

Tartu Ülikool
Bioloogia-geograafiateaduskond
Geograafia instituut

Dissertatsioon *magister scientiæ* kraadi taotlemiseks
geoinformaatikas

Eesti geoloogilise kaardistamise kolmemõõtmeline keskkond

Ott Pruulmann

Juhendaja: dots.Jüri Roosaare

Tartu 2007

Sisukord

1.	Sissejuhatus.....	3
1.1.	Geoloogiline baaskaart täna.....	3
1.2.	Probleemid.....	4
1.2.1.	Komplekssus.....	4
1.2.2.	Kaardistatavad kivimkehad.....	4
1.3.	Lahendus.....	5
2.	3D maapõue mudeli käsitlemine.....	7
2.1.	3D mudelid arvutis.....	7
2.1.1.	Regulaarne võre.....	7
2.1.2.	Rakk-mudel.....	8
2.1.3.	Topoloogiline piirpindade esitus (<i>Topological B-Rep</i>).....	9
2.1.4.	3D andmebaasides: 3D ja 2.5D.....	11
2.2.	Geoloogiline modelleerimine.....	12
2.3.	Geoloogiline süntaks.....	13
2.4.	Päringud 3D mudeli põhjal.....	15
2.5.	Andmetihedus ja täpsus.....	16
2.6.	3D mudeli lisaväärtused.....	18
2.6.1.	Kolmemõõtmeline visualiseerimine.....	18
2.6.2.	Uued teemakaardid.....	19
2.6.3.	Simulatsioonid.....	20
2.7.	Olemasolevad 3D geoloogia tarkvarad.....	20
2.7.1.	gOcad (Earth Decision Suite).....	20
2.7.2.	GSI3D.....	22
2.7.3.	RockWorks.....	23
2.8.	Teiste riikide kogemus.....	23
3.	Eesti geoloogilise 3D mudeli keskkond <i>ESRI ArcScene</i> baasil.....	26
3.1.	Vajadused.....	26
3.2.	Üldised alused.....	27
3.3.	Reaalsus- ja infomudeli kohandamine.....	28
3.4.	Agregeeritav geoloogiline süntaks.....	33
3.5.	Piirpindade mudel <i>ESRI</i> platvormil.....	37
3.6.	Piirpindade redigeerimine.....	42
3.7.	Generaliseerimine.....	43
3.8.	Astangud ja rikked.....	43
3.9.	Piirpindade mudeli välised andmed.....	47
3.10.	Keskkonna parameetrid.....	47
3.11.	Läbilõigete genereerimine.....	49
3.12.	2D kaartide genereerimine.....	50
3.13.	3D vaate loomine.....	52
3.14.	<i>ArcScene</i> 'i laiendus.....	54
4.	Arutelu.....	56
5.	Kokkuvõte.....	58
6.	Summary The framework for 3D geological model of Estonia.....	60
7.	Kasutatud materjalid.....	63
8.	Lisad.....	66
8.1.	Lisa 1. Andmemudel.....	66

1. Sissejuhatus

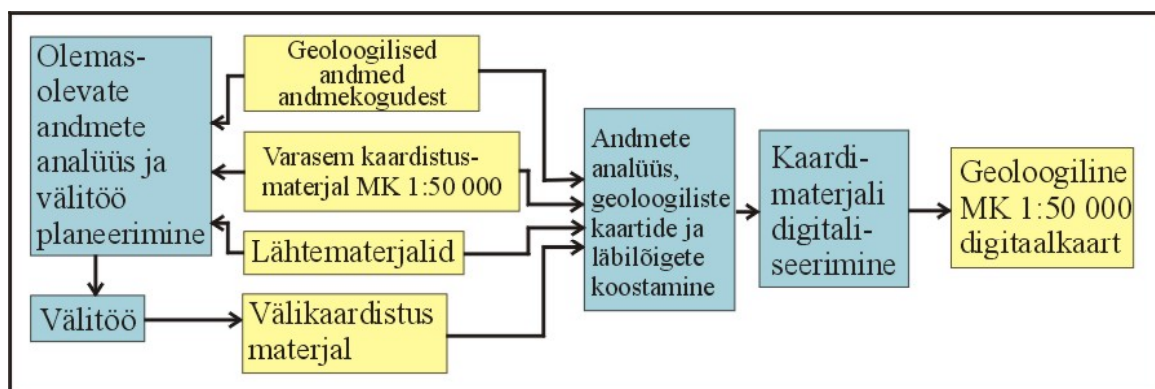
1.1. Geoloogiline baaskaart täna

Alates 2003. aastast on riikliku geoloogilise baaskaardi tellijaks, haldajaks ja levitajaks Maa-amet. Geoloogilise kaardi tootja selgitatakse riigihangetel. Geoloogiline baaskaart koosneb geoloogiliste kaartide komplektist, kuhu kuuluvad 10 teemakaarti: aluspõhja geoloogia, pinnakatte geoloogia, aluspõhja reljeefi, pinnakatte paksuse, hüdrogeoloogia, põhjavee kaitstuse, geomorfoloogia, aeromagnetiliste anomaaliate, gravitatsioonijõu anomaaliate ja maavarade perspektiivalade teemakaardid. Teemakaartide andmestik on omavahel seotud, kusjuures osa teemakaartidest (nt põhjavee kaitstus) on tuletatud teiste kaartide andmetest (Maa-amet 2007a).

Geoloogiline kaardistamine mõõtkavas 1 : 50 000 kätkeb endas (Maa-amet 2007b):

- o varasema geoloogilise kaardistusmaterjali (mõõtkavas 1 : 50 000) digitaliseerimist,
- o varasemate geoloogiliste uuringuandmete revideerimist ja valikulist digitaliseerimist,
- o välikaardistamist (e välitööd),
- o varasema kaardistus- ja geoloogiliste andmete ning uute välitööde andmete analüüsil geoloogiliste kaartide ning läbilõigete koostamist ja digitaliseerimist.

Geoloogilise baaskaardi tootmise skeem on toodud joonisel 1.



Joonis 1. Geoloogilise kaardistamise (mõõtkavas 1:50 000) tehnoloogiline skeem.

