Sellisel juhul on nende takistuste eemaldamine või silumine sama oluline kui aukude täitmine (Martz and Garbrecht 1999). Parim lahendus on kompleksne, kus täidetakse augud ja eemaldatakse takistused vooluteedelt.

Teatud juhtudel ei saa DEM'i täitmist ja silumist vooluteede leidmiseks kasutada. Selliseid olukordi võib esineda näiteks siis, kui mudeliala on tervikuna looduslik sulglohk.

Aukude täitmine ei lahenda tasaste alade tõlgendamise probleeme vooluteede leidmisel. Tasased alad ei moodustu mitte ainult sulglohkude täitmisel, vaid võivad olla ka liiga suure vertikaalse ja horisontaalse lahutusega DEM'i interpoleerimise tulemus ning tasased alad eksisteerivad looduses ka tegelikult. Tasastel aladel voolusuundade leidmise probleemiga on tegelenud mitmed uurijad, nt Jenson ja Dominge 1988, Martz ja De Jong 1988, Garbrecht ja Martz 1995. Pinnavool toimub kõrgematelt aladelt madalamatele aladele.

Selle lähenemise tulemuseks on koonduva voolusuuna mudel üle madala ala mis langeb kokku looduses tegelikult esinevaga (Garbrecht, 1996) (joonis 15).



Joonis 15. Voolusuunad tasasel alal, noole suurus sõltuvalt ülesvoolu kogumisala suurusest (Garbrecht and Martz, 1997b).

Vetevõrgu saab leida DEM'ist erineva tihedusega ja ligilähedaselt. Vetevõrgu erinevad näitajad sõltuvad sellest, kuidas vetevõrk defineeritakse. Vastavalt sellele leitakse topoloogia ja morfoomeetria näitajad, kuna nende leidmine on omavahel tihedalt seotud. Õigete lähteandmete täpsusest sõltub leitava vetevõrgu täpsus.

Eristuvad kaks peamist meetodit vetevõrgu defineerimiseks. Konstantse vooluläve ja nõlvakaldest sõltuv kriitilise kogumisala meetod (Montgomery and Foufoula-Gregoriou, 1993, Tribe, 1992). Konstantne lävimeetod eeldab, et nõlvadel esineb hajus vool ja

voolusängides kontsentreeritud vool. Teine, nõlvakaldest sõltuva kriitilise kogumisala meetod eeldab, et vooluvetevõrk on erosiooni lävi, st et vetevõrk on erosiooni tagajärg, ehk aeglase voolu üleminek kiirele voolule (üleminekud nõlva pikiprofiilis). Nõlva pikkus on oluline, sest mida suurem on kallakliku ala ulatus, seda suurem on voolava vee koondumine (Laas, 2002).

Peamine meetodite erinevus seisneb nõlva ruumilises varieeruvuses. Nõlvast sõltuva meetodiga leitud vetevõrk on valgla järsematel aladel tihedam kui looduses esinev vetevõrk. Nõlvameetodi miinuseks on vajadus kasutada väga hea horisontaal- ja vertikaallahutusega DEM'i, muidu ei ole võimalik kallakuid leida. Näiteks 30 m horisontaallahutusega ja 1 m vertikaallahutusega DEM näitab nõlvakallet 0, 0,03 või väikest tõusu. Teine puudus on, et leitud vetevõrk ei lange kokku tegeliku vetevõrguga, seda eriti tasastel aladel, kus reljefierinevused on väikesed ja algandmed ei peegelda voolusänge.

Automaatselt DEM'ist valglate ja vooluvete leidmiseks kasutatakse MapInfo Professional baastarkvaral töötavat lisavahendit StreamBuilder. StreamBuilder lähtub tööprotsessis kahest põhilisest DEM'i käsitlemise ideoloogiast mille väljaarendamises on osalenud paljud uurijad ja mida on ajas järk järgult täiendatud. Järgnevalt ülevaade algoritmidest.

2.3.1 DEM'i käsitlemise vanem, kaheksa voolusuuna ideoloogia

1986 kirjeldab Douglas väljatöötatud tehnikat, kuidas DEM andmetest leida veelahkmejooned, voolujooned, valglat jt. hüdroloogilised parameetrid. Tehnika baseerub naabrussuhetel ja lähima väärtuse analüüsil, kus arvutused ja otsused tehakse rastrielemendiga, mille väärtus saadakse ümbritseva kaheksa piksli väärtusi arvestades. Näiteks rastrielement, mille kõrgusväärtus on sama kõikide ümbritsevate pikslite kõrgustega, vastab tingimustele, et seda rastrielementi saab klassifitseerida kui osa lokaalsest tasandikust. Naabrussuhtel põhinev lähenemine (Jenson and Dominge, 1988) on sarnane mitmetele eelnevatele väljatöötatud meetoditele, kuid erineb selle poolest, et augud, lohud ja tasased alad DEM'is täidetakse täielikult. Uurimine näitab et depressioonid (väärlohud) DEM'is, mis on ümbritsetud kõrgemate aladega, segavad hüdroloogiliste voolusuundade leidmist. DEM'is esinevad depressioonid on kahesugused – interpoleerimisel tekkinud vead, enamasti mõne piksli suurused ja maastikul realselt esinevad sulglohud, näitks karst või mõhnade vahelised järved. Mitmed uurijad (Callaghan and Mark jt.) on üritanud ka varem vältida DEM'is esinevaid auke nn DEM'i silumise teel, kuid silumine võimaldab kaotada vaid madalamad lohud.

Teine lähenemine on DEM'is esinevate aukude kõrvaldamine selle täitmise teel (Marks 1984, Douglas 1986), kus lohu kõikidele pikslitele omistatakse ümbritseva kõrgema ala kõige madalama piksli väärtus. Täitmise tulemusena tekivad tasandikud, mis teatud juhtudel võivad olla ulatuslikud ja omada mitut väljavoolupunkti. Valglate ja vooluvete arvutuste tegemiseks

tuleb algsest DEM'ist genereerida kolm rastermudelit: täidetud DEM, voolusuundade DEM (*Flow direction*) ja vooluakmulatsioonide DEM (*Flow accumulation*).

Täitmine

Peaaegu kõikides DEM'ides esineb lohke, mis mõjutavad vooluteed või katkestavad nn pideva voolu, hüdroloogiliste arvutuste tegemiseks tuleb DEM täita. Iga pikslile lohus omistatakse ümbritseva kõrgema ala madalaima punkti kõrgusväärtus. Läbi selle on täidetud DEM'i iga piksel osake vähemalt ühest pidevalt kahanevast, andmestiku serva suunas kulgevast vooluteest. Voolutee konstrueeritakse pikslitest, mis külgnevad kaheksast suunast pikslitega, mille väärtus pidevalt kahaneb. Erijuhtudel kui huvitavad vooluteed (juhul kui sulglohk on väga ulatuslik) ka maastikul esineva sulglohu sees, arvutatakse vooluteed täitmata DEM'i baasil.

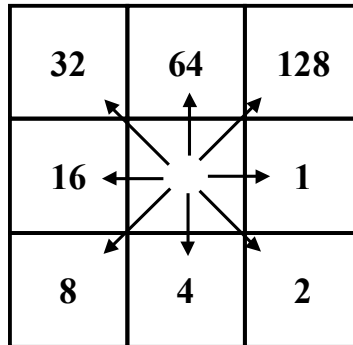
Täitmise meetod on sisuliselt sama, mida kirjeldab Marks (1984), kus valgla piirid leitakse pikslitest millel ei ole madalamaid naaberpunkte, vastavalt sellele leitakse DEM'i madalaimad pikslid ja nende pikslite valgla, mida saab hiljem kasutada osana põhivalgla leidmisel. See meetod aga ei suuda eraldada suuri tasaseid alasid mitmeks väljavoolupunktiga valgla. Uuem lähenemine võimaldab leida ja jagada tasased alad mitmeks valgla juhul, kui tasasel alal esineb rohkem kui üks väljavoolupunkt.

Põhimõtteline DEM'täitmise algoritm:

1. täida üksiku piksli auk, suurendades selle kõrgusväärtust kuni madalaima kõrgusväärtusega naabri väärtuseni juhul kui naaberpiksli kõrgusväärtus on augu enda väärtusest kõrgem,
2. arvuta voolusuunad,
3. ruumiliselt seotud defineerimata voolusuundadega (defineerimiseks oleks vajalik ülesmäge vool) piksligrupile voolu suundadest üheselt määratletud valgla leidmine,
4. külgnevate valglate paaride jaoks kõrguspunktide tabeli ehitamine, moodusta valgla piiride andmetabel,
5. leia iga valgla madalaim piksel ehk väljavoolupunkt, samade väärtuste puhul vali neist üks (kolme sama väärtusega punkti puhul vali keskmine),
6. iga valgla puhul järgi voolusuunda kuni DEM'i servani, või kuni voolutee tuleb ringiga algsesse pikslisse tagasi. Paranda tagasipöörduvad teed leides valgla, mis koosneb „silmusest“ ja kustutades väljavoolupunktid grupi liikmete vahel ning leia uus tervikvalgla ja väljavoolupunkt,
7. Leia iga valgla kõrgeim väljavoolupunkt, mis ongi veelahkempiiriks ning suurenda kõikide valgla pikslite väärtust kõrgeima väljavoolupunkti väärtuseni.

Voolusuund

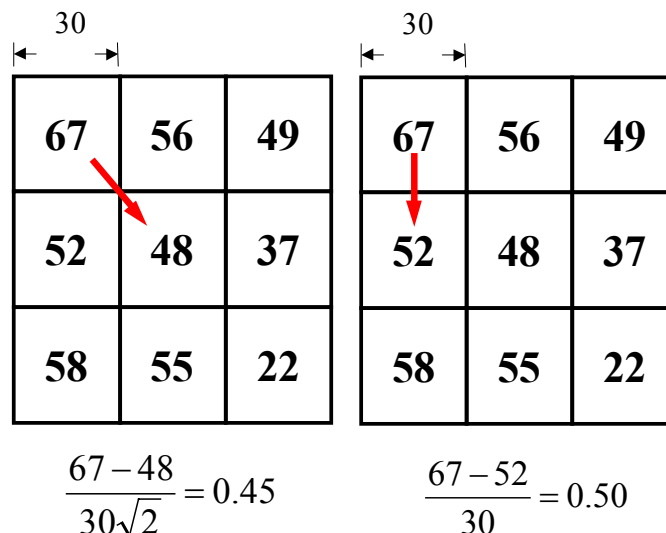
Piksli voolusuund on suund, mida järgiks vesi pikslit välja voolates. Voolusuund kodeeritakse sõltuvalt sellest, millises suunas kaheksast võimalikust pikslit x vool suundub (joonis 16).



Joonis 16. Piksli voolusuunad ja koodid.

Kui kaks või enam pikslit on suurima kauguskaalutud languse puhul võrdsed, määratakse voolusuund loogiliselt. Näiteks kui ühe serva 3 külgneva piksli langused on võrdsed valitakse voolusuunaks keskmise piksli suund.

Kui vastaskülgede kahel pikslil on võrdne langus, siis valitakse suvaliselt üks langus. Kui kõigil pikslitel on kõrgusväärtus võrdne või suurem võrreldes keskmise piksliga, võtab voolusuuna määramine kõige rohkem aega. Sellisel juhul asetseb piksel tasapinnal ja väljavoolusuund on teadmata. Neljanda tingimuse pikslid leitakse kõige viimasena järkjärgulise lähendamise protsessis. Iga lähendamise puhul antakse pikslitele naaberpiksli suund (kui see on kindlaksmääratud ja ei vii tagasi testitava piksli juurde), kuni kõigil pikslitel on suund määratud.



Jooni 17. Kauguskaalutud languse arvutamise näide (Tarboton 2004).

Põhimõtteline DEM'ist voolusuundade leidmise algoritm:

1. Määra andmestiku servaga või uuritava ala maskiga piirnevate pikslite voolusuunaks serva või maski suund (suund nende poole).

2. Pikslitel, millele ei saa määrata suunda, arvuta kõrguse kauguskaalutud langus piksli 8 naabri kohta.
3. Uuri langusväärtust, et kindlaks määrata suurima langusega naaber ja seejärel: kui suurim langus on väiksem kui 0, anna negatiivne voolusuund, et viidata määramatusle. Sellist olukorda ei tohiks täidetud DEM'i puhul juhtuda. Kui suurim langus on suurem või võrdne 0-ga ja ilmneb ainult ühe naabri puhul, määra voolusuund selle naabri poole. Kui suurim langus on võrdne 0-ga ja ilmneb rohkem kui ühel naabril, määra voolusuund loogiliselt. Kui suurim langus on võrdne 0-ga ja ilmneb rohkem kui ühel naabril, kodeeri naabrite asukohad nende asukoha koode summeerides.
4. Uuri iga pikslit, millel ei ole negatiivset koodi ega koodi 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, või 128, suurima langusega naaberpiksleid. Kui naabril on 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, või 128, voolusuund ja naaber ei voola keskmise piksli suunas, määra keskmisele pikslile sama voolusuund, mis on tema naabril.
5. Korda punktis neli tehtut kuni kõigil pikslitel on voolusuund.
6. Kõigile pikslitele, mis pole võrdsed 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, või 128-ga, määra negatiivne voolusuund.

Voolusuuna kontseptsiooni on kasutanud nii Marks et al. (1984) kui ka O'Callaghan ja Mark (1984). Kumbki neist ei kasutanud tingimust kolm, pikslite loogikat, ega laiendanud tegevust tingimus neli pikslite leidmiseks. Kui täidetud DEM'i puhul kasutada voolusuuna protseduuri, on kõigil pikslitel voolusuunaväärtus leitav, kuna täites augud, on kõigil pikslitel voolutee suund andmekogu servale.

Vooluakumulatsioon

Kolmanda võimalusena on võimalik voolusuuna andmeid kasutada, et luua voolu akumulatsiooni andmestik, kus igale pikslile on antud väärtus, mis on võrdne pikslite arvuga (O'Callaghan and Mark, 1984). Pikslid, mille vooluakumulatsiooni väärtus on 0 (kuhu ükski teine piksel ei voola) vastavad üldiselt lokaalsele kõrgendikule. Kuna täidetud DEM'i puhul on igal pikslil tee andmestiku servale, siis piirväärtustest kõrgemate väärtustega pikslid moodustavad mustri, mis langeb täielikult kokku drenivõrgustikuga. Kui piirväärtust tõsta, väheneb drenivõrgustiku tihedus.

Valglate leidmine

Valgla kirjeldamiseks on vaja teada nii voolusuuna andmestikku kui ka teist "starter"/alg-andmestikku. Starterandmestik koosneb taustaväärtustest (-1), millest "alg"pikslid või piksligrupid on soovitud valgla väljavoolu punktides sisestatud ning kus igal algpikslil või -grupil on oma unikaalne positiivne väärtus.

Starterandmestiku loomiseks on vaja tarkvara, mis näitaks värvidega kodeeritult voolusuunda ja voolu akumulatsiooni andmestikke. Kursoriga määratakse joone ja proovi väljavoolupunktide koordinaadid juhul, kui valgalsid tuleb kirjeldada hüdroloogilisest

seisukohast või kirjeldada tuleb asukohti, kust veesette keemiliseks analüüsiks vajalikud proovid koguti.

Suuremate kujutiste kirjeldamiseks (nt tammid) tuleb sisestada kujutist iseloomustavate pikslite kogum. Kui valgla tuleb kirjeldada nt karstikoobaste jaoks, kasutatakse “start” grupina aukude täitmise protseduurist eraldatud piksleid. Voolusuuna andmestikku kasutatakse siis valgla loomisel, et uuesti määrata taustapikslitele “start” piksli väärtus, mille suunas nad voolavad.

Automaatne alamvalglate leidmine

Mõnel juhul on hüdrooloogilisest aspektist lähtudes vajalik valgla jagada peamiste lisajõgede alusel alamvalglateks. Band (1986) töötas välja tehnika, mille abil on võimalik alamvalglaid kirjeldada kui isoleerida DEM’i lõikuvad reljeefelemendid, eeldades et aukudel ja madalikel on eriline väärtus. Peamise lisajõe määramine sõltub andmestikust ja taotlusest, kuid ta võib olla seotud ka lisajõe alamvalglaga. Et luua stardiandmestik lisajõele, mille alamvalgla on suurem kui kasutaja poolt määratud piirväärtus, võib kasutada automaatset alamvalglate leidmise protseduuri.

Suudmeala väärtuseks on voolu akumulatsiooni väärtuse tõus voolusuunas. Alamvalgla tulemused algavad sealt, kus neile pikslitele, millel on nii voolu akumulatsiooniväärtus kui ka suudmeala väärtus suurem 10 piksli areaali piirväärtusest, on antud unikaalne positiivne number.

Põhimõtteline DEM’ist alamvalglate leidmise algoritm:

1. Alamvalgala miinimumala piiramiseks defineeri ala piirväärtus (tavaliselt pikslites).
2. Arvuta iga piksli jaoks suudmeala väärtus lahutades voolu piksli akumulatsiooni väärtuse, milles ta voolab, selle piksli omaenda vooluakumulatsiooni väärtusest.
3. Iga piksli jaoks, mille on nii vooluakumulatsiooni väärtus kui ka suudmeala väärtus suurem ala piirväärtusest, määra pikslile starter ehk algandmestikus unikaalne positiivne väärtus.
4. Anna igale järelejäänud pikslile väärtus -1 .