Geoloogilise kaardistamise tulemuseks teostaja poolt on *Microstation design file v8 (DGN)* formaadis failid vastavalt geoloogilise kaardistamise juhendile. Juhendis on kirjeldatud ka kaardistatavad nähtused. DGN failid on kujundatud selliselt, et nende baasil on võimalik toota trükikaarti. Maa-ametis kantakse digitaliseeritud andmed üle *GeoMedia* andmebaasi (*Microsoft Access*), andmed kontrollitakse ja lisatakse vajalikud

tärkandmed (Pruulmann 2005). Sellisel kujul andmed on kergesti kasutatavad. Sama struktuuri kasutab ka Maa-ameti avaliku teenuse geoloogia kaardirakendus.

2007. aasta alguse seisuga on digitaalselt kaardistatud 12 Eesti baaskaardi rohkem kui sajast kaardilehest. Mõned teemakaardid on olemas lisaks seitsmel kaardilehel ning kaardistamist alustatakse lisaks kolmel kaardilehel.

1.2. Probleemid

1.2.1. Komplekssus

Kaardistuse lõpptooteks on ruumiandmete tabelid andmebaasis. Suurimaks puuduseks praeguse tehnoloogilise skeemi juures on see, et valminud ruumiandmed, mis on loogiliselt omavahel seotud (kompleksne kaardistus), ei ole omavahel seotud tehniliselt. Senise praktika käigus on ette tulnud olukordi, kus välitööde käigus on kogutud materjale, mis muudavad sama ala juba valminud teemakaarte. Praeguse skeemi korral tuleb sellisel juhul varem valmistatud kaardid ümber teha, alates autorikaardi joonistamisest kuni muudatuste andmebaasi viimiseni.

Tüüpiliseks näiteks on aluspõhja reljeefi ja pinnakatte paksuse kaardid, kui aluspõhja reljeefi ja aluspõhja avamuste kaardid on valmistatud ühel aastal ning pinnakatte paksuse kaarti valmistatakse järgmisel aastal. Pinnakatte paksuse kaardi valmistamisel kogutud uued andmed mõjutavad ka aluspõhja reljeefi – ja sellest tulenevalt ka avamuste kaarti. Vale oleks komplekskuse tagamiseks uued aluspõhja reljeefi kaardiga mitte sobivad andmed kõrvale jätta, vaid aluspõhja reljeefi kaart tuleks uusi andmeid arvestades ümber teha. Sellest johtuvalt muutub aga ka aluspõhja avamuste kaart, mis samuti tuleks ümber teha. Tehniliselt seotud andmete korral oleks nende paranduste tegemine automaatne.

Maapõue kohta uute teadmiste ilmnemisel juba kaardistatud aladel (nt puurimine mõne teise projekti raames) pole selle geoloogilisse kaarti sisseviimine lihtne. Jällegi tuleb kõik mõjutatud teemakaardid alates autorijoonisest üle teha.

1.2.2. Kaardistatavad kivimkehad

Aluspõhja geoloogilise teemakaardi tarbeks kaardistatakse kivimeid tavaliselt kihistu tasemeni. Kuna kõikide kihistute avamus pole kaardil näitamiseks piisavalt suur ja vahel on kihistuid üksteisest raske eristada, liidetakse teatud juhtudel osad lito-stratigraafilised üksused omavahel kokku. Sellest tulenevalt käsitletakse kihistuid ja

teisi kaardistatavaid üksusi kivimkehadena, mida kaardil kujutatakse avamusalade ja läbilõigete abil (Maa-amet 2007a).

Ette on tulnud olukordi, kus varem kaardistatud lehel kokku liidetud kihistud on järgmistel kaardilehtedel piisavalt paksud ja suure avamusega, et iseseisvalt kivimkeha moodustada ning nende jaoks on juhendisse lisatud uued kivimkehad. Ka teistpidine kulg on võimalik, kus varem piisavalt paksud kihistud on uutel kaardilehtedel liialt õhukesed ning need tuleb teiste kihistutega kokku liita. Selle tulemusena kuulub sama kihistu mitme kivimkeha koosseisu. Nii muutub aga segasemaks kaardistuse juhend ning keerukamaks andmeanalüüs. Nt kihistu avamusi otsides tuleb arvestada kõikide kivimkehadega, kuhu kihistu kuulub, ja tulemus sisaldab ka teiste seotud kihistute avamusi.

1.3. Lahendus

Mõlema kirjeldatud probleemi lahendust näeb autor kolmemõõtmelise maapõue mudeli kasutuselevõttus.

3D maapõue mudel seob erinevad teemakaardid ka tehnilisel tasemel. Uute teadmiste ilmnedes ei muudeta sel juhul kõiki teemakaarte eraldi, vaid ainult mudelit. Teemakaardid, mis oma olemuselt on vaated sellele mudelile, uuendatakse seejärel mudeli põhjal automaatselt.

3D mudelis tuleb kivimkehad eraldada võimalikult detailselt, vaatamata kihistute paksusele või avamusala suurusele. Mudelile tuleb ka õpetada kivimkehade liitmise reegleid, mille järel on võimalik genereerida vastavalt mõõtkavale topoloogiliselt ja kartograafiliselt korrektseid teemakaarte. Kihistute liitmise tingib nende mittemõõtkavalisus kaardistatavas mõõtkavas (1:50 000), 3D mudel oleks aga mõõtkavata. Nii saaks defineerida ka reegleid teiste mõõtkavade kohta. Nt väiksemas kui 1:1 000 000 mõõtkavas näidataks vaid ladestute piire, kuid mida suuremas mõõtkavas mudelit vaadata (teemakaarti genereerida), seda detailsemad kivimkehad on. Kasutaja saaks ka kivimkehi vastavalt suvale mõõtkavast sõltumata ümber klassifitseerida.

Kivimkehade automaatne liitmine ei nõua tegelikult kolmemõõtmelise mudeli kasutamist. Sama tulemus on saavutatav ka kahemõõtmelistel andmetel, kui avamused on eraldatud võimalikult täpselt kogu kaardi ulatuses. Praegune kaardi tootmise skeem, kus kaardi vaheprodukt on suunatud 1:50 000 mõõtkavas trükikaardi tootmiseks (DGN failid) seda ei võimalda.

Kolmemõõtmelise mudeli tootmist on alustatud mitmel pool maailmas, seda nii riikides, kus üleriigiline kahemõõtmeline 1:50 000 kaardistamine on lõpule viidud (Suurbritannia), kui riikides, kus kahemõõtmeline kaardistamine alles pooleli (Prantsusmaa). Kolmemõõtmelise mudeli kasutuselevõtt on kasulik ka ilma eeltoodud probleemideta, kuna see omab kahemõõtmelise kaardi ees mitmeid eeliseid.

Käesoleva töö eesmärgid on:

- põhjendada 3D maapõue mudeli kasutuselevõtu otstarbekust geoloogilise kaardistamise juures,
- anda ülevaade maapõue 3D modelleerimise põhimõtetest, võimalustest, varasematest töödest sellel teemal ja muu maailma kogemusest ning
- töötada välja keskkond (andmestruktuur, tehnoloogiline skeem ja tarkvara lahendused) Eesti maapõue 3D modelleerimiseks ja mudeli haldamiseks?.

Esimesele eesmärgist on pühendatud sissejuhatav peatükk ning vihjeid sellele leidub kogu töös. Teine ja kolmas eesmärk leiavad käsitlust eraldi peatükkide all. Töö lõppeb aruteluga tulemuste üle.

2. 3D maapõue mudeli käsitlemine

2.1. 3D mudelid arvutis

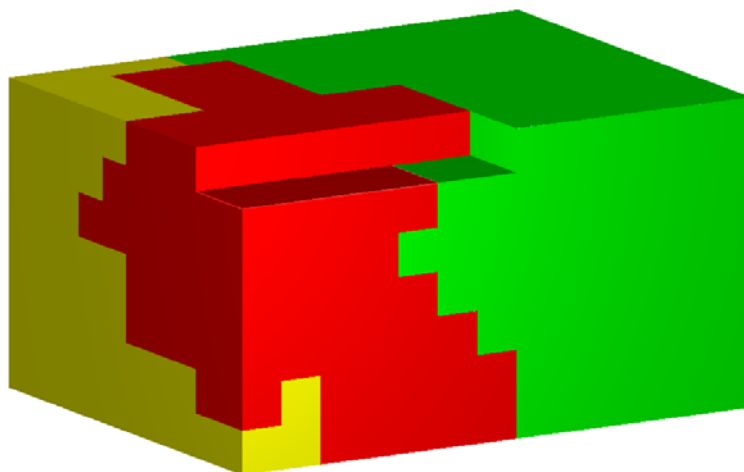
Kolmemõõtmeliste mudelite säilitamiseks arvutis on välja töötatud mitmeid erinevaid andmestruktuure. Kõige lihtsamad 3D mudelid kirjeldavad mõnda konkreetset objekti, näiteks “kolli” arvutimängus. Selliseid mudeleid salvestatakse objekti pinda kirjeldavate (*B-Rep; boundary representation*) punktide võrgustikuna (*mesh*) sarnaselt TIN kõrgusmudelile. Erinevuseks on see, et ühele x,y koordinaatpaarile võib 3D mudelis vastata mitu z väärtust. Tuntuimad sellised mudelid on “Utah teepott” ja “Stanford’i jänku”. Võrkmodelid on seest tühjad ja võimalik on mudeli pinnale jätta auke (Botsch et al. 2006).

Geoloogilise mudeli kirjeldamiseks pole see viis kõige sobivam, sest eraldi objektidena (mudelina) tuleks kirjeldada kõik maapõue homogeensed osad. Erilist tähelepanu tuleb siis pöörata nende objektide omavahelistele suhetele (topoloogiale). Pole garanteeritud, et objektide vahele ei jää tühimikke ja et objektid omavahel ei kattuks. Mingi kindla piirkonna sisemise struktuuri kirjeldamiseks (nagu maapõue kirjeldamine) on mitmeid muid võimalusi, mille korral kirjeldatakse kogu uuritav ruum. Sellisel juhul on võimalik iga $x-y-z$ koordinaadikolmiku korral leida otsitava atribuudi väärtus (kivimkeha kood, veelademe indeks, litoloogia tüüp vms).

2.1.1. Regulaarne võre

Regulaarse võre (*regular grid*) korral on kogu uuritav ruum regulaarselt homogeenseteks osadeks jaotatud (Joonis 2). Sealjuures ei pea jaotus olema alati piki koordinaatsüsteemi telgi ja igal teljel ühesugune, kuigi selliste võrede kasutamine on tunduvalt lihtsam. Regulaarse võre silmi (vähim jaotus) nimetatakse vokseliteks. (<http11>).

Regulaarne võre on võrreldav rasterpiltidega. Rasterpiltidega sarnased on ka tema plussid ja miinused. Nii sõltub mudeli täpsus jaotuse tihedusest – resolutsioonist. Mida suurema resolutsiooniga mudelit kasutada, seda suurem on ka andmemah, sest vokselite arv kasvab. Samas on regulaarne võre ideaalne mitmete analüüside ja simulatsioonide läbi viimiseks. Kuigi mudel on andmemahukas, on matemaatilised operatsioonid mudelil lihtsad ja kiired. Samuti võimaldab regulaarne võre lihtsalt simuleerida nähtuste käitumist (nt põhjavee liikumine, magnetlainete levimine) suurema homogeense plokki (koosneb mitmest vokselist) siseselt.



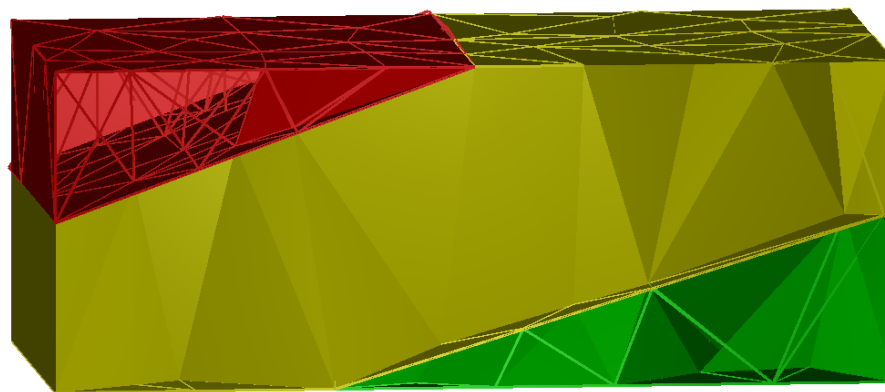
Joonis 2. Regulaarne võre.