2.3.2 DEM’i käsitlemise uuem, kaldenurgal põhinev ideoloogia

Varasema ja lihtsaima voolusuundade leidmise meetodi puhul saab voolu määrata kaheksa naaberpiksli suunas otse või diagonaalis suurema kaldenurga suunas, seda on nimetatud ka D8 meetodiks. Meetodi töötasid välja Callaghan ja Mark 1984 ja seda on edasi arendatud mitmete autorite poolt (Jenson and Dominge 1988, Tarboton 1988 jt). Ülesnõlva ala ehk akumulatsiooniala A oleks võrdne pikslite arvuga, mis läbi piksli voolavad, a ehk valgla väljenduks A/L , kus L on piksli laius.

D8 puuduseks on, et vool saab toimuda vaid ühes kaheksast võimalikust suunast 45° vahedega. Selle puuduse ületamiseks on loodud erinevaid nn mitme voolusuuna meetodeid (Quinn 1991, Freeman 1991), mis lubavad veel voolata mitmes suunas. Seda tüüpi mudeleid

tuntakse ka nimetuse MS (*multiple flowdirections based on slope*) all, kus vool jagatakse iga madalama kõrgusväärtusega naaberpiksli vahel proportsionaalselt nendevahelise kaldenurgaga. Üks algoritmidest (Lea, 1992) kasutab pikslit ja aspekti voolusuundade leidmiseks.

Meetodid vooluvete ja valglate leidmiseks:

1. Vanim O'Gallaghan ja Mark (1984), meetod kus vool suunatakse igast pikslist ühe väiksema kõrgusväärtusega kaheksa naabri suunas otse või diagonaalselt sõltuvalt nõlvakaldest. Meetodit on palju edasi arendatud mitmete uurijate poolt, enim kasutatud Jenson ja Dominge 1988, Mark 1988 jt. Nimetus **D8** (*eight flow directions*)
2. Quinn ja Freeman (1991) töötavad välja meetodi, kus vool suunatakse osade kaupa igasse madalamasse naaberpikslisse sõltuvalt kaldenurga suurusest. Meetodil on puudus, et vool hajub kõikide madalamal asuvate pikslite vahel. Dispersioon on omane kõikidele meetoditele, mis jagavad voolu ühest pikslist rohkem kui ühe madalama kõrgusväärtusega naaberpiksli vahel. Nimetus **MS** (*multiple directions based on slope*).
3. Lea (1992) töötab välja algoritmi vooluteede leidmiseks, kus aspekt on seotud iga piksliga. Vool suunatakse nagu pall, mis veereb mööda tasapinda alates iga piksli tsentrist. Tasapinnalise piksli nurgad on õigel kõrgusel, nurkade kõrgused saadakse, kui keskmistatakse külgnevate pikslite tsentroidide kõrgused. Meetodi eelis on see, et leitakse katkematu voolusuund (nurk 0 ja 2π vahel) ilma dispersioonita. Nimetus **Lea**.
4. Costa-Cabral ja Burges (1994) laiendatakse Lea meetodit. Rastri kõrgusväärtused antakse edasi pigem piksli nurkade kaudu kui piksli tsentroidi väärtusena ja tasapind kohandatakse iga piksli jaoks. Nimetus **DEMON** (*digital elevation model networks*).
5. Tarboton DG, (1997) Uus meetod. Nimetus D_∞ (*an infinite number of possible single flow directions*).

Ülesnõlva ala leitakse läbi täpsustatud vooluteede. Ülesnõlva ala leidmise eeldus, et tasapind vastab igale pikslile vajab täpsustust, sest on vaja ainult 3 punkti tasandiku määramiseks. Täiesti tasane ala on voolusuuna leidmisel probleem, sest juhul, kui kõik nurgad on võrdsed, voolu ei teki. Nii Lea kui DEMON on selles suhtes tundlikud, võib tekkida nn voolusilmus, kus vool naaseb alati pikslisse tagasi. Selliseid vigu on väga raske siluda ja programmeerimisel tuleks ette näha tohutul hulgal erijuhtusid kus tuleks käituda standardlahendusest erinevalt.

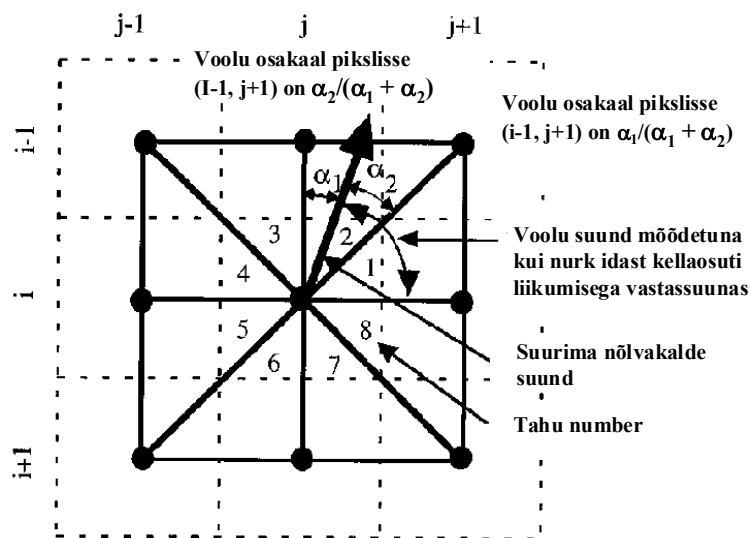
Uue meetodi loomisele tõukasid järgnevad probleemid:

- vajalik on vältida vooludispersiooni,
- vajadus vältida rastri „kallutamist“, rastrile kaldenurga andmine
- voolusuuna leidmise täpsus,
- vajadus hoida andmeid lihtsal ja efektiivsel maatrikskujul
- raskused keeruliste kohtade käsitlemisel DEM'is (sadulad, augud, tasandikud).

Erinevatel meetoditel on mitmete punktide puhul omad tugevad küljed, kus ka täpsus on talutav, kuid viimane punkt on reeglina komistuskiviks kõigile.

Voolusuuna leidmine

Ühekordne voolusuund (kui lõplik suurus 0 ja 2π vahel) leitakse kui kõige järsem allavoolu nõlv kaheksast tekkinud kolmnurgast 3×3 piksliga aknas, mille tsentriks on piksel millele nurki arvutatakse. Kolmnurkade kasutamine väldib täidetud tasandiku ja kõrgema naabri mõju allavoolu suuna leidmisel. Kui suund ei lange kokku ühega suunadest (0, $\pi/2$, π ja $3\pi/2$) või diagonaaliga ($\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$ ja $7\pi/4$), arvutatakse ülesvoolu ala jagades voolu kahe allavoolu asuva piksli vahel sõltuvalt kui ligilähedane on voolunurk nurgale piksli tsentri vahel. Salvestatakse vaid üks number mis näitab voolusuunda ja hajumine võib toimuda, kuid on minimaalne, vool ei saagi olla võrdne rohkem kui 2 piksli vahel (joonis 18).



Joonis 18. Voolu suund, defineerituna kui suurima kaldega nurk tasapinnaliste kolmnurksete tahkude vahel (Tarboton 1997).

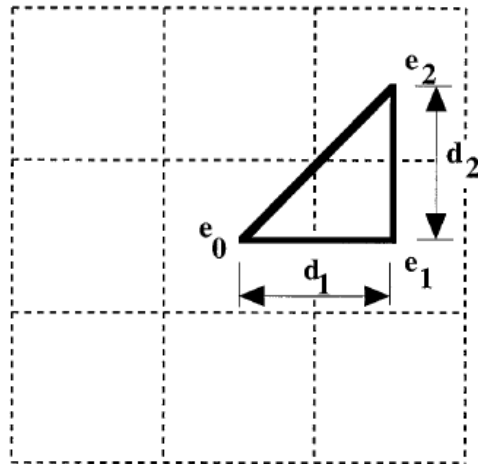
Moodustatakse kaheksa tasapinnalist kolmnurka iga piksli ja tema kaheksa naabri vahel, kõigil on allanõlva vektor, mis tõmmatuna keskpunktist moodustab nurga, mis võib jääda 45° suuruse tahu sisse või välja. Kui vektori nurk jääb tahu sisse on see selle tahu järsem nõlv, kui vektor jääb tahust välja kasutatakse järsema nõlva suunda mis seondub selle kolmnurga järsema nurgaga. Voolusuund moodustub kõigi kaheksa kolmnurga kõige järsema nõlva suunas.

Protseduur algab ühe kolmnurga kaldenurga leidmisest, kus nõlv esitatakse vektoriga (s_1, s_2) kus:

$$s_1 = (e_0 - e_1) / d_1$$

$$s_2 = (e_1 - e_2) / d_2$$

ja e_i ja d_i on kõrgus ja kaugus pikslite vahel (joonis 19).



Joonis 19. Muutujate defineerimine, ühe kolmnurga kaldenurga arvutamiseks (Tarboton 1997).

Nõlva suund ja suurus on :

$$r = \tan^{-1} (s_2 / s_1)$$

$$s = (s_1^2 / s_2^2)^{1/2}$$

Kui r ei ole vahemikus $(0, \tan^{-1} (d_2/d_1))$, siis r tuleb määrata kui suund sobiva nurga suunas ja s kui nurga kallakus.

$$\text{kui } r < 0, \quad r = 0, \quad s = s_1$$

$$\text{kui } r > \tan^{-1} (d_2/d_1), \quad r = \tan^{-1} (d_2/d_1)$$

$$s = (e_0 - e_2)/(d_1^2 + d_2^2)^{1/2}$$

Kokkuleppeliselt e_0 on piksli keskpunkt, e_1 on naaberpiksli keskpunkt ja e_2 on diagonaalpunkt. Nurk on seotud suurima (kaheksa kolmnurga) kaldenurgaga ($r' = r$ kolmnurgast millel on suurim s) on seotud peegeldama nurka kellaosuti vastassuunas idast alates, et määrata voolusuuna nurk (joonis 19).

$$r_g = a_f r' + a_c \pi/2$$

Kordaja a_f ja konstant a_c sõltuvad valitud tahust. Protseduur, mis otsib suurima kaldega tahu järjekorras 1- 8 ja „silmuse“ (sama kaldenurgaga tahud) puhul valib esimese. Looduses esineb „silmuseid“ väga harva, mistõttu selliselt leitud kaldenurgad on väheolulised.

Juhul kui ei ole ühtegi positiivset vektorit (allanõlva), siis kasutatakse voolunurka -1 märkimaks pikslit kui lahendamatu, st tegemist on augu või tasase alaga. Lahendamatud

voolusuunad leitakse märkides volusuunaks naaberpiksli, millel on sama kõrgus ja volusuund määratud, põhimõtteliselt sama, mis D8. Seetõttu kasutades D8 volusuundi kui eeltöötlust, et tõsta kõikide aukude pikslite kõrgusväärtusi kuni väljavoolupunktini. Juhul kui pikslid on märgitud kui lahendamatud, kasutatakse D8 protseduuri. Selliselt tagatakse, et tasapinnalised pikslid volavad naaberpikslitesse, mis volavad madalamale alale, elimineerides vastuolulise võimalused nagu „silmus“ ehk ringvool.

Ülesvoolu alade leidmine

Leitakse korduva protseduuriga, mis on edasiarendus väga tõhusast ühesuunalisest algoritmist (Mark, 1988). Iga piksli ülesvoolu ala on piksli enda pindala pluss ülesvoolu naabrite pindala, mis osaliselt antud pikslisse volavad. Iga piksel volab ühe kaheksa naabri suunas (risti või diagonaalselt, sõltuvalt nurgast) või jaguneb vool kahe külgneva piksli vahel. Viimasel juhul jaguneb vool 2 naabri vahel vastavalt sellele, kui lähedal on volusuuna nurk nende pikslite otsesuunale. Arvutus on vajalik väljavoolupunktide leidmiseks, protsess katkeb, kui ülesnõlva ei leita enam ühtegi pikslit.

2.4 MapInfo töövahend StreamBuilder

StreamBuilder on MapInfo baastarkvara kasutatav lisatöövahend digitaalsetelt kõrgusmudelilt voluveekogude ja valglate leidmiseks. StreamBuilder'i peamine tööprintsip on allanõlva katkematute volusuundade leidmine. Selleks, et volusuund saaks kõikjal määratud, tuleb enne ära täita DEMis esinevad väärlõhud. Väärlõhud on enamasti pisikesed, mõne piksli suurus, mis on tavaliselt tekkinud vigadest DEMi interpoleerimisel (Olivera et. al 1998). StreamBuilder lähtub tööprotsessis kahest põhilisest eelpool kirjeldatud DEM'i käsitlemise ideoloogiast. DEM'i täitmise tulemusena on võimalik leida katkematud volusuunad ja voluveekogud ning nende valglad.

Kui tegemist on väga tasaste aladega, võib DEM'i täimisega kaasneda algse DEM'i oluline muutmine, mis võib põhjustada suuri erinevusi tegelike ja automaatselt leitavate voluveekogude vahel. Sellisel juhul tuleb täpsustada lähteandmeid interpoleerimisele eelnevalt, või üritada leida nendes kohtades voluveekogusid täitmata DEM'i kaudu. Eriti oluline on kasutada täitmata DEM'i situatsioonis kus kasutatav reljeefimudel on mastaapne looduslik sulglohk, vastasel juhul täidetakse kogu mudeli siseosa kuni kõrgemate servadeni. Alternatiivina on võimalik kasutada koos ülepinnaliselt täidetud mudelit ja mingi piirkonna täitmata mudelit üheaegselt. Selle tulemusena leitakse globaalsed volusuunad ja lokaalsed, ka katkevad, volusuunad täitmata mudeli kohal.

DEM'i täitmise käigus on võimalik ette anda pinnad, mis katkestavad või lõpetavad tegelikud voluteed nagu järved, märgalad ja karst ning määrata kõrgused, millest madalamal asuvaid piksleid edaspidistes arvutustes ei kasutada (näiteks rannikul kõrgusväärtus 0). Teatud juhtudel kus ülepinnaliselt on kasutatav suure pikslisuurusega rastermudel, ei pruugi

programm mingites olulistes lõikudes leida õigeid voolusuundi. Lõpptulemuse kvaliteeti on võimalik oluliselt parandada liites täitmisprotsessi käigus omavahel mitu erineva pikslisuuruse ja täpsusklassiga DEM'i. Võimalik on mõjutada uue täidetud DEM'i väärtuste arvutamisel arvutusprotsessi, andes alati suurema kaalu väiksema pikslisuurusega DEM'ile ja vähendades uue DEM'i resolutsiooni.

Eeltingimus on, et kõik DEM'id kasutaksid sama koordinaatsüsteemi ja oleks eelnevalt MapInfole loetavale kujule imporditud. StreamBuilder toetab vaikimisi MapInfo *.mig rasterformaati, kuid suudab importida lisaks mitmeid teisi rasterformaate nagu *.hdr, *.ers, GridASCII (ESRI formaat), ASCII xyz ja läbi MapInfo VerticalMapper'i *.grd formaati.

DEM'i täitmise lõpptulemusena genereeritakse kolm uut rastermudelit – uus täidetud DEM laiendiga _pf (*pit filled*), voolusuundade DEM laiendiga _fd (*flow direction*) ja vastuvoolu akumulatsiooniala DEM laiendiga _ua (*upstream area*).

Põhimõtteliselt sarnast ideoloogiat automaatseks vooluveekogude ja valglate leidmiseks DEM reljeefimudelist kasutab ka ArcView baastarkvarale loodud lisatöövahend HEC-PrePro. Tööprotsess jaganeb samuti rasterandmete eeltöötamiseks, DEM'i täitmiseks, vooluveekogude ja valglate vektoriseerimiseks, hüdrooloogiliste elementide parameetrite leidmiseks ja topoloogiliste suhete analüüsiks (Olivera, Reed and Maidment, 1998).

Vooluveekogusid on võimalik leida nii ülepinnaliselt, kogu etteantud rasterkõrgusmudeli ulatuses, kui ka eeldefineeritud väljavoolupunktide kaupa. Väljavoolupunkt on mingi voolutee kõige madalam punkt, samuti peajõe ja harujõgede liitumispunkt. Sarnaselt on võimalik leida ka valglat kogu rasterkõrgusmudeli ulatuses või valgla, mis vastab kindlale väljavoolupunktile. Vastavalt vajadusele saab eraldi määratleda peavalgla ja alamvalglat selle osana. StreamBuilder väljastab valglate, vooluveekogude ja väljavoolupunktide andmed MapInfo failiformaadis vektorkujul kindla struktuuriga, mis võimaldab iga valgla kohta salvestada baasinformatsiooni (tabel 1, 2).

Tabel 1. Valglate tabelistruktuur.

valgla_ID	Valgla muutumatu tunnusnumber
alamvalgla_ID	Alamvalgla muutumatu tunnusnumber (kui alamvalgla funktsioon valitud)
Vooluveekogu asend	Valgla asend vooluveekogu hierarhias (kui alamvalgla funktsioon valitud)
pindala	Valgla pindala etteantud mõõtühikutes
kogupindala	Kindla väljavoolupunkti valgla kogupindala
koord_x	Väljavoolupunkti x koordinaat
koord_y	Väljavoolupunkti y koordinaat
kõrgus	Väljavoolupunkti kõrgus
DEM'i_serv	Kui tegemist DEM servaga lõikamisega siis märgendatud vastavalt True/False

Tabel 2. Vooluveekogude tabelistruktuur.