Maapõue modelleerimine regulaarse võre korral käib interpoleerimise abil. Mõeldamatu oleks lasta modelleerijal määrata eraldi iga vokseli väärtus. Edasine mudeli muutmine ja interpolatsiooni korrigeerimine on aga mahukas käsitöö. Et aga regulaarne võre on sobilik analüüside läbiviimiseks, siis genereeritakse see tihti mõnel teisel kujul loodud mudeli põhjal (rasteriseeritakse).

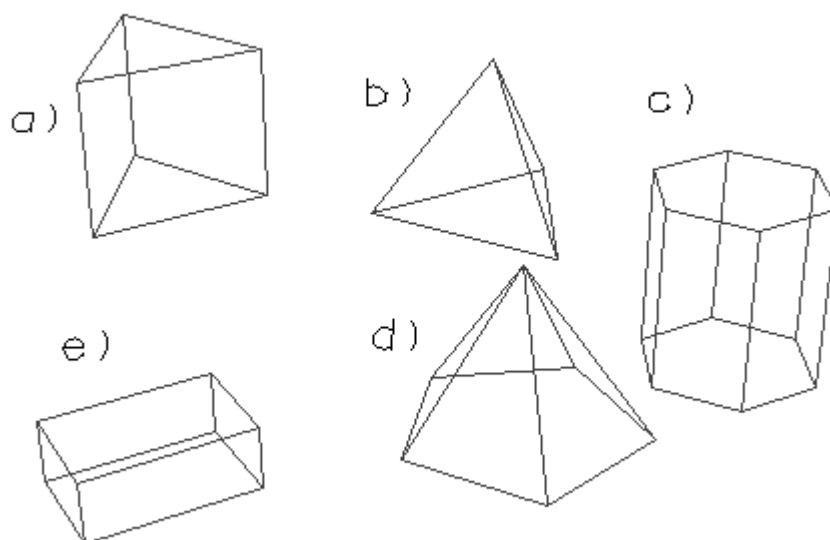
2.1.2. Rakk-mudel

Rakk-mudel (*Cellular model*) on oma olemuselt ebaregulaarne võre. Selle korral on uuritav ala sarnaselt regulaarsele võrele jaotatud homogeenseteks osadeks. Jaotus ei ole aga regulaarne ning informatsioon jaotuse kohta tuleb eraldi säilitada (Joonis 3). Mudeli erinevates osades võib jaotus (raku suurus ja kuju) olla erinev. Paralleele saab tõmmata TIN mudeliga. Kui TIN koosneb erineva suurusega kolmnurkadest, siis 3D mudeli korral kasutatakse kolmemõõtmelisi primitiive (Joonis 4). Lihtsamal juhul kasutatakse kogu mudelis üht primitiivi, kuid on välja töötatud ka tehnikaid erinevate primitiivide (või sama primitiivi modifikatsioonide) kasutamiseks samas mudelis (Wu 2004, Gong et al. 2004).

Rakk-mudelit on võimalik salvestada primitiivipõhiselt. See muudab aga mudeli mittetopoloogiliseks. Ka andmebaasisüsteemid ei võimalda veel kolmemõõtmelisi primitiive salvestada (kuigi selles suunas töötatakse (Arens et al. 2005, [http9](http://))). Korrektse topoloogia tagamiseks salvestatakse eraldi kõik raku nurgad, servad ja tahud ning külgnevad primitiivide korral salvestatakse ühine tahk (ja selle servad ja nurgad) vaid ühe korra (Hansen, Christensen 1993). Arendatud on mitmeid süsteeme, kuidas ja milliseid nurki ja servi andmebaasi salvestada (Zlatanova et al. 2003).



Joonis 3. Rakk-mudel. Primitiiviks tetraeeder.



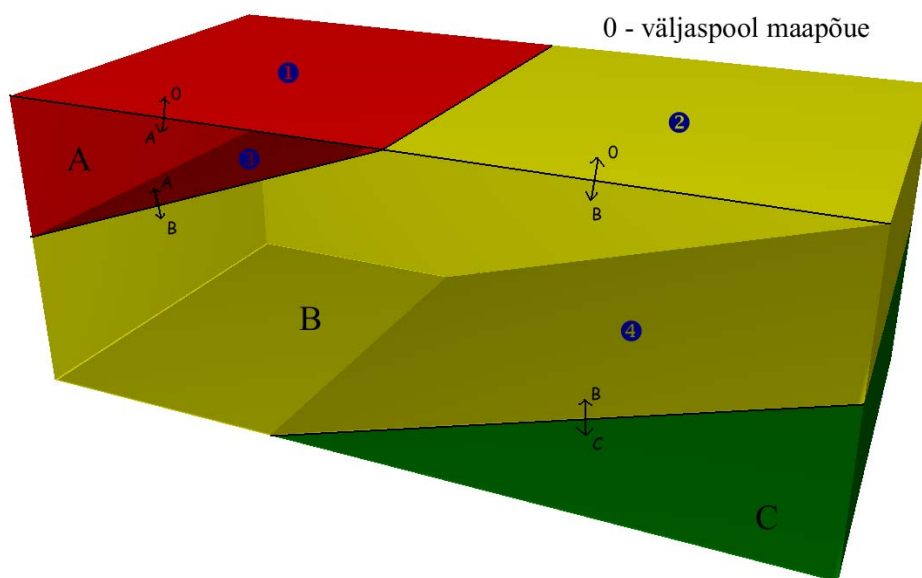
Joonis 4. Valik kolmemõõtmelisi primitiive: a) kolmnurkne prisma (tri-prism), b) tetraeeder, c) kuusnurkne prisma, d) viisnurkne püramiid ja e) risttahukas.

Rakk-mudel on sobilik mitmesuguste mudeli muutumisega (väändumine, nihkumine) seotud protsesside simuleerimiseks. Geoloogilise mudeli korral on sellisteks tektooniliste liikumiste, varingute, maalihete jms simuleerimine (Santi et al. 2003). Eelduseks on mudeli omadus, et selliste protsesside simuleerimisel ei ole vaja muuta primitiivide väärtusi (omadusi), vaid on võimalik muuta primitiivi kuju ja seost teiste primitiividega vastavalt tema omadustele.