Vooluveekogu_ID	Vooluveekogu muutumatu tunnusnumber
Valgla_ID	Vooluveekogu valgla muutumatu tunnusnumber
Vooluveekogu asend	Antud vooluveekogu asend vooluveekogu hierarhias, kodeeritud
Pikkus	Vooluveekogu pikkus etteantud mõõtühikutes
Max_kõrgus	Vooluveekogu lähtepunkti kõrgus
Min_kõrgus	Vooluveekogu suubumispunkti kõrgus

Sarnaselt valglate ja vooluveekogude andmetele on võimalik leida hierarhiliselt iga vooluveekogu puudutavad väljavoolupunktid punktifailina, väärtustatuna valglate ja vooluveekogude ID numbrite, koordinaatide ja kõrgusandmetega.

Oluline, rakendusliku väärtusega, on võimalus leida voolusuunad ja vooluteed igale suvalisele valitud punktile DEM'il. Vajadus kasutada sellist võimalust on seotud eelkõige võimaliku reostuse allavoolu leviku modelleerimiseks. Otstarbekas oleks sellised vooluteed leida kõikidele potentsiaalsetele reostusallikatele.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

Tulemuste esmaseks statistiliseks võrdlemiseks kasutati Vertical Mapperi andmete analüüsi alamfunktsiooni korrelatsiooni maatriksi koostamiseks. Korrelatsioon on andmete sarnasuse mõõt, mida väljendatakse koefitsendina vahemikus –1 kuni 1. Mida suurem on positiivne väärtus, seda sarnasemad lähteandmed üksteisele on, näiteks koefitsent 0,85 näitab suurt sarnasust ja 0,2 väikest sarnasust.

3.1 *Natural Neighbour* interpoleerimistulemuste võrdlus

Koostati kolm samade interpoleerimisparameetritega ja erineva pikslisuurusega kõrgusmudelit vastavalt 20 m, 30 m ja 40 m mõlemal proovialal. Kõigepealt võrreldi kummagi piirkonna kolme koostatud mudelit omavahel ja tulemused olid ülepinnaliselt sarnased (tabel 3, 4), nagu eeldatud.

Tabel 3. Lähima väärtusega leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide korrelatsioon Saaremaa.

DEM_saare	NN_grid20m	NN_grid30m	NN_grid40m
NN_grid20m	1	0.999917	0.999655
NN_grid30m	0.999917	1	0.999627
NN_grid40m	0.999655	0.999627	1

Tabel 4. Lähima väärtusega leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide korrelatsioon Muhu.

DEM_muhu	NN_grid20m	NN_grid30m	NN_grid40m
NN_grid20m	1	0.998484	0.998885
NN_grid30m	0.998484	1	0.99948
NN_grid40m	0.998885	0.99948	1

Järgnevalt koostati Saaremaa ja Muhu proovialade kolmest mudelist ka nõlvakalde (*Slope*) ja nõlvasuuna (*Aspect*) mudelid ja võrreldi saadud tulemusi (tabelid 5, 6, 7, 8).

Tabel 5. Lähima väärtusega leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvakallete korrelatsioon Saaremaa.

Slope_saare	NN_grid20m_Slope	NN_grid30m_Slope	NN_grid40m_Slope
NN_grid20m_Slope	1	0.958323	0.872922
NN_grid30m_Slope	0.958323	1	0.917832
NN_grid40m_Slope	0.872922	0.917832	1

Tabel 6. Lähima väärtusega leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvakallete korrelatsioon Muhu.

Slope_muhu	NN_grid20m_Slope	NN_grid30m_Slope	NN_grid40m_Slope
NN_grid20m_Slope	1	0.911441	0.90271
NN_grid30m_Slope	0.911441	1	0.971902
NN_grid40m_Slope	0.90271	0.971902	1

Tabel 7. Lähima väärtusega leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvasuundade korrelatsioon Saaremaa.

Aspekt_saare	NN_grid20m_Aspect	NN_grid30m_Aspect	NN_grid40m_Aspect
NN_grid20m_Aspect	1	0.843075	0.784152
NN_grid30m_Aspect	0.843075	1	0.823646
NN_grid40m_Aspect	0.784152	0.823646	1

Tabel 8. Lähima väärtusega leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvasuundade korrelatsioon Muhu.

Aspekt_muhu	NN_grid20m_Aspect	NN_30m_Aspect	NN_grid40m_Aspect
NN_grid20m_Aspect	1	0.829478	0.821069
NN_grid30m_Aspect	0.829478	1	0.879388
NN_grid40m_Aspect	0.821069	0.879388	1

Nõlvakalde ja nõlvasuuna rasterandmete võrdlus annab samuti ülepinnaliselt suure sarnasuse, kus sarnasus loogiliselt piksli suurenedes väheneb, mistõttu võib eeldada, et ülepinnaliste arvutuste puhul, kus tulenevalt andmemahutudest kasutatakse keskmise pikslisuurusega DEM'i, lõpptulemuse täpsus oluliselt ei vähene.

3.2 Kriging interpoleerimistulemuste võrdlus

Kriging tehnikaga interpoleerimisel lähtuti samast tööpõhimõttest, kui lähima väärtusega interpoleerimisel. Koostati kolm samade interpoleerimisparameetritega ja erineva pikslisuurusega kõrgusmodelit vastavalt 20 m, 30 m ja 40 m mõlemal proovialal.

Sarnaselt lähima väärtusega tehnikale võrreldi kriging tehnikaga leitud mudeleid omavahel (tabelid 9, 10, 11, 12, 13, 14).

Tabel 9. Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide korrelatsioon Saaremaa.

DEM	krig_grid20m	krig_grid30m	krig_grid40m
krig_grid20m	1	0.999261	0.999644
krig_grid30m	0.999261	1	0.999565
krig_grid40m	0.999644	0.999565	1

Tabel 10. Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide korrelatsioon Muhu.

DEM_muhu	krig_grid20m	krig_grid30m	krig_grid40m
krig_grid20m	1	0.963397	0.998018
krig_grid30m	0.963397	1	0.97172
krig_grid40m	0.998018	0.97172	1

Tabel 11. Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvakallete korrelatsioon Saaremaa.

Slope	krig_grid20m_Slope	krig_grid30m_Slope	krig_grid40m_Slope
krig_grid20m_Slope	1	0.821071	0.869983
krig_grid30m_Slope	0.821071	1	0.914809
krig_grid40m_Slope	0.869983	0.914809	1

Tabel 12. Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvakallete korrelatsioon Muhu.

Slope_muhu	krig_grid20m_Slope	krig_grid30m_Slope	krig_grid40m_Slope
krig_grid20m_Slope	1	0.700949	0.84164
krig_grid30m_Slope	0.700949	1	0.929035
krig_grid40m_Slope	0.84164	0.929035	1

Tabel 13. Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvasuundade korrelatsioon Saaremaa.

Aspekt	krig_grid20m_Aspect	krig_grid30m_Aspect	krig_grid40m_Aspect
krig_grid20m_Aspect	1	0.657635	0.710452
krig_grid30m_Aspect	0.657635	1	0.784186
krig_grid40m_Aspect	0.710452	0.784186	1

Tabel 14. Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvasuundade korrelatsioon Muhu.

Aspekt_muhu	krig_grid20m_Aspect	krig_grid30m_Aspect	krig_grid40m_Aspect
krig_grid20m_Aspect	1	0.661262	0.729409
krig_grid30m_Aspect	0.661262	1	0.826171
krig_grid40m_Aspect	0.729409	0.826171	1

3.3 Natural Neighbour ja Kriging tehnikaga interpoleeritud mudelite võrdlus

Arvestades kõrget korrelatsiooni mõlema interpoleerimistehnikaga leitud mudelite rühmasisesel võrdlemisel, on otsarbekas võrrelda kummagi tehnikaga leitud mudeleid ka omavahel (tabelid 15, 16, 17, 18, 19, 20).

Tabel 15. Lähima väärtusega ja Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide korrelatsioon Saaremaa.

DEM saare	krig_grid20m	krig_grid30m	krig_grid40m	NN_grid20m	NN_grid30m	NN_grid40m
krig_grid20m	1	0.999261	0.999644	0.994541	0.994512	0.996198
krig_grid30m	0.999261	1	0.999565	0.993719	0.993687	0.995444
krig_grid40m	0.999644	0.999565	1	0.995147	0.995124	0.996751
NN_grid20m	0.994541	0.993719	0.995147	1	0.999923	0.999635
NN_grid30m	0.994512	0.993687	0.995124	0.999923	1	0.999614
NN_grid40m	0.996198	0.995444	0.996751	0.999635	0.999614	1

Tabel 16. Lähima väärtusega ja Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvakallete korrelatsioon Saaremaa.

Slope_saare	krig_grid20m_S	krig_grid30m_S	krig_grid40m_S	NN_grid20m_S	NN_grid30m_S	NN_grid40m_S
krig_grid20m_S	1	0.821071	0.869983	0.408925	0.440124	0.538055
krig_grid30m_S	0.821071	1	0.914809	0.427837	0.461896	0.552989
krig_grid40m_S	0.869983	0.914809	1	0.505943	0.547297	0.670383
NN_grid20m_S	0.408925	0.427837	0.505943	1	0.958234	0.871705
NN_grid30m_S	0.440124	0.461896	0.547297	0.958234	1	0.917114
NN_grid40m_S	0.538055	0.552989	0.670383	0.871705	0.917114	1

Tabel 17. Lähima väärtusega ja Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvasuundade korrelatsioon Saaremaa.

Aspekt_saare	krig_grid20m_A	krig_grid30m_A	krig_grid40m_A	NN_grid20m_A	NN_grid30m_A	NN_grid40m_A
krig_grid20m_A	1	0.657635	0.710452	0.36556	0.401799	0.444933
krig_grid30m_A	0.657635	1	0.784186	0.402614	0.436742	0.498065
krig_grid40m_A	0.710452	0.784186	1	0.485879	0.534103	0.598403
NN_grid20m_A	0.36556	0.402614	0.485879	1	0.844576	0.783401
NN_grid30m_A	0.401799	0.436742	0.534103	0.844576	1	0.825006
NN_grid40m_A	0.444933	0.498065	0.598403	0.783401	0.825006	1

Saaremaa prooviala kummagi tehnikaga leitud mudelid annavad kõrge korrelatsiooni ka omavahelisel võrdlemisel. Nõlvakallete ja nõlvasuundade andmed erinevad siiski osaliselt. Eriti huvitav on, et lähima väärtusega tehnikaga leitud 40 m suuruse piksli nõlvakalle ja nõlvasuund on kriging tehnikaga leitud vastavatele andmetele kõige sarnasem.

Tabel 18. Lähima väärtusega ja Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide korrelatsioon Muhu.

DEM_muhu	krig_grid20m	krig_grid30m	krig_grid40m	NN_grid20m	NN_grid30m	NN_grid40m
krig_grid20m	1	0.995179	0.998048	0.995545	0.997699	0.998137
krig_grid30m	0.995179	1	0.99873	0.987402	0.991937	0.992493
krig_grid40m	0.998048	0.99873	1	0.992236	0.9958	0.996284
NN_grid20m	0.995545	0.987402	0.992236	1	0.99852	0.998876
NN_grid30m	0.997699	0.991937	0.9958	0.99852	1	0.999519
NN_grid40m	0.998137	0.992493	0.996284	0.998876	0.999519	1

Tabel 19. Lähima väärtusega ja Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvakallete korrelatsioon Muhu.

Slope_muhu	krig_grid20m_S	krig_grid30m_S	krig_grid40m_S	NN_grid20m_S	NN_grid30m_S	NN_grid40m_S
krig_grid20m_S	1	0.697928	0.843403	0.68636	0.819841	0.828574
krig_grid30m_S	0.697928	1	0.926391	0.544172	0.675782	0.723901
krig_grid40m_S	0.843403	0.926391	1	0.688451	0.834599	0.875022
NN_grid20m_S	0.68636	0.544172	0.688451	1	0.911206	0.902777
NN_grid30m_S	0.819841	0.675782	0.834599	0.911206	1	0.972266
NN_grid40m_S	0.828574	0.723901	0.875022	0.902777	0.972266	1

Tabel 20. Lähima väärtusega ja Kriging tehnikaga leitud erineva pikslisuurusega DEM'ide nõlvasuundade korrelatsioon Muhu.

Aspekt muhu	krig_grid20m_A	krig_grid30m_A	krig_grid40m_A	NN_grid20m_A	NN_grid30m_A	NN_grid40m_A
krig_grid20m_A	1	0.660971	0.729647	0.48122	0.540069	0.54277
krig_grid30m_A	0.660971	1	0.826499	0.473025	0.548935	0.559123
krig_grid40m_A	0.729647	0.826499	1	0.574554	0.656384	0.67771
NN_grid20m_A	0.48122	0.473025	0.574554	1	0.829103	0.820571
NN_grid30m_A	0.540069	0.548935	0.656384	0.829103	1	0.87943
NN_grid40m_A	0.54277	0.559123	0.67771	0.820571	0.87943	1

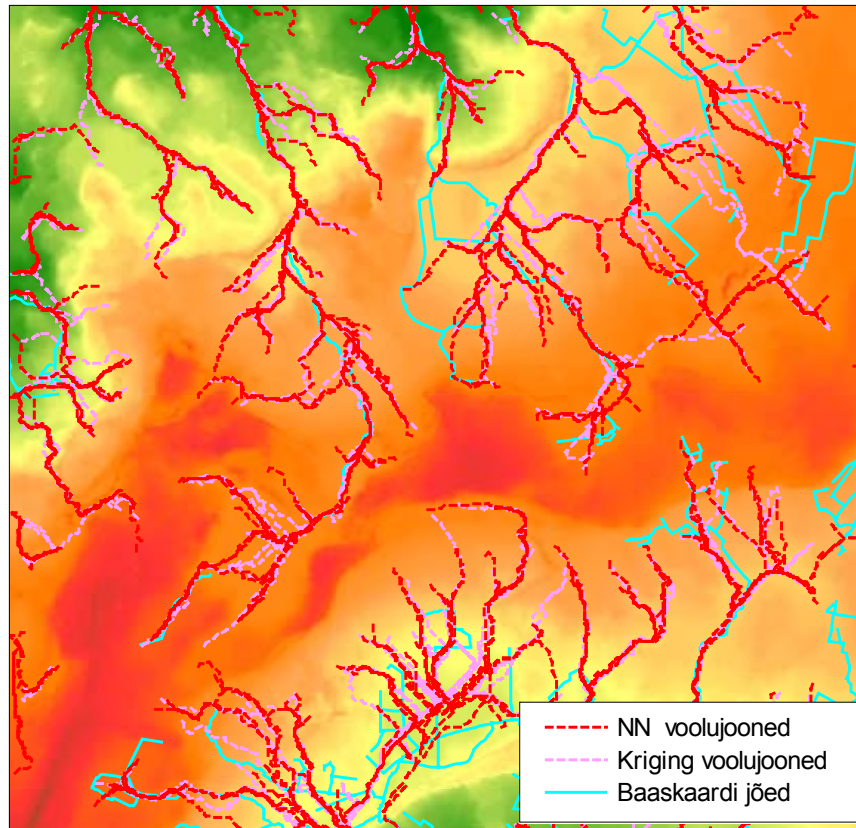
Sarnaselt Saaremaa andmetele on ka Muhu prooviala kummagi tehnikaga leitud mudelitel suur omavaheline korrelatsioon ja nõlvakallete ja nõlvasuundade andmed sarnanevad tehnikate lõikes, kuid tehnikate omavaheliste andmete korrelatsioon on tunduvalt madalam.

Korrelatsioonandmed tehnikate lõikes ja ka tehnikate vahel on suhteliselt kõrged. Mudelite statistilisest võrdlusest ei selgu kummagi tehnika täpsus ja kasutatavus hüdrooloogiliste mudelite lähteandmetena. Lõpliku valiku tegemiseks on otstarbekas võrrelda erinevaid tehnikaid visuaalselt.

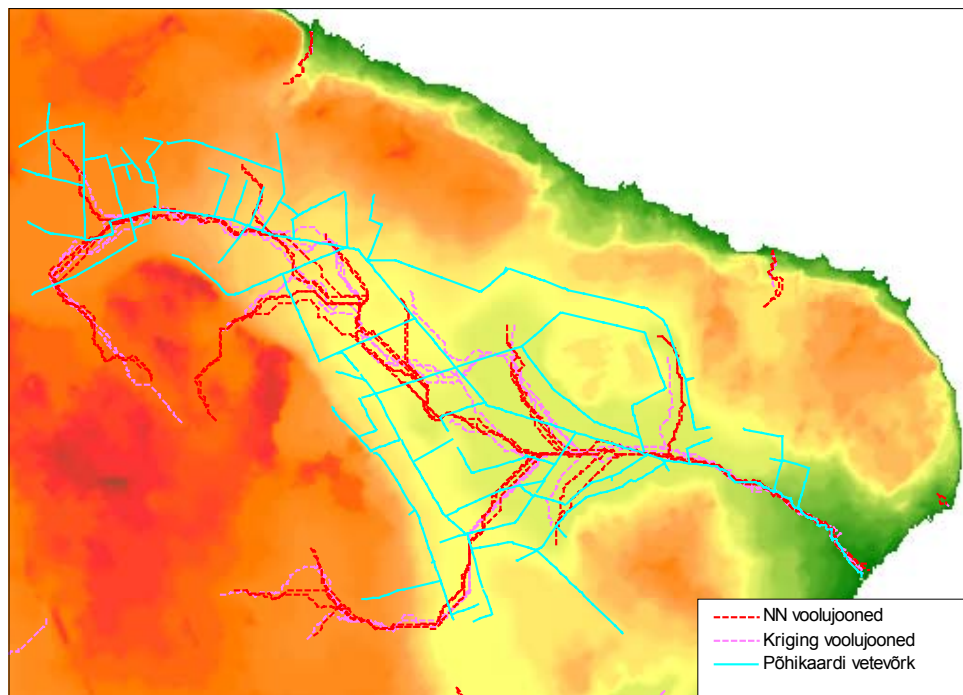
Katseliselt, kummagi tehnikaga interpoleeritud mudelitelt Saaremaa proovialal leitud vooluveekogude omavahelisel visuaalsel võrdlemisel väga suuri erinevusi ei esine. Leitud vooluveekogude ja Baaskaardi vastavate joonte võrdlemisel ei erine kummagi tehnikaga leitud joonte täpsus oluliselt, eksides rohkem tasastel ja muudetud voolusängiga aladel. Üldjoontes järgivad aga lähima väärtusega leitud vooluveekogud olemasolevat vetevõrku paremini ja suuri kõrvalekaldeid esineb vähem (joonis 20).