2.1.3. Topoloogiline piirpindade esitus (*Topological B-Rep*)

Geoloogilise mudeli modelleerimiseks peetakse kõige sobivamaks topoloogilist piirpindade esitust. Ware ja Jones (1997) on selle mudeli nimetanud koguni kitsendatud geoloogiline mudel (*Constrained Geological Model – CGM*). Sellisel juhul on kogu

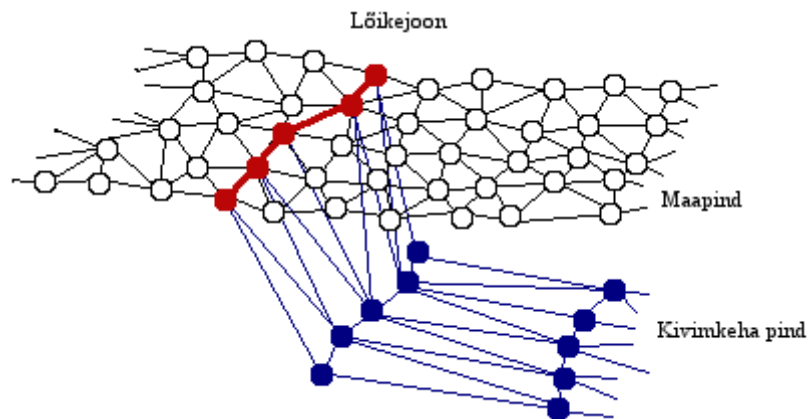
uuritav ruum pindade (nt TIN) abil homogeenseteks osadeks jaotatud. Erinevalt ebaregulaarsest võrest ei ole jaotuse kuju piiratud primitiivi kujuga vaid järgib homogeense maapinna osa kuju. Mudelis osalevad pinnad on suunatud – on määratud, kumb pinna külg on ülemine ja kumb alumine (või parem-vasak) Ühtlasi on teada, milline homogeenne keha kummalgi pool pinda paikneb (Joonis 5).



Joonis 5. Piiralade mudel. Homogeensed maapõue osad A, B ja C on eraldatud pindadega 3 ja 4. Pinnad 1 ja 2 piiravad kogu mudelit

Piiralade esituse mudelile aluse panijaks loetakse Kevin Weilerit (1988). Weiler'i RES (*radial edge structure*) mudelit on hilisemate tööde käigus täiendatud (nt Lee ja Lee 2001), kuid üldisi teoreetilisi aluseid need muutnud pole.

Topoloogiline piiralade mudel moodustab mittesileda muutkonna (*non-manifold*). Sile muutkond on selline pind, mille kõik tesselatsioonil tekkivad servad külgnevad kahe tahuga. Mittesileda muutkonna tesselatsiooni korral tekkivatel servadel võib olla aga erinev arv (1, 2, 3 või rohkem) külgnevaid servi (Bloomenthal 1995). Näiteks moodustab kivimkeha pinna lõikumine maapinnaga mittesileda muutkonna tingimuse, kus lõikejoon (tesselatsiooni serv) külgneb kolme pinnaga (Joonis 6). Weileri RES mudelis salvestatakse iga sellise serva kohta radiaalselt kõik temaga külgnevad pinnad.



Joonis 6. Mittesile muutkond. Lõikejoon külgnab kolme pinnaga (Ware and Jones 1997 alusel)

Piiralde mudeli juures on võimalik eraldada makro- ja mikrotopoloogiad (Apel 2004). Makrotopoloogia määrab seosed kehade, nende vaheliste pindade ja pindu piiravate mittede servade vahel. St millised kivimkehad on kõrvuti, kohakuti jne. Mikrotopoloogia seostab elementide (pinnad, servad) sisesed, käanupunktide vahelised suhted, ehk siis selle, kuidas mudelis osalevad pinnad on üles ehitatud. Selline eraldatus võimaldab mudelit korrigeerida erinevatel tasemetel.

2.1.4. 3D andmebaasides: 3D ja 2.5D

3D mudelite säilitamiseks on peaaegu igal 3D modellerimist võimaldaval tarkvaral olemas oma failiformaat. Mõned neist on kujunenud ka *de facto* standarditeks (3D MAX, SketchUp). Viimasel aastakümnel on välja töötatud ja edukalt arendatud ka *de jure* standardeid (VRML).

Andmebaasihaldurid ei toeta endiselt täies mahus “päris” 3D (*true 3D*) ruumiandmeid. Enamus andmebaasiohjureid lubavad küll ruumiandmete juures salvestada ka Z (kolmanda mõõtme) koordinaadid ning GIS tarkvarad oskavad neid kasutada andmete visualiseerimisel. Andmebaasihaldurid ja GIS tarkvarad oskavad kasutada aga ainult kahemõõtmelise ruumi topoloogiareegleid, muutes tulemuse nõ 2.5 dimensionaalseks. See tähendab, et nähtuse iga osa võib omada z väärtust, kuid nähtuse struktuur pole kolmemõõtmeline, olles projitseeritud tasapinnale. Näiteks võib polügoon koosneda paljudest erineva z väärtusega punktidest, kuid ühe (x; y) koordinaatpaari kohta saab nähtuses olla vaid üks z väärtus (Ford 2007). Sellisel kujul on näiteks kõik TIN ja DEM maapinna mudelid. Paljude ülesannete lahenduseks on selline funktsionaalsus piisav.

2.5 mõõtmelised andmebaasid ei võimalda salvestada o- (moodustavad suletud keha), c-, z- (painduvad iseenda alla x;y tasapinna suhtes) ja i-kujulisi (x;y tasapinna suhtes risti) pindu. Kui o-, c- ja z-kujulisi pindu on võimalik tükeldada nõ kahemõõtmelisteks osadeks, siis vertikaalseid pindu ja suurema pinna vertikaalseid osi ei ole võimalik salvestada. Üheks lahenduseks on vertikaalsele pinnale genereerida kerge kalle, muutes tema projektsiooni x;y tasapinnale alaks. Teine lahendus, mida tänapäeval peamiselt kasutatakse, on salvestada kogu kolmemõõtmelise nähtuse struktuur (andmepunktid ja nendevahelised seosed) seotud tabelitesse. Mõlemal juhul kasutatakse aga edasi kahemõõtmelist topoloogiat, funktsioone, indekseerimist, päringuid jne.

3D andmebaasihaldurite loomiseks tehakse palju uurimistöid ([http9](http://9)). Tehtud on ka mitmeid edusamme. Nt mitmed *Oracle Spatial*'i funktsioonid oskavad arvestada ka salvestatud z koordinaadiga. ESRI ArcSDE andmebaasi vahekiht võimaldab salvestada *multipatch* tüüpi nähtusi. Viimased on oma olemuselt küll kolmemõõtmelised kehad, kuid mõeldud eelkõige visualiseerimiseks. Need on sobivad eelkõige kolmemõõtmeliste sümbolite aga ka hoonete, puude, autode jne kujutamiseks maastikumudelil (Ford 2007). *Multipatch* tüüpi nähtustele pole võimalik kehtestada topoloogiareegleid ega teha kolmemõõtmelisi päringuid.

2.2. Geoloogiline modelleerimine

Geoloogiline modelleerimine on maapõue mudeli koostamine. Selle keeruka protsessi läbiviimiseks on koostatud mitmeid meetodeid ja töökäike. Kolmemõõtmeline joonestamine (CAD) arvutis on reeglina lahendatud erinevate primitiivide kombineerimisega. Sellisel viisil loodud mudeleid säilitataksegi tihti primitiivide komplektina (CSG – *Constructive Solid Geometry*). Nt teritatud pliiats on pikk silinder, mille otsas on koonus. Kivimkehade joonestamine sellisel viisil oleks aga mõeldamatu.

Üheks lihtsaimaks viisiks maapõue mudeli loomisel on puuraukude ja läbilõigete andmete omavaheline sobitamine. Kõik puuraugud ning läbilõigete kindlad punktid trianguleeritakse kahemõõtmelisel kaardil. Seejärel leitakse saadud triangulatsiooni iga kolmnurga kõikides nurkades ühesuguste kivimkehade sügavusvahemikud ja konstrueeritakse nende alusel kolmnurkse põhjaga prismad. Tulemuseks on ebaregulaarne võre. Saavutatud tulemuse täpsus sõltub suuresti kasutatud andmete tihedusest ja kvaliteedist. Näiteks ei pruugi kõik puuraugud ulatuda samale sügavusele.

Hõredate andmetega aladel on võimalik kasutada ka interpoleerimist. Mitmesuguste lisaandmete (reljeefikaart, rikked jne) mudelile lisamine on aga keerukas. Peamiselt võremudelite loomisel kasutatakse ka läbilõigete võrgustiku ja avamusalade põhjal interpoleerimist.

Levinuim viis maapinna modelleerimisel on pindade alusel. Põhjaliku ülevaate automatiseeritud meetodi sisust on andnud Brandel et al. (2004). Selle järgi koosneb geoloogilise mudeli ehitamine neljast etapist.

- Andmete sisestamine ja geoloogilise evolutsiooni skeemi ehitamine. GES (*Geological Evolution Scheme*) on struktuur, mis kirjeldab geoloogiliste nähtuste omavahelisi suhteid (vt ptk 2.3). Millised kivimkehad on nooremad, millised vanemad, millised erodeerunud, millised mitte jne. Andmed sisestatakse mudelisse pindadena (vt ptk 2.1.3). Kolmemõõtmeliste pindade loomisel võib kasutada kõikvõimalikke vahendeid: puuraukude andmestikku, olemasolevate kaartide, telemeetriliste mõõtmiste (geofüüsika) jne andmeid.
- Võimalike lõikumiste määramine. GES-i alusel tehakse kindlaks pindade mudelisse lisamise järjekord ja võimalikud operatsioonid pindade lõikumise korral.
- Rikete eeltöötlus. Kohtades, kus kaks paralleelset pinda paiknevad lähestikku, võivad tekkida mitmed ebaloomulikud lõikumised. Selline olukord on näiteks juhul, kui rikke tõttu on pinnas nihe. Selle vältimiseks luuakse mõlemale poole rikke pinda paralleelselt rikkega pinnad, mis moodustavad nõ “pimeda ala”, kus pindade lõikumist teiste pindadega peale rikke pinna ei arvestata.
- Mudeli ehitamine. Vastavalt eelnevatele etappidele tehakse kindlaks kõikide pindade täpsed lõikumised ning eemaldatakse pindade ülearused osad. Valminud mudel on piiralde esituse kujul. Selle põhjal on vastavalt vajadusele võimalik genereerida võre ja rakk-mudeleid.

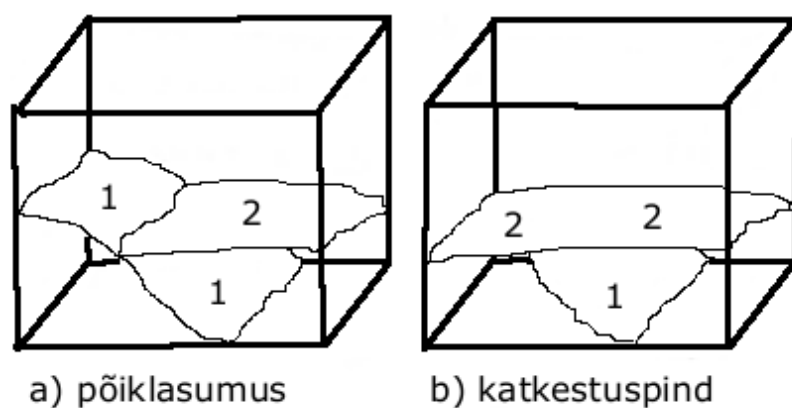
2.3. Geoloogiline süntaks

Geoloogilise evolutsiooni skeem (GES) kirjeldab geoloogiliste nähtuste omavahelisi suhteid ehk geoloogilist süntaksit (Brandel et al. 2004). Kuna modelleerimisel kasutatakse geoloogilisi nähtusi piiravaid pindu, kirjeldab GES nähtuste suhteid läbi neid piiravate pindade suhete.

Kolmemõõtmelises geoloogilises mudelis kasutatavad pinnad võib jagada kaheks:

- kihtide pinnad, mis eraldavad kahte erinevat (erineva vanusega) settekeha ja
- tektoonilised pinnad (rikked jm), millest mõlemal pool paiknevad rikked vanemad settekehad.