Katseliselt, kummagi tehnikaga interpoleeritud mudelitelt Muhu proovialal leitud vooluveekogude omavahelisel visuaalsel võrdlemisel sarnaselt Saaremaa proovialale väga suuri erinevusi ei esine. Võrreldes katseliselt leitud vooluveekogusid ja väljavõtet põhikaardi vetevõrgust ei erine kummagi tehnikaga leitud voolujoonte täpsus oluliselt. Üldjoontes järgivad lähima väärtusega tehnikaga interpoleeritud mudelite vooluveekogud kattuvates lõikudes siiski põhikaardi vetevõrku täpsemalt (joonis 21).

Katseliste tulemuste visuaalsel hindamisel väga suuri tehnikate omavahelisi erinevusi ei leitud. Arvestades kummagi tehnika ajakulu ja töömahtu mudelite koostamisele kasutatakse töös edaspidi sobivus ja täpsushinnangute andmisel lähima väärtusega (*Natural Neighbour*) tehnikaga interpoleeritud kõrgusmudeleid.



Joonis 20. Erinevate tehnikatega katseliselt leitud vooluveekogude ja Baaskaardi situatsiooni võrdlus Saaremaa proovialal.



Joonis 21. Erinevate tehnikatega katseliselt leitud vooluveekogude ja Põhikaardi situatsiooni võrdlus Muhu proovialal.

3.4 Sobivaima interpoleerimislahendi leidmine, DEM'ide täitmine

Toetudes lähima väärtuse ja kriging tehnika võrdlusandmetele, kasutatakse edaspidises töös lähima väärtuse tehnikaga interpoleeritud reljeefimudeleid. Ainult interpoleerimistehnikate võrdlemisel ei ole võimalik otsustada, milline mudel on vooluveekogude ja valglate leidmiseks sobivaim. Töö teostamiseks kasutatakse võrdlusena eelnevalt VerticalMapper'iga lähima väärtuse tehnikaga, samade muutujatega ja erineva pikslisuurusega genereeritud DEM mudeleid ning sama pikslisuurusega ja erinevate muutujatega genereeritud DEM mudeleid.

Peale interpoleerimist koheselt tehtud mudelite võrdlusandmed ei anna hüdrooloogilise modelleerimise seisukohast olulist informatsiooni, kuna enne vooluveekogude ja valglate leidmist tuleb DEM'id eelnevalt täita. Täitmise käigus toimub algsete mudelite silumine ja läbi selle andmete muutmine, mistõttu on hüdrooloogiliste näitajate leidmise seisukohast olulisem ja täpsem võrrelda eelnevalt täidetud DEM'e. Võrdlusandmetena on ka otsarbakam kasutada mitte ainult algsete DEM'ide täitmisel saadud kõrgusmudeleid, vaid ka vooluveekogude ja valglate leidmiseks, eelemapina leitavaid voolusuundade ja ülesvoolu alade DEM mudeleid. Näiteks Muhu prooviala täitmata ja täidetud 20 m pikslisuurusega DEM'ide korrelatsioon on 0,99, samas ülesvoolu alade DEM'de korrelatsioon vaid 0,4.

Esimese etapina koostati lähima väärtusega ja nõlvakallet arvestava tehnikatega kummalgi proovialal neli mudelit, samade interpoleerimisparameetritega, muutes ainult piksli suurust vastavalt 10 m, 20 m, 30 m ja 40 m. Järgnevalt täideti kõik DEM mudelid ülepinnaliselt. Täitmise käigus lõigati Saaremaa proovialale jäävast mudelist välja järved ja karstialad ning kasutades täidetud DEM'e koostati voolusuundade ja ülesvoolualade mudelid. Korrelatsiooni andmete leidmiseks imporditi voolusuundade ja ülesvoolualade mudelid VerticalMapperi andmeformaati ja koostati vastavad korrelatsioonimaatriksid (tabelid 21, 22, 23, 24).

Tabel 21. Saaremaa prooviala voolusuuna andmete korrelatsioon.

Voolusuund_saare	n10_fd	n20_fd	n30_fd	n40_fd
n10_fd	1	0.711368	0.79617	0.721267
n20_fd	0.711368	1	0.81386	0.844692
n30_fd	0.79617	0.81386	1	0.869247
n40_fd	0.721267	0.844692	0.869247	1

Tabel 22. Saaremaa prooviala ülesvoolu alade korrelatsioon.

ülesvooluala_saare	n10_ua	n20_ua	n30_ua	n40_ua
n10_ua	1	0.216433	0.295473	0.22252
n20_ua	0.216433	1	0.412993	0.483491
n30_ua	0.295473	0.412993	1	0.649052
n40_ua	0.22252	0.483491	0.649052	1

Tabel 23. Muhu prooviala voolusuuna andmete korrelatsioon.

Voolusuund_muhu	n10_fd	n20_fd	n30_fd	n40_fd
n10_fd	1	0.862795	0.726753	0.72215
n20_fd	0.862795	1	0.744217	0.745967
n30_fd	0.726753	0.744217	1	0.916527
n40_fd	0.72215	0.745967	0.916527	1

Tabel 24. Muhu prooviala ülesvoolu alade korrelatsioon.

ülesvooluala_muhu	n10_ua	n20_ua	n30_ua	n40_ua
n10_ua	1	0.40452	0.1618	0.237274
n20_ua	0.40452	1	0.175037	0.255333
n30_ua	0.1618	0.175037	1	0.750373
n40_ua	0.237274	0.255333	0.750373	1

Voolusuundade ja ülesvoolu alade korrelatsioonandmete võrdlemisel ilmneb, et pindalaliselt suuremal ja reljeefi poolest vaheldusrikkamal alal ei vähene korrelatsioon piksli suuruselt sõltuvalt lineaarselt, vaid sarnasema tulemuse annavad 30 m ja 40 m pikslisuurusega mudelid. Pindalalt väiksemal ja tasase reljeefiga proovialal väheneb voolusuuna andmete korrelatsioon sõltuvalt piksli suuruselt, kuid ka siin annavad omavaheliselt sarnasema tulemuse suurema pikslisuurusega mudelid. Samas vooluandmete visuaalsel võrdlemisel kaardilisel kujul annavad tunduvalt sarnasema tulemuse Saaremaa proovialal 10 m ja 20 m pikslisuurusega mudelid ja Muhus 20 m ja 30 m pikslisuurusega mudelid.

Teise etapina, arvestades eelneva etapi tulemusi, koostati viis 20 m pikslisuurusega mudelit, muutes raadiusel põhinevat andmete agregeerimise distantsi vastavalt 5, 10, 20, 40 ja 60 raadiust. Koostatud kõrgusmudelid täideti sarnaselt eelneva etapiga ja koostati nii voolusuuna kui ülesvoolu alade mudelid. Saadud andmed imporditi jällegi VerticalMapperi andmeformaati ja koostati korrelatsioonimaatriksid (tabelid 25, 26, 27, 28).

Tabel 25. Saaremaa prooviala erineva agregeerimis distantsiga voolusuuna andmete korrelatsioon.

voolusuund_saare	agg5_fd	agg10_fd	agg20_fd	agg40_fd	agg60_fd
agg5_fd	1	0.880545	0.780675	0.664784	0.600553
agg10_fd	0.880545	1	0.79992	0.678016	0.609486
agg20_fd	0.780675	0.79992	1	0.702742	0.626514
agg40_fd	0.664784	0.678016	0.702742	1	0.67303
agg60_fd	0.600553	0.609486	0.626514	0.67303	1

Tabel 26. Saaremaa prooviala erineva agregeerimis distanttsiga ülesvoolu alade andmete korrelatsioon.

ülesvooluala_saare	agg5_ua	agg10_ua	agg20_ua	agg40_ua	agg60_ua
agg5_ua	1	0.611501	0.468434	0.160459	0.0868678
agg10_ua	0.611501	1	0.473696	0.206918	0.0897237
agg20_ua	0.468434	0.473696	1	0.233292	0.0866625
agg40_ua	0.160459	0.206918	0.233292	1	0.233576
agg60_ua	0.0868678	0.0897237	0.0866625	0.233576	1

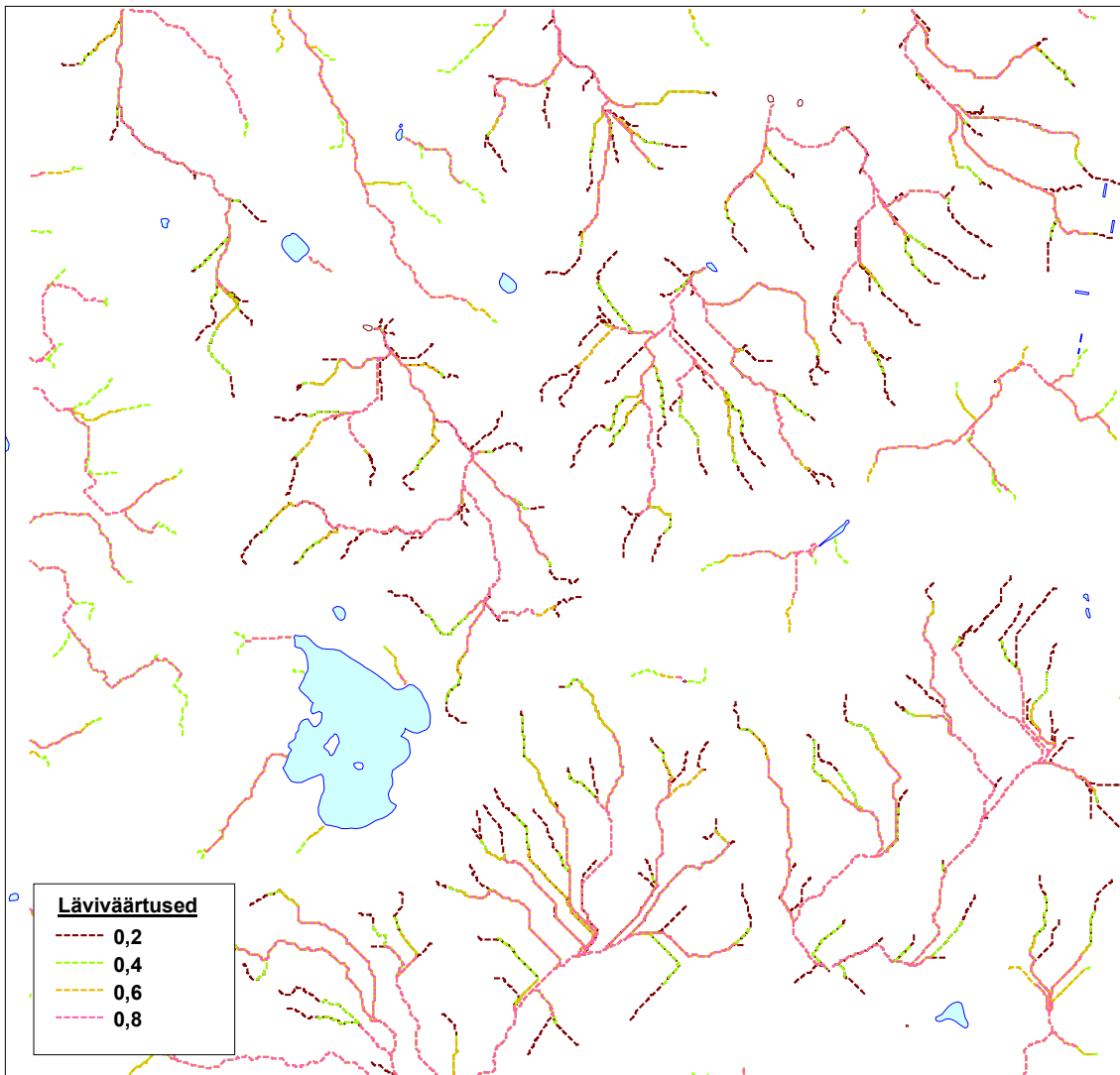
Tabel 27. Muhu prooviala erineva agregeerimis distanttsiga voolusuuna andmete korrelatsioon.

Voolusuund_muhu	agg5_fd	agg10_fd	agg20_fd	agg40_fd	agg60_fd
agg5_fd	1	0.900637	0.820392	0.726371	0.654586
agg10_fd	0.900637	1	0.846871	0.734803	0.664623
agg20_fd	0.820392	0.846871	1	0.760577	0.68364
agg40_fd	0.726371	0.734803	0.760577	1	0.721198
agg60_fd	0.654586	0.664623	0.68364	0.721198	1

Tabel 28. Muhu prooviala erineva agregeerimis distanttsiga ülesvoolu alade andmete korrelatsioon.

ülesvooluala_muhu	agg5_ua	agg10_ua	agg20_ua	agg40_ua	agg60_ua
agg5_ua	1	0.639875	0.479777	0.303863	0.26037
agg10_ua	0.639875	1	0.528562	0.348721	0.282113
agg20_ua	0.479777	0.528562	1	0.434865	0.292239
agg40_ua	0.303863	0.348721	0.434865	1	0.303316
agg60_ua	0.26037	0.282113	0.292239	0.303316	1

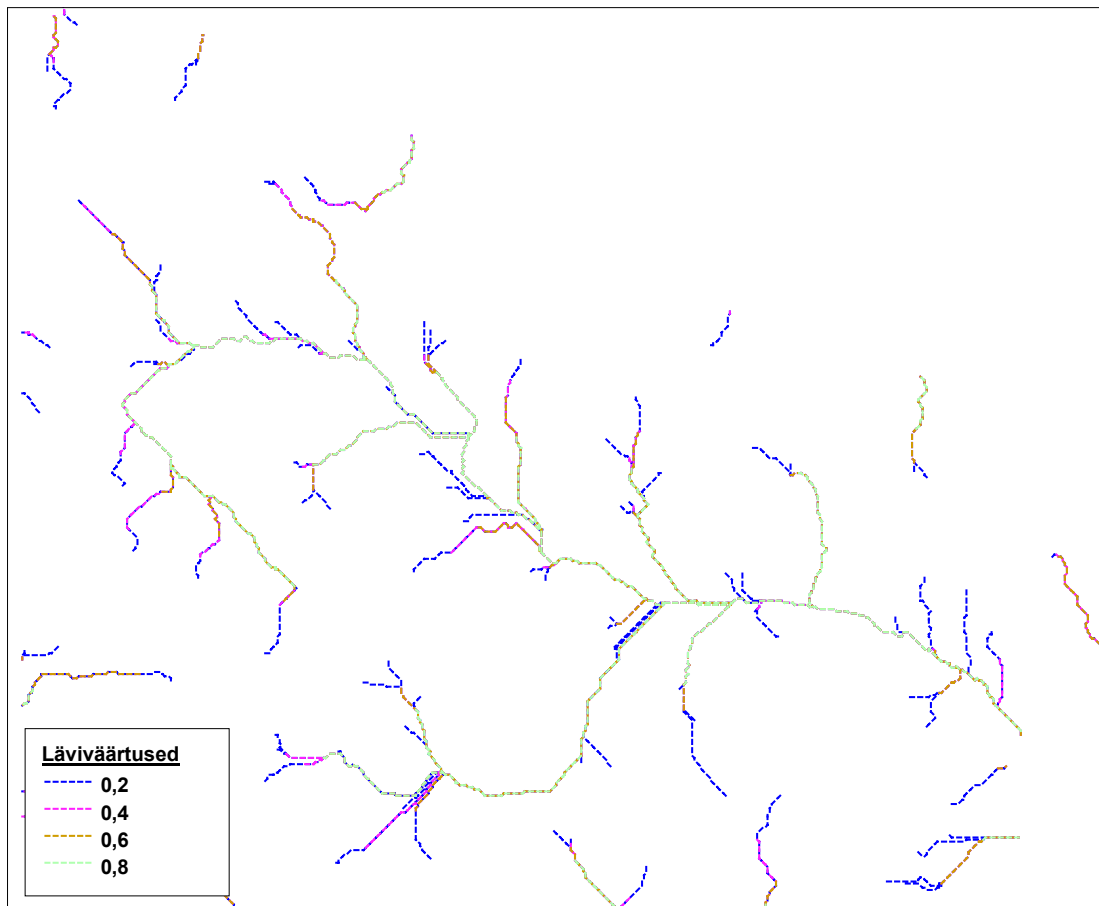
Korrelatsioonandmete sarnasus väheneb mõlemal proovialal agregeerimisdistantsi suurenemisega, hüppeline korrelatsiooni vähenemine, eriti ülesvoolu alade andmete võrdlusel, toimub agregeerimisdistantsi 40 juures. Andmete visuaalsel võrdlemisel kaardilisel kujul jälgivad olemasolevaid voolusänge kõige täpsemini agregeerimisdistantsiga 5 ja 10 interpoleeritud mudelid vooluveekogude puhul ja 10 valglate puhul. Automaatselt leitavate vooluveekogude defineerimise oluline faktor on õige läviväärtuse määramine. Kui peavalgla piirid sõltuvad eelkõige koostatud reljeefimudelist, siis vooluveekogude leidmisel on määrava tähtsusega optimaalse läviväärtuse leidmine. Liiga väike läviväärtus tekitab liiga tiheda paralleelsete voolusängidega vetevõrgu, liiga suur läviväärtus, eriti lokaalsel tasandil ei arvesta jällegi voolude jagunemisi ja leitakse vaid peamine voolusuund. Võttes aluseks eelneva analüüsi tulemused, leiti 20 m piksliga, agregeerimisdistantsiga 10 koostatud reljeefimudelile vooluveekogud läviväärtustega 0,2 km², 0,4 km², 0,6 km², 0,8 km² (joonis 22).