Reeglina on iga mudelis osaleva pinna korral teada tema suhteline vanus teiste pindade suhtes; kui kaks pinda lõikuvad, siis üks neist katkeb lõikumiskohas ja teine mitte. Selle, kumb pind katkeb, määravad pindade vanused ja see, kas nende pindade tekkimise vahelisel ajal on toimunud setete erosioon.



**Joonis 7. Pindadevaheliste lõikumiste võimalused (1- vanem ja 2- noorem pind)
(Brandel et. al. 2004 järgi)**

- Transgressiivne põiklasumus (*on lap*) – kui noorem pind on transgressiivse põiklasumuse lasuv pind, siis katkestab vanem pind noorema (Joonis 7 a).
- Katkestuspind (põiksus, *unconformity*) – kui noorema ja vanema pinna vahel on toimunud erosioon, siis katkestab noorem pind vanema (Joonis 7 b).
- Tektoonilised pinnad katkestavad kõiki endast vanemaid pindu, ning katkevad endast noorema pinnaga lõikudes.

Kirjeldades kivimkehade vahelisi suhteid kajastab GES ühtlasi ka mudeli reaalsusmudelit – milliseid kivimkehi kaardistatakse. Eesti geoloogilise mudeli juures tuleks lähtuda senise 1:50 000 kaardistusjuhendi reaalsusmudelist. Eesti maapõues on valdavad esimest tüüpi pinnad, mis eraldavad šelfimere tingimustes settinud aluspõhja kihte. Katkestuspindadena tuleb käsitleda aluspõhja reljeefi ja tänapäevase reljeefi pindu. Keerulisem on olukord pinnakatte sees, kus juhend eraldab mitmeid samavanuselisi stratigraafilis-geneetilisi settetüüpe, millede omavahelised suhted ei ole

reeglipärased. Näiteks võivad glatsiofluviaalsed setted olla glatsiogeensete setete peal või ka vastupidi, vahepeal võib olla toimunud erosioon või mitte. Lahendusena saab selliste pindade lõikumisel mudelit koostav spetsialist määrata, kumb pind teist katkestab. Vastav määratlus tuleb teha vaid korra, edaspidiseks salvestatakse see mudelisse ning vajadusel on võimalik teha muudatusi.

2.4. Päringud 3D mudeli põhjal

3D mudeli põhjal loodud kahemõõtmelised kaardid on mudelile tehtud päringute tulemused. Näiteks pinnakatte ja aluspõhja geoloogilise kaardi saamiseks tuleb mudelist pärida kõik maapinnale või pinnakatteni ulatuvad kivimkehad, leida nende avanev osa ja projitseerida see tasapinnale. Pinnakatte paksuse kaardi loomiseks tuleb mudelist pärida aluspõhja ja tänapäeva reljeefi pinnad, leida nende erinevuste (vahe) pind ja genereerida sellele samajooned. Läbilõike genereerimiseks tuleb mudelist pärida kõik vastavas kohas asuvad kivimkehad. Ka 3D mudeli endaga töötades saab päringute abil leida kas soovitud kivimkeha asukohta või otsida mõnda nähtust kindlas piirkonnas.

Geoloogilisele maapõue mudelile on võimalik esitada mitut liiki päringuid. Laiemas plaanis saab päringud jaotada atribuudi ja ruumiandmete põhisteks. gOcad tarkvaras päringuid võimaldava laienduse autorid eraldavad esimesel juhul päringud nähtuste omadustele (vali kõik kivimkehad, mille litoloogiline tüüp on liiv) ja päringud metaandmetele (kes on selle kivimkeha autor) (Spargue et al. 2006). Ruumiandmete põhised päringud on gOcad-i laienduse juures jaotatud keha omaduste (kui suur on keha ruumala, kui paks on keha kohas x,y jne), naabrussuhete (millised kehad on kohast x,y 300 m raadiuses; missugune keha on keha A kohal; milline keha on keha B all jne) ja ühisosa (kas kehad A ja B omavad ühisosa; kui suur on A ja B ühisosa ruumala; vali kõik kehad, mis on täielikult B sees jne) põhisteks päringuteks.

Vastavalt andmete struktuurile on paljud (ka ruumiliste suhete) päringud teostatavad tarkandmete põhjal. See ei valmista probleeme ühelegi andmebaasihaldurile. Teisel juhul on vajalik ruumiandmete analüüs. Nagu eelpool (vt ptk 2.1.4) mainitud, ei saa andmebaasihaldurid 3D andmetega veel kuigi hästi läbi. Seetõttu tuleb seni, kuni andmebaasihaldurite oskused täienevad, iga rakenduse juures vastavalt kasutatavale andmestruktuurile vajalikud funktsioonid eraldi luua.

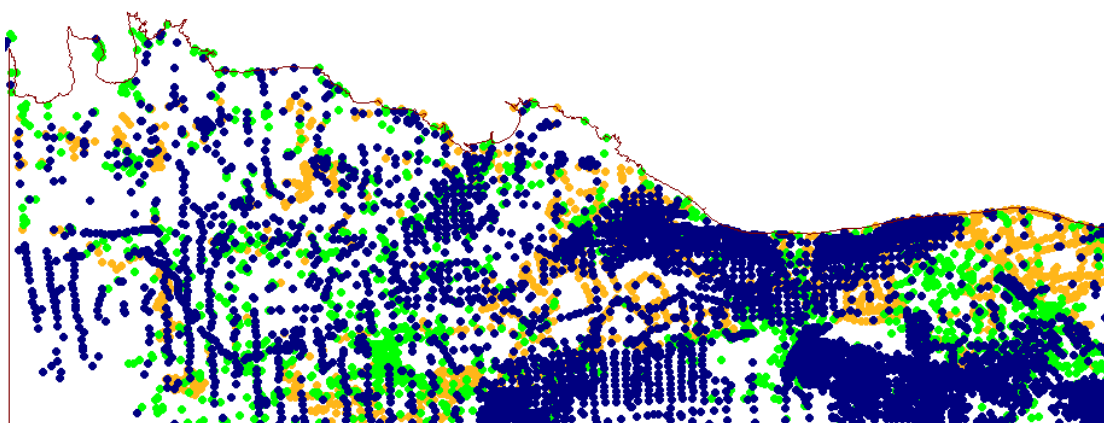
3D ruumiandmete päringu funktsioonide juures on võimalik edukalt ära kasutada ka andmebaasihalduri 2D päringu võimalusi. Näiteks lõikuvate kehade otsingul pärida andmebaasist kehad x ja y koordinaadi alusel (andmebaas ei arvesta z koordinaati) ning seejärel saadud kehad oma funktsiooni sees enne detailsemaid analüüse z koordinaadi suhtes üle kontrollida. Geoloogilise mudeli juures, mis on olemuselt x;y tasapinna sihis lame, annab selline tehnika kindlasti paremaid tulemusi, kui kogu filtreerimise funktsiooni eraldi programmeerimine, sest kasutatakse andmebaasi kahemõõtmelist ruumiindeksit.