Joonis 22. Erineva läviväärtusega vooluveekogud Saaremaa proovialal.

Andmete visuaalsel võrdlusel tegelike vooluveekogudega annab kõige optimaalsema tulemuse läviväärtus 0,6 km². Läviväärtusega 0,8 km² leitud vooluveekogud jäävad liiga lühikeseks ja läviväärtus 0,2 km² tekitab liiga tiheda võrgustiku, mida tegelikkuses ei eksisteeri.

Muhu prooviala visuaalsel võrdlusel tegelike vooluveekogudega annab kõige optimaalsema tulemuse läviväärtus 0,4 km² (joonis 23).



Joonis 23. Erineva läviväärtusega vooluveekogud Muhu proovialal.

Kokkuvõttena võib öelda, et suurema pindalaga modelleerimisalade puhul on sobilik valida arvutusmahtude vähendamiseks piksli suuruseks keskmise suurusega pikslid 20 m kuni 30 m, kus hilisemate ülepinnaliste modelleerimistulemuste täpsus oluliselt ei vähene. Piksli suuruse valik sõltub olulisel määral lähteandmete täpsusest ja tihedusest. Antud lähteandmete puhul ei suurenda väiksem piksel ülepinnaliselt mudeli kvaliteeti ega täpsust. Lähteandmete agregeerimisraadius ei tohiks ületada 20, muutuja mille suurendamisel muutub mudel vooluveekogude leidmiseks ebatäpseks. Samuti on oluline määratleda vooluveekogude leidmiseks õige läviväärtus, et automaatselt leitav vetevõrk ei oleks liiga tihe ega liiga hõre. Optimaalsema tulemuse suurtel pindaladel annavad 20 – 30 m pikslisuurusega DEMi´ide puhul läviväärtused 0,4 – 0,6 km².

3.5 Automaatselt leitavate vooluveekogude sobitamine tegeliku vetevõrguga

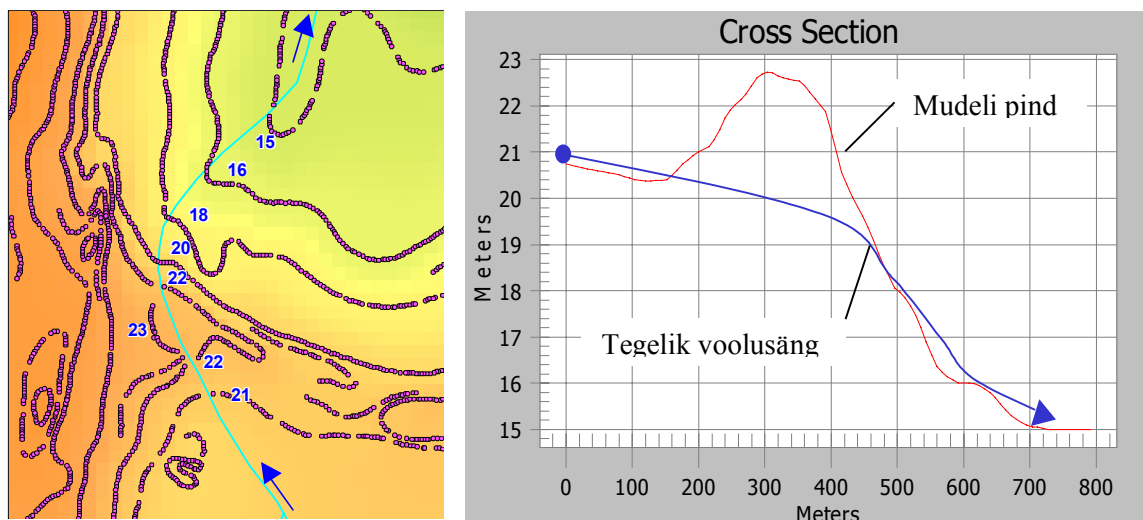
Automaatselt DEM'ilt leitavate vooluveekogude ja tegelikult eksisteerivate vooluveekogude vahed võivad olla suhteliselt suured, eriti juhul kui DEM on genereeritud samakõrgusjoonte põhised ja looduslikke voolusänge on tuntavalt muudetud. Algoritmid eksivad suhteliselt palju ka väga tasasel ja tugevalt seisuveekogudega liigendatud maastikel (Liang and Mackay, 2000). Sellised tulemused ei rahulda aga mitmete ametkondade reaalseid vajadusi, eriti olukordades, kus voolujooned tuleb leida väikesel pindalal maaparandusobjektidel. Senini on ühed parimad tulemused kraavituse ja muudetud voolusängide kaardistamises saavutatud genereerides DEM'i LIDAR (*Light Distance And Ranging*) tehnoloogiaga mõõdistatud lähteandmetest, saavutades vertikaalse täpsuse 0,1 -0,2 m (Blackwell ja Wells, 1999) (joonis 24).



Figure 14. Flow paths from 5-meter resampled LIDAR

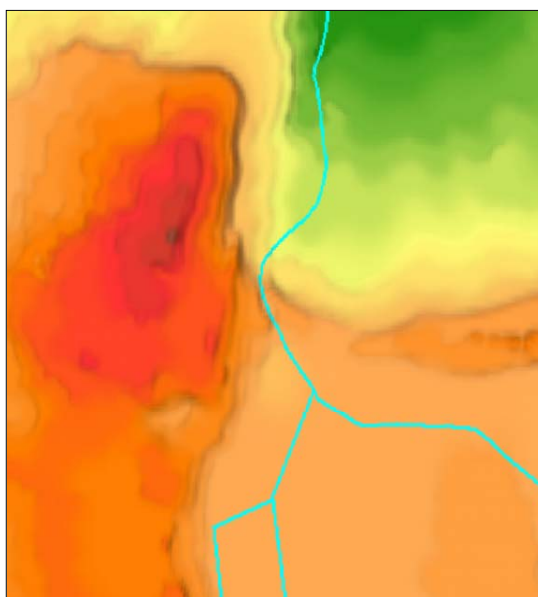
Joonis 24. Väga tasasel alal Lidar tehnoloogiaga mõõdistatud lähteandmete DEM'ist leitud kraavitussvõrk.

Eriti efektiivne on LIDAR lagedatel aladel, kus andmeid mõõdistatakse 1- 3 m intervalliga ja saavutatatakse keskmine vertikaalne täpsus 15 cm (Mitasova, 2003). Automaatselt DEM'ist leitavate vooluveekogude leidmisel suurema täpsuse saavutamiseks on mitu võimalust. Üks uuematest suundadest ülepinnaliste vooluveekogude võrgustiku leidmisel on kasutada koos DEM'iga eelnevalt kaardistatud vooluveekogude andmeid (Olivera, 2003). Kui tegemist on pindalaliselt väiksema territooriumiga, on otstarbekas võrrelda mudeli genereerimiseks kasutatavaid lähteandmeid (samakõrgusjooned, kõrguspunktid) suuremõõtkavaliselt kaardistatud vetevõrguga. Paljudel juhtudel ei kajasta paberkaartidelt saadavad reljeefiandmed sügavamalt pinnasesse lõikuvaid voolusänge, mistõttu võib tekkida olukord, kus jõed peaksid teatud kohtades voolama vastumäge (joonis 25).



Joonis 25. Näide „ülesmäge“ voolavast jõest.

Sellisel juhul tuleks neis kohtades lähteandmeid käsitsi sobivas suunas mõjutada, vähendades enne reljeefimudeli koostamist voolusängide kohal kõrgusandmeid. Oskuslikult muudetud kõrgusandmed ja õigesti valitud interpoleerimistehnika ning sobivad parameetrid tagavad peaaegu alati soovitud tulemuse, tekitades mudeli pinda piisava sügavusega voolusängi (joonis 26).



Joonis 26. Sama jõelõik käsitsi muudetud lähteandmetest koostatud reljeefimudelil.

Käsitsi ei ole mõeldav aga muuta lähteandmeid väga suurtel aladel, esiteks on selline töö väga aeganõudev ja väga tasastel aladel on väga raske lisada õige kõrgusega lähteandmeid, mis tagaksid hiljem soovitud tulemuse. Teine võimalus on genereerida kõrgusmodel ning üritada olemasolev vetevõrk hiljem mudelisse „sisse kõrvetada“ (Garbrecht ja Marz, 1998).

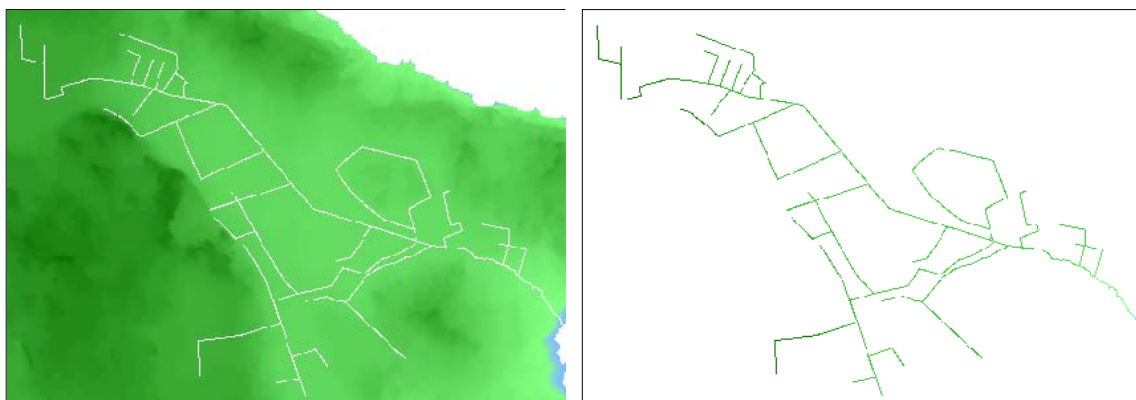
Võimalused selliselt DEM'i muuta sõltuvad paljuski konkreetsest kasutatavast tarkvarast. Põhimõttelisi lahendusi mudeli hilisemaks muutmiseks MapInfo ja VerticalMapper tarkvaradega on mitu. Rasterpõhised, kus manipuleeritakse ainult rasterandmetega ja rastervektor põhised, kus vahepeal toimub andmete eksportimine ja importimine ühest formaadist teise ning uue DEM mudeli koostamine.

3.5.1 Vooluveekogude sobitamine tegeliku vetevõrguga, rasterlahendus

Esimese sammuna genereeritakse sobivate parameetritega uurimisala kõrgusmodel, mudel täidetakse, st kaotatakse väärlõhud, mis takistavad katkematute voolusuundade leidmist. Edasises töös on võimalikult täpse lõpptulemuse saavutamiseks oluline kasutada ainult DEM'i täidetud kuju. Täitmata DEM'iga tehtavad arvutused võivad anda täiesti väär tulemuse, ekstreemsematel juhtudel muutuvad voolusuunad vastupidiseks. Sõltuvalt DEM kõrgusmudeli piksli suurusest genereeritakse olemasolevale vetevõrgule ühine puhvertsoon (vajadusel võib puhverdada ka iga harujõe või kraavi eraldi). Puhvertsoon ei tohi olla kitsam kui on DEM'i piksel, vastasel juhul ei ole hilisemad ruumilised päringud korrektsed (Stone, 2001).

Vetevõrgule genereeritud puhvertsooniga lõigatakse täidetud DEM'i ja salvestatakse kattuvuspäringu tulemus eraldi DEM kaardifailina. Uue puhvrialuse DEM'i kõrgusväärtusi vähendatakse sõltuvalt kasutatavatest mõõtühikutest ja tingimusest, et vähendamise tulemusena ei oleks uus kõrgusväärtus null (merre suubuvatel jõgedel). Optimaalsema väärtuse leidmiseks tuleks ruumilise päringuga selgitada puhvrialuse DEM'i miinimum, maksimum ja keskmine kõrgusväärtus. Eriti oluline on jälgida kogu hierarhilise lokaalse vetevõrgu väljavoolupunkti kõrgusväärtust.

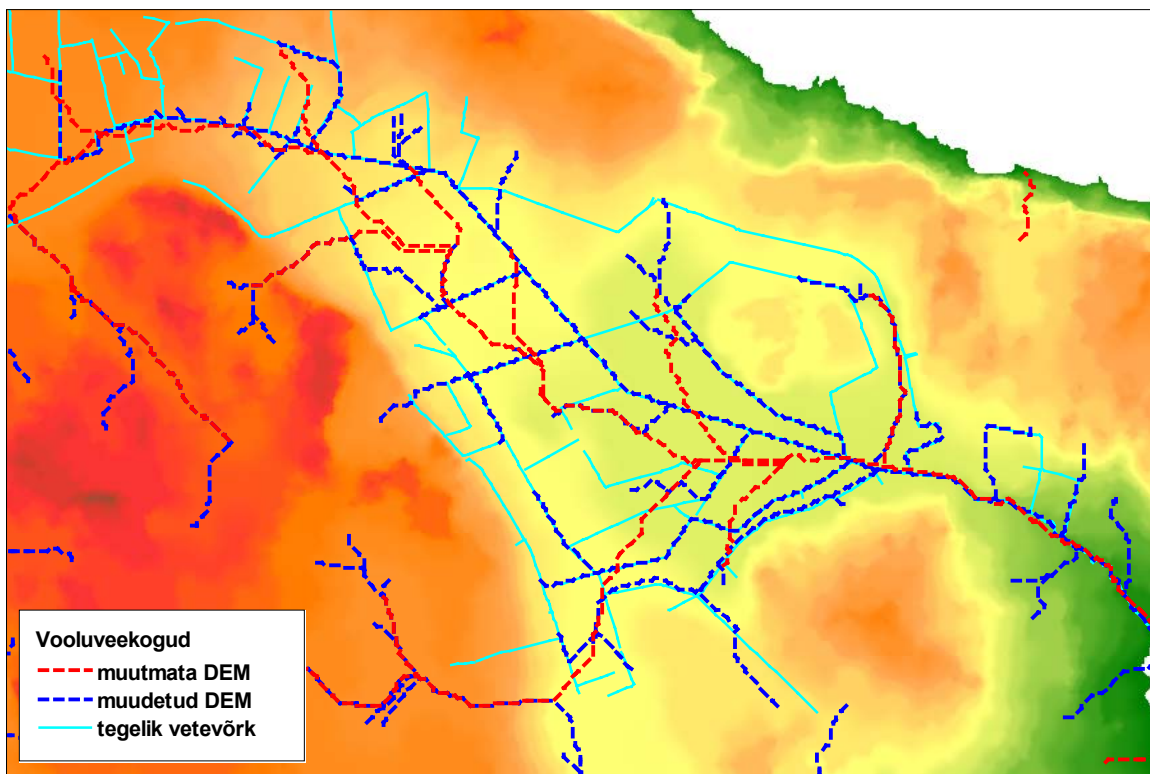
Järgmise sammuna lahutatakse algsest DEM'ist puhvertsooni alla jääv ala ja liidetakse kaks, sisselõikega DEM ja muudetud kõrgusväärtustega puhvertsoonialune DEM (joonis 27).



Joonis 27. Sisselõigatud jõgedevõrguga DEM ja jõgedevõrgu DEM.

Enne liitmist tuleb kummastki DEM'ist päringuga eraldada null väärtusega ja ilma väärtuseta pikslid, mis ei võimalda andmekihte omavahel liita. Liidetud DEM tuleb enne vooluveekogude ja valglate leidmist uuesti täita.

Võrreldes algselt täidetud ja vetevõrgu kohal muutmata kõrgusandmetega DEM'ist ja eelnevalt kirjeldatud meetodil muudetud DEM'ist leitud vooluveekogude kaarte olemasoleva vetevõrguga, on muudetud mudeli vooluveekogude sarnasus tegeliku vetevõrguga tunduvalt suurem (joonis 28).



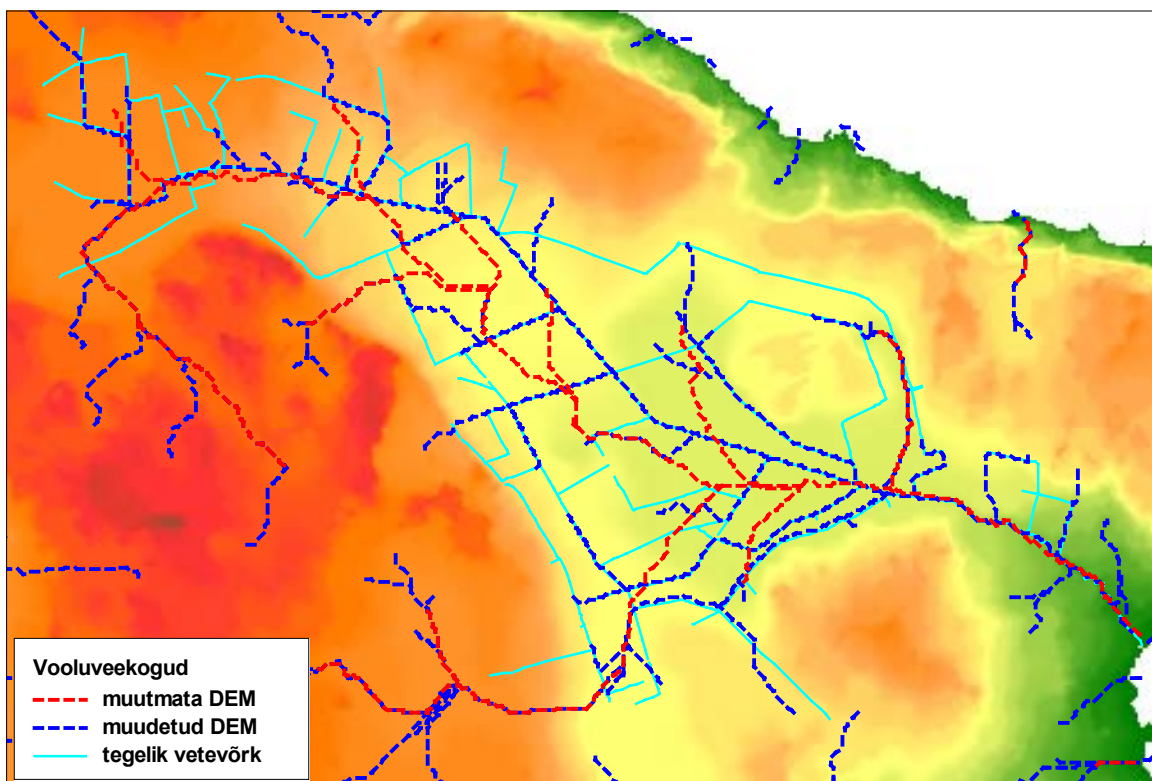
Joonis 28. Muutmata ja rasterpõhise lahendusega muudetud DEM'idest leitud vooluveekogude võrdlus, tegelike vooluveekogudega.

Muutmata ja muudetud DEM'ide voolujooned kattuvad peamiselt sellistes jõelõikudes, kus voolusängi on vähem muudetud, või kõrguste vahed on suuremad. Eelkirjeldatud protseduuri võib vajadusel suurema täpsuse saavutamiseks korrata, vähendades järk-järgult tegeliku vetevõrgu alla jäävate pikslite kõrgusväärtuseid, kuni saavutatakse optimaalne tulemus.

3.5.2 Vooluveekogude sobitamine tegeliku vetevõrguga, raster-vektorlahendus

Esimese sammuna genereeritakse sobivate parameetritega uurimisala kõrgusmudel ja mudel täidetakse. Täidetud mudel eksporditakse punktidenä vektorkujule MapInfo formaati, kõrguspunktid moodustatakse DEM'i pikslite tsentroididest. Olemasolevale vetevõrgule genereeritakse sobiva laiusega puhvertsoon sõltuvalt DEM'i piksli suurusest. Täidetud DEM'ist genereeritud punktandmete ja vetevõrgu puhvertsooniga koostatakse ruumiline sisalduvuspäring.

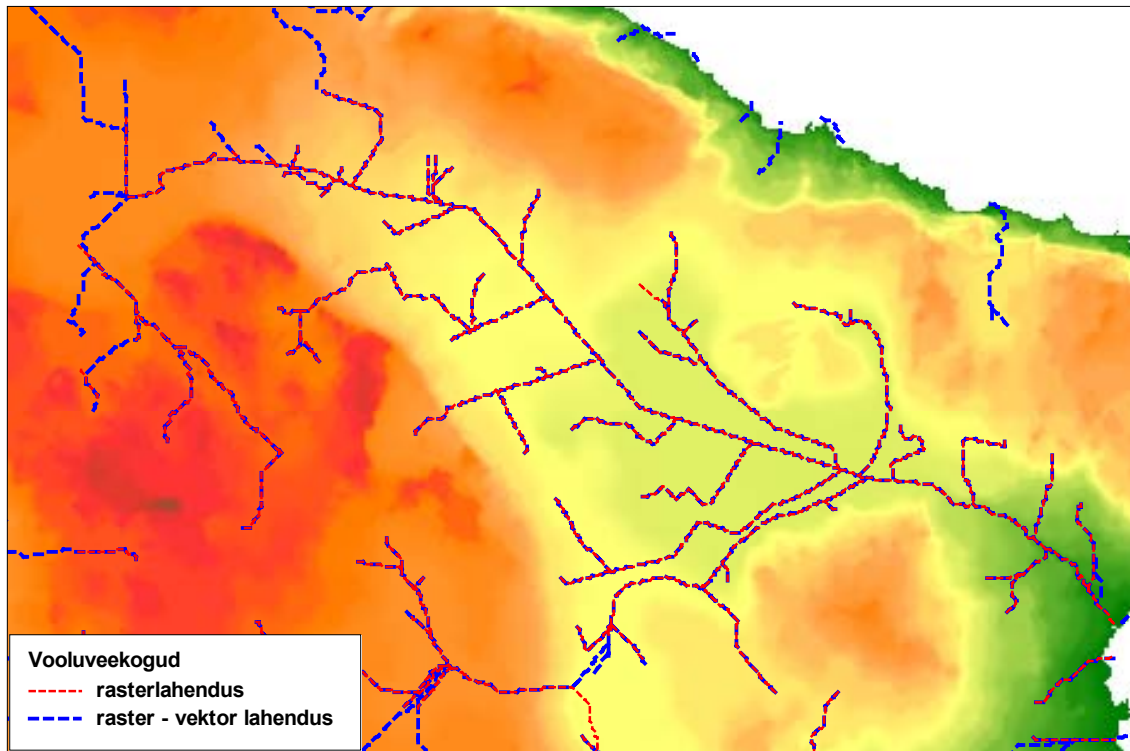
Päringu tulemusena leitud kõrguspunktide kõrgusväärtusi vähendatakse sõltuvalt kasutatavatest mõõtühikutest ja tingimusest, et vähendamise tulemusena ei oleks uus kõrgusväärtus null. Kuna muudetavaid punktandmeid algsest andmetabelist ei lahutatud salvestuvad muudatused otse algseesse andmetabelisse. Muudetud punktandmetest koostatakse uuesti DEM kõrgusmudel ja täidetakse ning leitakse ülepinnaalset vooluveekogud ja valgla (joonis 29).



Joonis 29. Muutmata ja raster-vektor põhise lahendusega muudetud DEM'idest leitud vooluveekogude võrdlus, tegelike vooluveekogudega.

Muutmata ja muudetud lähteandmetega DEM'ide voolujooned kattuvad, sarnaselt eelmisele lahendusele, peamiselt sellistes jõelõikudes, kus voolusängi on vähem muudetud, või kõrguste vahed on suuremad.

Võrreldes erineva meetodiga muudetud DEM'idest leitud vooluveekogusid on näha, et suures osas kattuvad voolujooned täielikult, samas leitakse raster – vektor lahendusega vooluveekogud pikemalt, kasutades paremini lisaks muudetud andmetega voolusängidele DEM'ilt leitavaid allanõlva voolusuundi (joonis 30).



Joonis 30. Raster- ja raster-vektor põhise lahendusega muudetud DEM'idest leitud vooluveekogude võrdlus.

Raster – vektor lahenduse suurem täpsus tuleneb paremast võimalusest lähteandmetega vektorkujul manipuleerida ja võimalusest genereerida muudetud andmetest uus DEM kõrgusmudel.

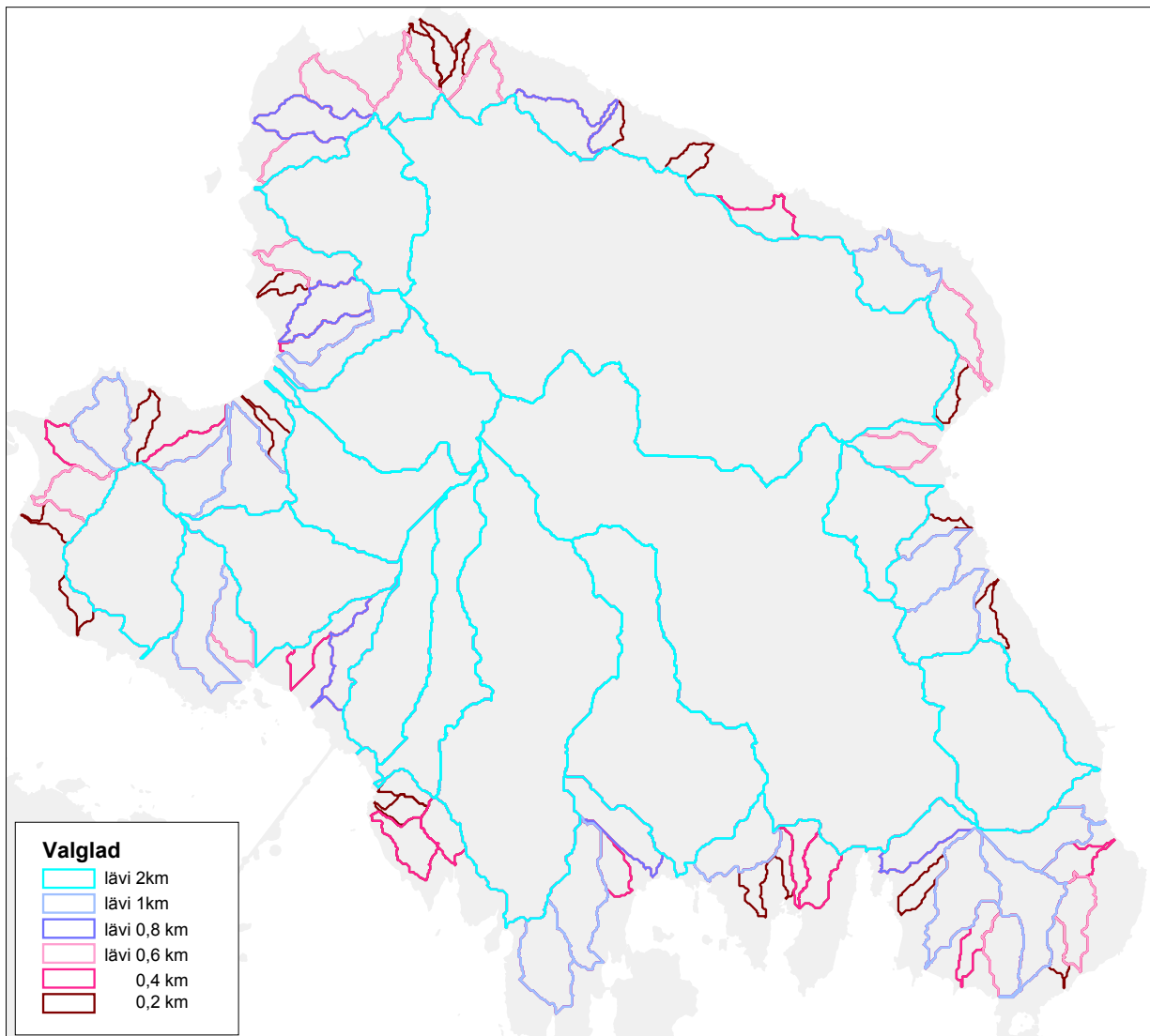
Rasterlahendus on samas tunduvalt kiirem ja vähem arvutusmahukas eriti kasutamiseks suurematel pindadel, kuna puudub vajadus andmete formaadi muutmiseks ning uue kõrgusmudeli genereerimiseks.

3.6 Automaatne valglate leidmine

Automaatse valglate leidmise rasterandmed on samad, mida kasutatakse vooluveekogude leidmiseks, üldjuhul leitakse vooluveekogud ja neile vastavad valglad üheaegselt. Sõltuvalt vajadusest on võimalik leida valglad mingitele kindlatele määratletud väljavoolupunktidele, või ülepinnaeliselt terve DEM'i ulatuses. Teatud juhtudel on oluline lisaks peavalglale leida ka peavalglasse jäävad alamvalglad.

Automaatse valglate leidmise protsessi käigus on kõige olulisem määratleda õige ülesvoolu läviväärtus, millest sõltub kui suurt ala käsitletakse eraldiseisva valglana.

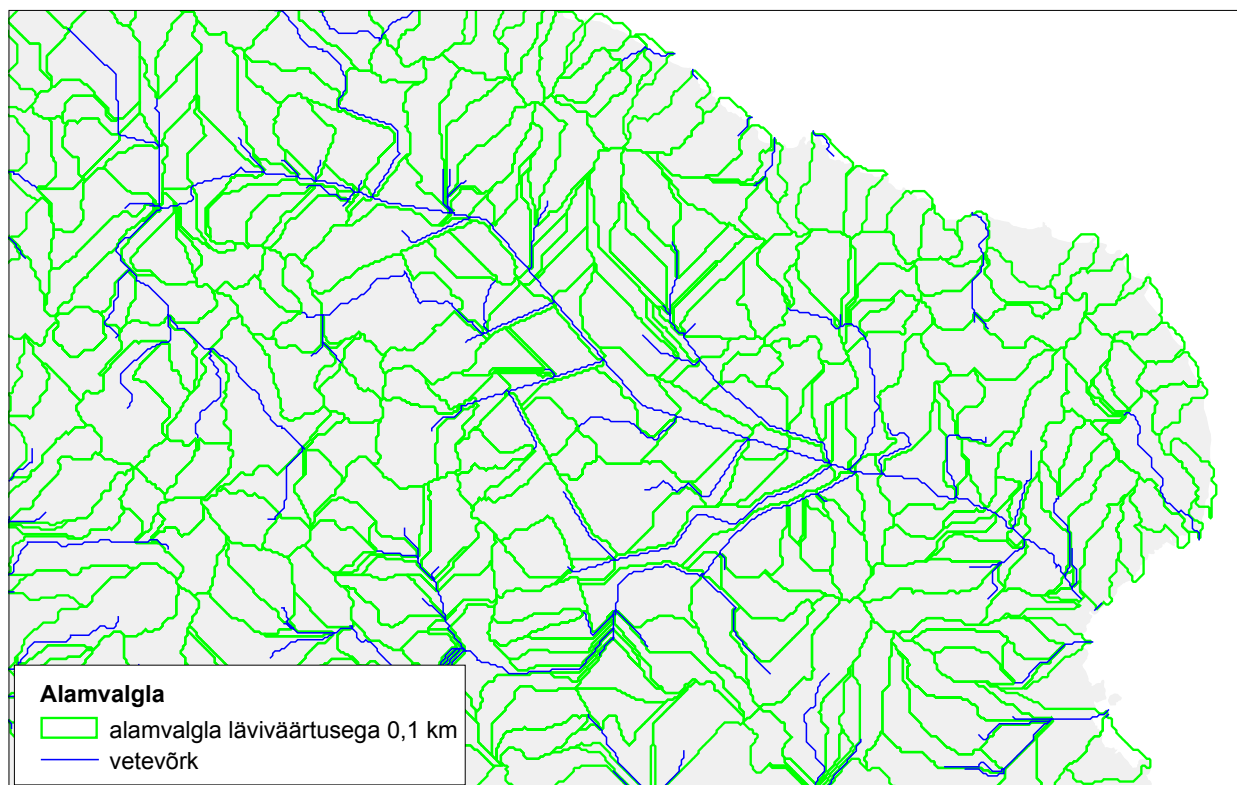
Katseliselt koostati Muhu saare 20 m piksli suurusega kõrgusmudel, mudel täideti ja arvatati peavalglad, kasutades kuut erinevat läviväärtust (joonis 31).



Joonis 31. Erineva läviväärtusega leitud peavalglate väliskontuurid.

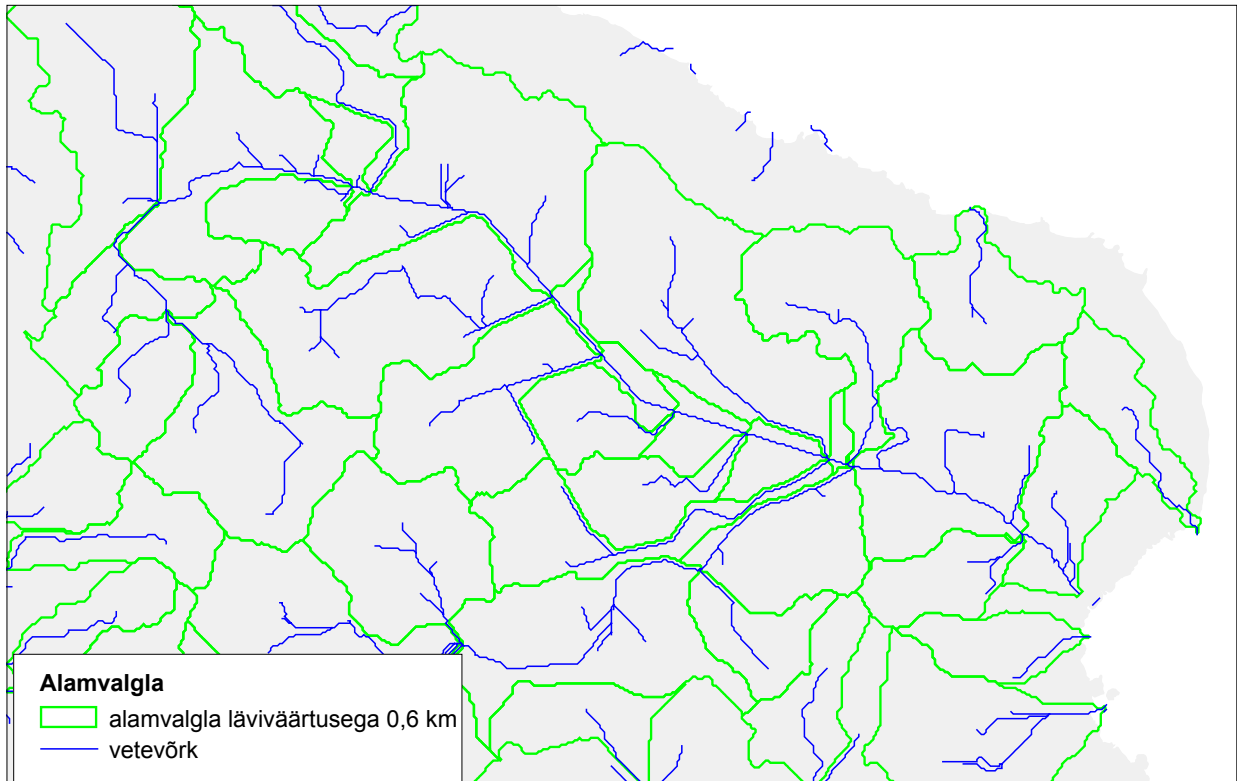
Leitud andmete visuaalseks kontrolliks asetati erineva läviväärtusega leitud peavalglate kontuurid üksteise peale, alates suurimast läviväärtusest. Jooniselt on selgelt näha, et mudeli keskosas langevad kõikide läviväärtustega leitud peavalglate kontuurid täpselt kokku. Suuremad erinevused ilmnevad mudeli servaaladel, kus väiksem läviväärtus võimaldab määratleda valgla ka lühematele vooluveekogudele ja väljavoolupunktiledele lokaalselt. Arvestades saarelise asendi eripära, kus rannajoonega katkestatakse voolujooned kõikides suundades, on väiksema läviväärtusega leitavad peavalglad DEM'i servaaladel täpsemad. Situatsioonis, kus on vaja leida peavalglad piisavalt suurele, igast küljest DEM'i siseossa jäävale piirkonnale ja voolusuundi ei katksetata, ei ole oluline määratleda läviväärtust väga täpselt. Optimaalne tulemus on saavutatav läviväärtustega vahemikus 0,4 – 1 km², sõltuvalt DEM'i piksli suurusest.

Alamvalglate leidmise puhul on oluline määratleda sobiv läviväärtus sõltuvalt vajadusest, kui suur on kõige väiksema huvipakkuva haru valgla pindala, hierarhilises vooluveekogude süsteemis. Limiteerivaks teguriks läviväärtuste määratlemisel on kõrgusmudeli täpsus ja piksli suurus, 100 m pikslisuurusega DEM'ile ei ole võimalik määratleda läviväärtust alla 1 ha. Liiga väike läviväärtus võib põhjustada arvutusmüra, leides alamvalglad tegelikkuses mitte eksisteerivatele paralleelsetele vooluharudele (joonis 32).



Joonis 32. Läviväärtusega 0,1 km² leitud alamvalglad 20 m pikslisuurusega DEM'ilt.

Ülepinnaliselt, DEM'idelt alamvalglate leidmiseks läviväärtuste määramisel on eelnevalt otstarbekas vaadelda ja hinnata olemasolevate aluskaartide vooluvetevõrgu tihedust. Hõredama vetevõrguga piirkondades puudub vajadus määrata läviväärtuseid liiga täpselt, liiga suur väärtus annab aga liiga üldise tulemuse, mis muudab alamvalglate leidmise mõttetuks. Üldjuhul, 20 m – 40 m pikslisuurusega DEM'ide puhul, saavutatakse ülepinnaliselt alamvalglate leidmisel piisav tulemus läviväärtustega vahemikus 0,4 – 1 km² (joonis 33).



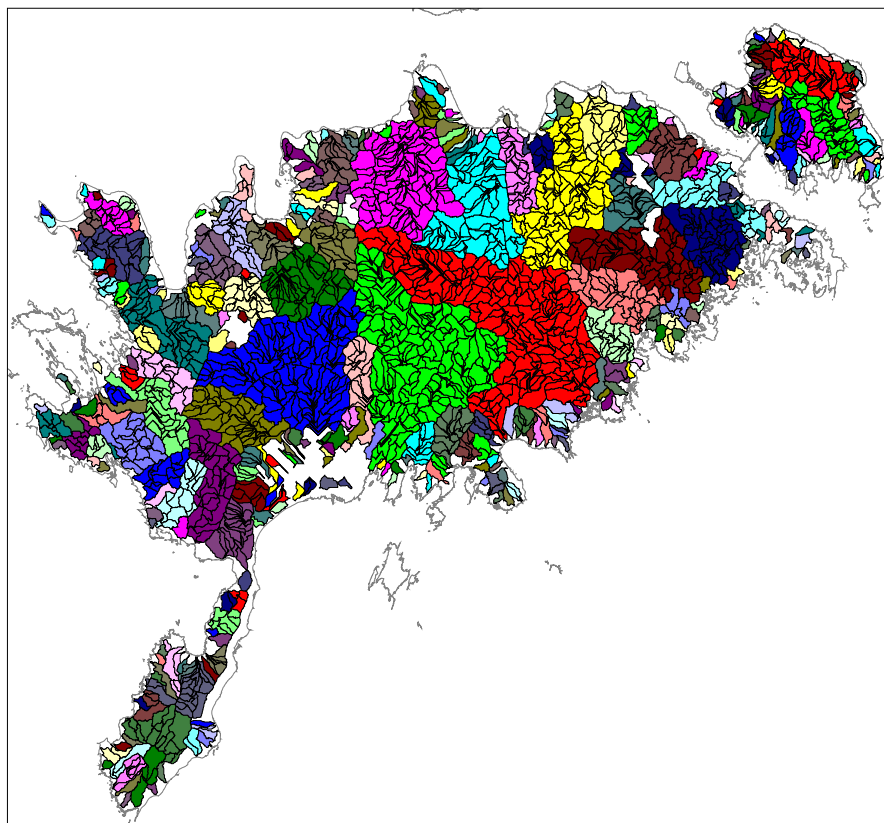
Joonis 33. Läviväärtusega 0,6 km² leitud alamvalglad 20 m pikslisuurusega DEM'ilt.

3.6.1 Hierarhilise valglate süsteemi koostamine

Kasutades programmi StreamBuilder on võimalik koostada hierarhiline, vektorpõhine valglate süsteem. Peavalgla ja alamvalglad on varustatud vastavate identifikaatorite ja atribuutidega, mis määratlevad iga valgla asendi kogu hierarhilises süsteemis ja võimaldavad iga valgla siduda konkreetse vooluveekoguga. Valglate süsteemi koostamiseks on kaks põhimõtet. Valglate leidmine aukudega, väljalõigatud järvede ja karstialadega, DEM'ist ja valglate leidmine ülepinnaliselt, aukudeta DEM'ist.

3.6.1.1 Valglate leidmine aukudega DEM'ist

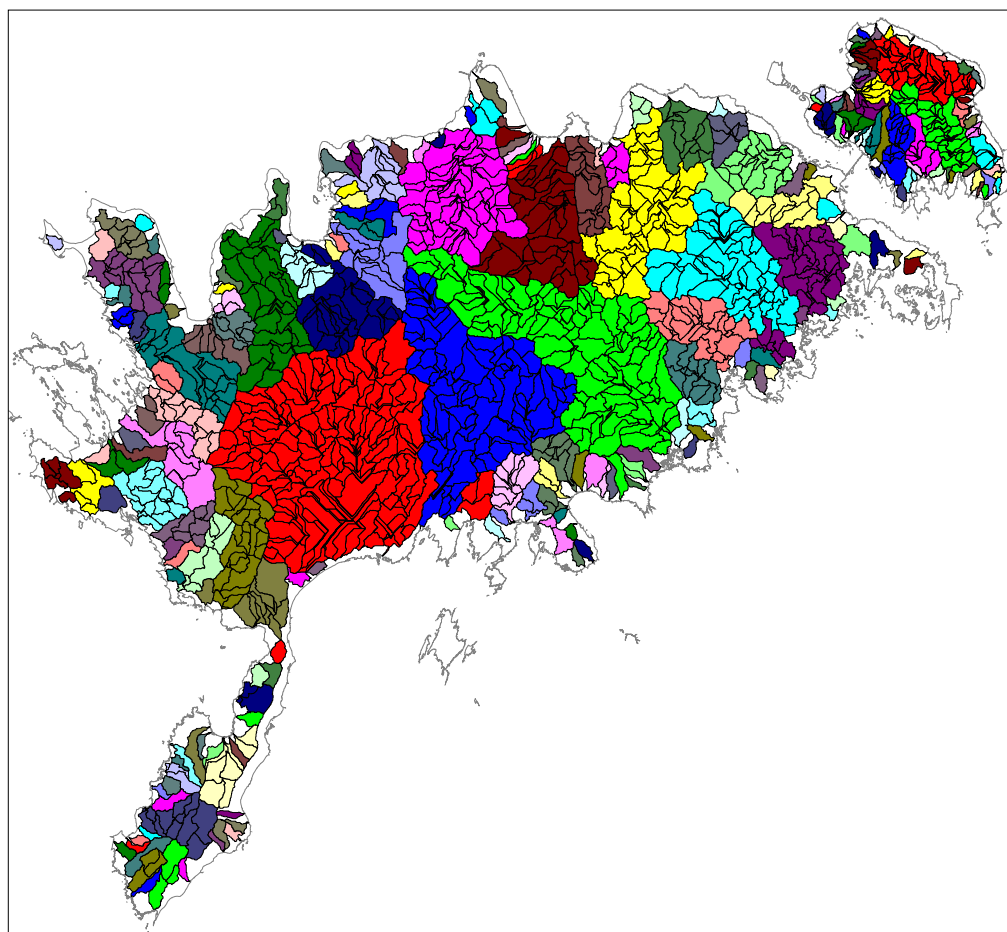
Võimalus siduda valglad konkreetsete vooluveekogudega eeldab, et vooluveekogude ja valglate leidmiseks kasutatakse ühte ja sama DEM'i. Vooluveekogude leidmisel suurema täpsuse saavutamiseks tuleb kõrgusmudelist välja lõigata järved, karstialad, suuremad vooluveekogudeta sood ja rabad. Aukudega DEM'ist leitud valglate süsteemi luuakse vastavalt kõrgusmudelile samuti augud ja valglate süsteem ei ole seetõttu katkematu. Aukudega süsteemi eeliseks on võimalus määratleda eraldiseisvane valglad kõikidele voolujooni katkestavatele soodele, järvedele ja karstialadele ning kõik alamvalglad on seotud ruumiliselt korrektsete vooluveekogude lõikudega (joonis 34).



Joonis 34. Aukudega DEM'ist leitud valglate süsteem.

3.6.1.2 Valglate leidmine aukudeta DEM'ist

Saarelisest asendist tulenevalt on kõikide pinnavete lõplikuks suublaks ümbritsev meri. Suuremaid väljavooluta sulglohke uuringualal põhimõtteliselt ei esine, seetõttu on järved, sood ja karstialad osad suuremast merre suubuvast valglast. Aukudeta DEM'ist leitud valglate süteem on terviklik ja katkematu, käsitledes seisuveekogude ja soode alust pinda osana hierarhilisest süsteemist. DEM'i täitmise protsessi käigus silutakse karstlehtrite alla jäävad alad kõrgusmudelist välja ja moodustuvad katkematud voolujooned. Leitud katkematutele voolujoontele vastavalt leitakse ka katkematu valglate süsteem (joonis 35).



Joonis 35. Aukudeta DEM'ist leitud valglate süsteem.

Aukudeta DEM'ilt leitud valglate süsteemi suurim viga tuleneb eelpool nimetatud DEM'i täitmise käigus katkematute voolusuundade leidmisest. Teatud juhtudel silutakse mudelist välja ka looduses tegelikult eksisteerivad voolujooni katkestavad, või voolusuunda muutvad kõrguserinevused. Aukudeta mudelilt leitud katkematud voolujooni teatud lõikudes realselt maastikul ei eksisteeri, või asuvad need ruumiliselt vales kohas. Kuna valglate leidmine on

otseselt seotud voolujoontega, moonutatakse vastavalt ka valglate andmeid ja lõpptulemus on ruumiliselt ebatäpsem kui aukudega mudelilt leitud valglate andmestik.

Automaatselt DEM'ilt leitavate valglate leidmisega kaasnevad alati probleemid mudeli servaaladel, eriti mudeliala saarelise asendi puhul, kus positiivseid reljeefiväärtusi ümbritseb nullväärtusega ala. Rannikualale jääb enamus juhtudel piirkond, mis ei vasta voolujoonte ja valglate leidmise kriteeriumitele ja jääb arvutustest välja. Sellistel juhtudel tuleks valglate andmebaasi vastavad alad käsitsi sisse digitaliseerida, lõigates digitaliseeritud polügonide külgi ümbritsevate valglate piiride ja rannajoonega. Käsitsi digitaliseeritud aladele tuleks anda muutumatu identifitseerimiskood, kasutades automaatselt leitud koodidele järgnevaid numbreid.

Võrreldes valikuliselt peavalglate kontuure samades jõelõikudes automaatselt leitud vooluveekogude ja mudelisse sobitatud vooluveekogude puhul, ei esine peavalglate kontuurides olulisi erinevusi. Seetõttu ülepinnaaliliselt leitavate peavalglate leidmisel, juhul kui alamvalglate andmeid ei vajata, ei ole oluline väiksemate harujõgede ja kraavituse mudelisse „sisse kõrvetamine“.

4. KOKKUVÕTE

Käesoleva töö üks peamine eesmärk oli luua Saaremaa ja Muhu saare suurema täpsusklassi reljeefimudel, eesmärgiga kasutada seda mudelit hüdrooloogilise modelleerimise lähteandmetena. Kõrgusmudeli koostamiseks kasutati NSVL Geodeesia ja Kartograafia Peavalitsuse poolt 1980-ndatel aastatel parandatud 1 : 10 000 topograafilise kaardi reljeefikiht. Antud reljeefiandmed on käesoleva ajani kõige täpsemad, ülepinnaliselt kaardistatud kõrgusandmed Saaremaal ja Muhu saarel. Topograafilise kaardi trükikiled skaneeriti TIF rasterformaati ja skaneeritud pildid koolutati (vorbiti) Eesti Põhikaardi projektsiooni. Eraldiseisva trükikile tarbimisväärtust vähendab teatud juhtudel asjaolu, et trükikilel ei kajastu kõrguspunktide andmed, mis määratleksid täpsemini lokaalsed miinimum ja maksimum kõrgusväärtused. Koolutatud rasterformaadis samakõrgusjooned digitaliseeriti ja väärtustati kõrgusandmetega. Sõltuvalt kasutatava tarkvara eripärast, kõrgusmudeli koostamiseks kasutati programme MapInfo Professional ja VerticalMapper, konverteeriti kõrgusjoonte nurgapunktidest punktandmed.

Lähtuvalt eesmärgist kasutada DEM kõrgusmudelit automaatseks vooluveekogude ja valglate arvutamiseks, prooviti katseliselt leida optimaalne interpoleerimisviis sobivaima kõrgusmudeli koostamiseks. Võrdlusena kasutati kõrgusmudeli koostamiseks algselt kahte lähima väärtusega *Natural Neighbour* ja *Kriging* interpoleerimistehnikat valitud proovialadel Saaremaal ja Muhu saarel. Interpoleerimisparameetrite valimisel lähtuti ettevalmistava etapi tulemustest ja lähtuvalt lõppeesmärgist leida võimalikult täpselt ja omavahel võrreldavalt valglad nii globaalselt kui lokaalselt. Kummagi tehnikaga koostati kolm samade interpoleerimisparameetritega ja erineva pikslisuurusega kõrgusmudelit vastavalt 20 m, 30 m ja 40 m mõlemal proovialal. Koostatud mudelitest leiti ka nõlvakalde (*Slope*) ja nõlvasuuna (*Aspect*) andmed. Kõrge korrelatsiooni andsid kõikide *Natural Neighbour* ja *Kriging* mudelite omavahelised võrdlused. Seetõttu võib eeldada, et ülepinnaliste arvutuste puhul, kus tulenevalt andmemahitudest ja lähteandmete täpsusest kasutatakse keskmise pikslisuurusega DEM'i, lõpptulemuse täpsus oluliselt ei vähene.

Katseliselt võrreldi *Natural Neighbour* ja *Kriging* tehnikaga koostatud mudelilt leitud vooluveekogusid omavahel ja aluskaartidega. Katseliste tulemuste visuaalsel hindamisel väga suuri tehnikate omavahelisi erinevusi ei leitud. Arvestades kummagi tehnika ajakulu ja töömahtu mudelite koostamisele kasutati töös edaspidi sobivus- ja täpsushinnangute andmisel *Natural Neighbour* tehnikaga interpoleeritud kõrgusmudeleid. Ainult interpoleerimistehnikate võrdlemisel ei ole võimalik otsustada, milline mudel on vooluveekogude ja valglate leidmiseks sobivaim, kuna enne vooluveekogude ja valglate leidmist tuleb DEM'id eelnevalt täita. Täitmise käigus toimub algsete mudelite silumine ja läbi selle andmete muutmine, mistõttu on hüdrooloogiliste näitajate leidmise seisukohast olulisem ja täpsem võrrelda eelnevalt täidetud DEM mudeleid.

Voolusuundade ja ülesvoolu alade korrelatsioonandmete võrdlemisel ilmneb, et alati ei vähene korrelatsioon piksli suurusest sõltuvalt lineaarselt, vaid sarnasema tulemuse võivad anda keskmise pikslisuurusega mudelid. Leiti, et kasutatavate lähteandmete täpsuse juures on sobivaks piksli suuruseks keskmise suurusega pikslid 20 m kuni 30 m, kus hilisemate ülepinnaliste modelleerimistulemuste täpsus oluliselt ei vähene. Interpoleerimisel ei tohiks agregeerimisraadius ületada 20, muutuja, mille suurendamisel muutub mudel vooluveekogude leidmiseks ebatäpseks.

Oluline on vooluveekogude leidmiseks määratleda õige läviväärtus, et automaatselt leitav vetevõrk ei oleks liiga tihe ega liiga hõre. Optimaalsema tulemuse suurtel pindaladel andsid 20 – 30 m pikslisuurusega DEM-ide puhul läviväärtused 0,4 – 0,6 km².

Automaatselt DEM-ilt leitavate vooluveekogude ja tegelikult eksisteerivate vooluveekogude erinevused võivad olla suhteliselt suured, eriti juhul kui DEM on genereeritud samakõrgusjoonte põhised ja looduslike voolusänge on tuntavalt muudetud. Üks töö eesmärkidest oli leida sobivaim viis lähteandmete muutmiseks detailsemate modelleerimiste läbiviimisel. Põhimõttelisi lahendusi mudeli hilisemaks muutmiseks MapInfo ja VerticalMapper tarkvaradega on mitu. Rasterpõhised, kus manipuleeritakse ainult rasterandmetega ja raster-vektor põhised, kus vahepeal toimub andmete eksportimine ja importimine ühest formaadist teise ning uue DEM mudeli koostamine.

Leiti, et raster – vektor lahendus on täpsem, kuna vektorkujul on lähteandmetega manipuleerimise võimalused suuremad. Lõpptulemuse täpsust suurendab muudetud andmetest koostatud uue kõrgusmudeli kasutamine. Rasterlahendus on samas tunduvalt kiirem ja vähem arvutusmahukas eriti kasutamiseks suurematel pindadel, kuna puudub vajadus andmete formaadi muutmiseks ning uue kõrgusmudeli genereerimiseks.

Automaatseks valglate leidmiseks kasutatakse reeglina samade parameetritega genereeritud kõrgusmudelit, mida kasutatakse vooluveekogude leidmiseks, üldjuhul leitakse vooluveekogud ja neile vastavad valglat üheaegselt.

Automaatse valglate leidmise protsessi käigus on kõige olulisem määratleda õige ülesvoolu läviväärtus, millest sõltub, kui suurt ala käsitletakse eraldiseisva valgla. Katseliste hindamiste tulemusena leiti, et olukorras, kus on vaja leida peavalglad piisavalt suurele, igast küljest DEM-i siseossa jäävale piirkonnale ja voolusuundi ei katkestata, ei ole oluline määratleda läviväärtust väga täpselt. Optimaalne tulemus on saavutatav läviväärtustega vahemikus 0,4 – 1 km², sõltuvalt DEM-i piksli suurusest. Alamvalglate leidmiseks tuleb läviväärtus määratleda vastavalt sellele, kui suur on eeldatavalt kõige väiksema huvipakkuva vooluharu valgla pindala. Limiteerivaks teguriks läviväärtuste määratlemisel on kõrgusmudeli täpsus ja piksli suurus, läviväärtus ei saa olla väiksem piksli suurusest.

Automaatselt DEM'ilt leitavate valglate leidmisega kaasnevad alati probleemid mudeli servaaladel, eriti mudeliala saarelise asendi puhul, kus positiivseid reljeefiväärtusi ümbritseb nullväärtusega ala. Rannikualale jääb enamusel juhtudel piirkond, mis ei vasta voolujoonte ja valglate leidmise kriteeriumitele ja jääb arvutustest välja. Sellistel juhtudel tuleks valglate andmebaasi vastavad alad käsitsi sisse digitaliseerida, lõigates digitaliseeritud polügonide külgi ümbritsevate valglate piiride ja rannajoonega.

5. SUMMARY

AUTOMATIC IDENTIFICATION OF STREAMS AND WATERSHEDS FROM A DEM MODEL OF SAAREMAA AND MUHU

Tambet Kikas

The main objective of this thesis was to create an accurate relief model for Saaremaa and Muhu Island for use as baseline data for hydrological modelling. The elevation relief layer of the model was the 1:10 000 topography map (corrected in the 1980-ties) of the former Soviet Union's Central Board of Geodesy and Cartography. These relief data are the most accurate overlaid mapped elevation data currently available for Saaremaa and Muhu. Print membranes of the topographical map were scanned into TIF raster format and scanned pictures were bent into the projection of the Estonian Basic Map. In some cases, the fact that printed membrane doesn't reflect elevation point data which determine more accurately their local minimum and maximum values can reduce the use value of separate print membrane. The bent raster scaled relief contours were digitised and valued with elevation data. MapInfo Professional and VerticalMapper were used to create the elevation model and point data was converted from the corner points of altitudes depending on the specific software used.

Interpolation methods for creation of a suitable elevation model were tested to find the optimum one for using DEM elevation model for automatic measurement of watersheds. Two Natural Neighbour and Kriging interpolation techniques were initially compared in selected test areas in Saaremaa and Muhu. Interpolation parameters were chosen taking into account the results of the preparation stage and the final objective to find globally and locally accurate and comparable watersheds. Three elevation models were created for both test areas with the same interpolation parameters and different pixel size (20m, 30m, 40m) using both techniques. Slope and aspect data were found from the created models. All comparisons between Natural Neighbour and Kriging models gave high correlations. It is assumed therefore that overlaid calculations, where average pixel sized DEM is used according to the volume of the data and accuracy of the baseline data, doesn't affect the accuracy of the final results.

Flowing water bodies (i.e. rivers, streams, ditches etc.) found from models created using the Natural Neighbour and Kriging techniques were compared with each other and with basic maps. No major differences between the techniques were found from visual evaluation of the test results. Elevation models for further work were interpolated with the Natural Neighbour technique since this was considered to give suitable and accurate estimations with least use of time and labour. However, it is not possible from only comparing interpolation techniques which model is the best for finding flowing water bodies and watersheds because DEMs must

first be filled and this will change the data of the initial model. Therefore, when identifying hydrological characteristics it's more important and accurate to compare DEM models that have been previously filled in.

Comparing the correlation data of flow directions and upper flow areas it is obvious that correlation does not decrease linearly according to pixel size, but models with average pixel size can give more similar result. It was found that with the accuracy of baseline data the suitable pixel size is an average of 20-30m, in that case accuracy of later overlaid modelling results doesn't decrease substantially. Aggregating radius should be less than 20 – increasing this characteristic will make the model inaccurate.

Determining the threshold value for finding flowing water bodies is essential – it will ensure that the automatically found water network won't be too thick nor too sparse. In large areas threshold values of 0,4-0,6 km² gave optimum results for DEMs with pixel size 20-30m.

Changes between actual existing water bodies and water bodies found automatically from DEM can be big, especially when generating DEM is based on relief contours and natural streambeds are changed significantly. One of the objectives of the thesis was to find the best way to change baseline data for carrying out more detailed modelling. There are several solutions for changing the model later with MapInfo or VerticalMapper software: raster based - where manipulation will be done only with raster data, and; raster-vector based - where data exporting and importing form one format into other and creating a new DEM model occurs.

It was found that raster-vector solution is more accurate because in vector form the options for manipulation with baseline data are greater. Using a new elevation model created from modified data will increase the accuracy of a final result. Meanwhile, the raster solution requires less time and calculations, especially for larger areas, because there is no need for changing the data format or generating the new elevation model.

Elevation model generated with the same parameters as used for finding flowing water bodies is used for automatic discovery of watersheds. Generally flowing water bodies and their corresponding watersheds will be found simultaneously.

In the process of finding watersheds automatically, determination of the correct threshold value for upper flow is the most important factor. This value determines the area of the separate watershed. As a result of several tests it was found that in situations where finding watersheds for a large territory surrounded by a DEM and flow directions are not disconnected, accurate determination of threshold value is not that important. Depending on the pixel size of DEM, the optimum result is attainable with the threshold value between 0,4-1 km². When finding sub-watersheds threshold values should be determined according to how large is the assumed surface of the smallest flow branch's watershed. The limiting factor in

determining the threshold's value is the accuracy of the elevation model and the size of pixel - threshold value cannot be smaller than pixel size.

Finding watersheds automatically from DEM causes problems at the edges of the model, especially in the "island" position of the modelling area where positive relief values are surrounded by 0-valued area. Area, which does not correspond to the criteria of finding flow lines and watersheds, will be left out from the calculations. In this case, the corresponding areas of the watershed's database should be manually digitised by cutting the edges of digitised polygons with the borders of surrounded watersheds and coastline.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Abedalrazq, F. K., McKee, M., Kemblowski, M. and Asefa, T., 2005. Basin Scale Water Management and Forecasting Using Artificial Neural Networks. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 41(1):195-208.
2. Barsington, J., Richards, K., 1996. The Role of DEM Resolution and Entropy in the Parameterisation and Evaluation of Hydrology Models. *GeoComputation*.
3. Blackwell, P. R., Wells, G., 1999. DEM Resolution and Improved Surface Representation. *ESRI 1999 User Conference Proceedings, San Diego*.
4. Burroughs, P. P. and McDonnell, R. A., 1998. *Principles of GIS*, Oxford University Press, pp. 299.
5. Clarke, S. and Burnett, K., 2003. Comparison of Digital Elevation Models for Aquatic Data Development. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 69, No. 12, December 2003, pp. 1367-1375.
6. Costa-Cabral, M. and Burges, S. J., 1994. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water resources research*, vol. 30, no. 6, pages 1681–1692.
7. Desmet P. J. J., 1997. Effect of interpolation errors on the analysis of DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 563-580.
8. Dillabaugh, C., 2002. Drainage basin delineation from vector drainage networks. Ottawa, Ontario, Canada.
9. Farenhorst, A., Florinsky, I.V., Monreal, C.M. and Muc, D., 2003. Evaluating the use of digital terrain modelling for quantifying the spatial variability of 2,4-D sorption by soil within agricultural landscapes. *Canadian Journal of Soil Science*, 83: 557–563.
10. Gao, J., 1998. Impact of sampling intervals on the reliability of topographic variables mapped from grid DEMs at a micro-scale. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 12, no. 8, 875-890.
11. Garbrecht, J. and Martz, L. W., 1994. Grid Size Dependency of Parameters Extracted from Digital Elevation Models. *Computers and Geosciences*, 20(1):85-87, 1994.
12. Garbrecht, J. and Martz, L. W., 1996. Comment on "Digital Elevation Model Grid Size, Landscape Representation, and Hydrologic Simulation" by Weihua Zhang and David R. Montgomery. *Water Resources Research*, 32(5):1461-1462, May 1996.
13. Garbrecht, J. and Martz, L. W., 1999. Digital Elevation Model Issues In Water Resources Modeling.
<http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm>
14. Garbrecht, J. and Starks, P. J., 1995. Notes on the Use of USGS Level 1 7.5-Minute DEM Coverages for Landscape Drainage Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(5):519-522, May 1995.
15. Hutchinson, M. F., 1996. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models.
<http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/papers/local.asp>

16. Jagomägi, T., 1999. Geinfosüsteemid praktikule, REGIO.
17. Jenson, S. K. and Domingue, J. O., 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis.
<http://edna.usgs.gov/Edna/pubs/extractingtopographicstructure1.pdf>
18. Krusberg, P., 1997, Ruumiandmete töötamise võimalused (Eesti baaskaardi näitel). Magistritöö, Tallinn.
19. Laas, A., 2002. Mullaerosiooni leidmine USLE mudeli abil Sipe valglas. Magistritöö, Tartu.
20. Lea, N. L., 1992. An aspect driven kinematic routing algorithm, in Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics, edited by A. J. Parsons and A. D. Abrahams, Chapman & Hall, New York, 1992.
21. Liang, C. and Mackay, D. S., 2000. A general model of watershed extraction and representation using globally optimal flow paths and up-slope contributing areas. International Journal of Geographical Information Science, vol. 14, no. 4, 337-358.
22. Lundin, L.-C., 2000. The Waterscape – Sustainable Water Management in the Baltic Sea Basin, Uppsala.
23. Mackay, D. S. and Band, L. E., 1998. Extraction and representation of nested catchment areas from digital elevation models in lake-dominated topography. Water resources research, vol. 34, no. 4, pages 897-901.
24. Mark, D. M., 1988. Network models in geomorphology. In: M.G.Anderson (ed.). Modelling Geomorphological Systems. Chichester, etc.: John Wiley & Sons, Ltd., Ch.4, 73-97.
25. Mitsova, H. and Mitsova, L., 1998. Process Modeling and Simulations, NCGIA,
<http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/papers/u130/u130.html>
26. Mitsova, H. and Hofierka, J., 2003. Impact of new mapping technologies on communication of geospatial information. Kartografické listy, 2003, 11
http://skagit.meas.ncsu.edu/~helena/gmslab/papers/KL_Mitsova_Hofierka.pdf
27. Montgomery, D. R. and Foufoula-Georgiou, E., 1993. Channel network representation using digital elevation models. Water Resources Research 29: 3925-3934.
http://www.geo.oregonstate.edu/classes/geo582/week_3_1_eros_thresh_channel_net/Montgomery&Foufoula-Georgiou1993.pdf
28. O'Callaghan, J. F. and Mark, D. M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data: Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 28, pp. 323-344.
29. Olivera, F. and Rajeev, R., 2003. Development of Large Scale Gridded River Networks From Vector Stream Data. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 39(5):1235-1248.
30. Olivera, F., Reed, S. and Maidment, D. R., 1998. HEC-PrePro v. 2.0: An ArcView Pre-Processor for HEC's Hydrologic Modeling System. ESRI User's Conference, July 25-31, 1998. San Diego, California, Center for Research in Water Resources, University of Texas.
<http://www.crrwr.utexas.edu/gis/gishydro99/watchar/papers/esri98/p400.htm>

31. Peralvo, M., 2003, Influence of DEM interpolation methods in Drainage Analysis.
<http://www.crrw.utexas.edu/gis/gishydro04/Introduction/TermProjects/Peralvo.pdf>
32. Stone, S. A., 2001. Geospatial database and preliminary flood hydrology model for the lower Colorado basin.
33. Straus, Ü., 2001. Morfomeetriliste näitajate ja peamiste reljeefielementide sõltuvus interpoleerimismeetodist (Porijõe valgla näitel). Käsikirjaline materjal, Tartu.
34. Tarboton, D. G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models.
<http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/dtarb/dinf.pdf>
35. Tarboton, D. G., 2004. Terrain Analysis and Hydrologic Modeling using Digital Elevation Models and GIS, CUAHSI Cyberseminar presentation, March 5, 2004.
36. Tarboton, D. G. and Ames, D., P., 2001. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data.
<http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/dtarb/asce2001.pdf>
37. Thompson, J. A., Bell, J. C. and Butler, C. A., 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modelling. *Geoderma*, 100: 67-89.
38. Toompuu, A., Loeng optimaalanalüüsis, I. 4/10/2005
<http://www.sea.ee/Events/default.htm>
39. Tribe, A., 1992. Automated Recognition of Valley Heads from Digital Elevation Models. *Earth Surface Processes & Landforms*, 16(1):33-49.
http://www.engineering.usu.edu/cee/faculty/dtarb/CUAHSI_March_04.ppt
40. Vivoni, E. R., Ivanov, V. Y., Bras, R. L. and Entekhabi, D., 2003. On the effects of triangulated terrain resolution on distributed hydrologic model response.
41. Wilson, J. P. and Gallant, J., C., 2000. Digital Terrain Analysis. In: J.P. Wilson and J.C.Gallant (Editors), *Terrain Analysis: Principles and Application*. John Wiley and Sons, pp. 1-27.
42. Zhang, W. and Montgomery, D. R., 1994. Digital Elevation Model Grid Size, Landscape Representation, and Hydrologic Simulations. *Water Resources Research*, 30(4):1019-1028.
43. Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., and Planchon, O., 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models, *Hydrol. Proc.*, 5, 59–80, 1991.