2.5. Andmetihedus ja täpsus

Alates 2004. aastast (kaardistamise juhendi versioonist 1.1) kuulub geoloogilise baaskaardi komplekti kaardilehe koostamisel kasutatud faktilise materjali (puuraugud, puurkaevud, paljandid ja vaatluspunktid) andmebaas. Faktilise materjali kogumine ja kontrollimine on üks esimesi samme piirkonna kaardistamisel, ning faktilise materjali andmebaas esimene, mis kaardilehe kohta valmib. Hilisema töö käigus saadud andmed lisatakse samasse andmebaasi.

2007. aasta kevade seisuga on Maa-ametis faktilise materjali andmed olemas 7 kaardilehe (Karepa, Võsu, Kadrina, Rakvere, Kiviõli, Kohtla-Järve ja Tartu) kohta. Vastavate kaardilehtede kogupindala on 4500 km², sellest on maismaad (kus andmepunktid reaalselt paiknevad) 3165 km². Kokku on andmebaasis nende kaardilehtede kohta 8159 puuraugu, 2620 puurkaevu ning 4069 vaatluspunkti ja paljandi andmed. Kiviõli, Kohtla-Järve ja Tartu lehtedel tööd jätkuvad ning nendes piirkondades võib andmeid lisanduda.

Keskmiseks andmetiheduseks on ~4,7 andmepunkti ruutkilomeetrile ja keskmiseks andmepunktide vaheliseks kauguseks ~460 meetrit (võrgu silma suurus, kui andmepunktid regulaarselt vastavale alale jaotada). Arvestades, et puurkaevude andmestik ei anna sageli korrektset informatsiooni kivimkehade kohta, on andmetihedus veelgi väiksem. Ka puuraukude sügavused on erinevad, ning mida sügavamale liikuda, seda hõredamaks andmeid jääb. Vaatluspunktid pole reeglina sügavamad kui 1 meeter, kirjeldades seega vaid avanevat kivimkeha ja heal juhul ka selle lamamit.



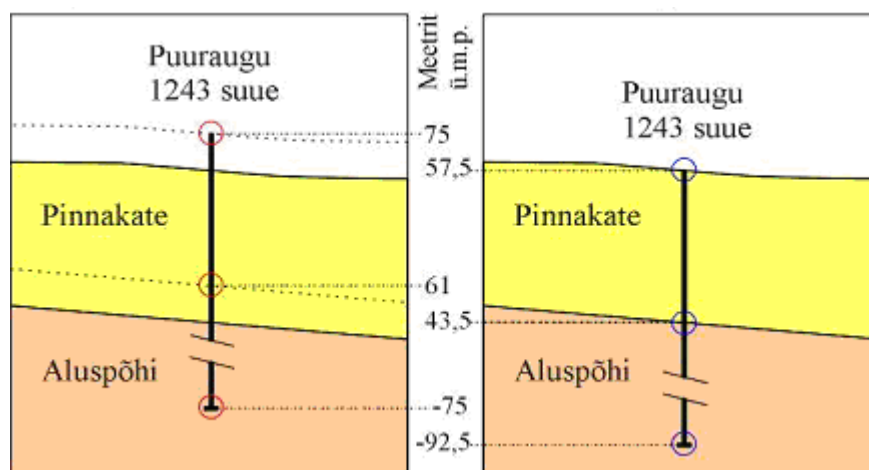
Joonis 8. Faktilise materjali paiknemine Põhja-Eestis. Oranž - vaatluspunktid, roheline - puurkaevud ja sinine - puuraukud.

Sügavamaid kui 100 m puurauke on kokku 442. See teeb 100 m sügavusel andmetiheduseks 1 andmepunkt ca 7 km² kohta. Puurauke, mis on sügavamad kui 200 m, on kokku vaid 96, ning andmetihedus sellel sügavusel on 1 puurauk ca 33 km² kohta. Aluskorda ulatuvaid puurauke on kokku 99, mis teeb andmetiheduseks ca 1 punkt 32 km² kohta. Praegune kaardistusjuhend nõuab iga kaardilehe (625 km²) kohta vaid ühe aluskorrani ulatva puurauku andmete kasutamist. Suur osa olemasolevast andmestikust hõlmab Kirde-Eestit, kus maavarade otsingute-uuringute käigus rajati keskmisest tunduvalt rohkem puurauke. Mujal (iseäranis Lõuna-Eestis) võib andmetihedus olla tunduvalt väiksem, eriti sügavamal. Lisaks esineb andmestikus kindlasti teatud määral klasterdumist, mille tõttu on andmetihedus paiguti erinev (Joonis 8).

3D mudeli koostamine ainult faktilise materjali põhjal ei ole mõistlik, sest sellise andmetiheduse korral võib ühes andmepunktide vahes minna kaotsi mitu mõõtkavalist nähtust. Peab olema võimalik interpoleeritud ja interpreteeritud andmete lisamine. Tihtilugu on geoloogilist informatsiooni vaja interpreteerida nii puuraukude vahelise ala jaoks kui ka ühe puursüdamiku siseselt. Sageli ei vasta puuraukude kirjeldused kehtivale kaardistusjuhendile. Kui kaardistatavatest kivimkehadest on mindud detailsemaks, siis ei ole probleemi, kui aga mitu kaardistatavat kivimkeha on kirjeldatud ühe vahemikuna, siis peab modelleerija määrama, kas ja millisteks kehadeks see vahemik jaotub ja kust jookseb jaotumise korral nendevaheline piir.

Kasutatav puuraukude ja puurkaevude andmestik pärineb valdavalt möödunud sajandi teisest poolest. Puuraukude ja -kaevude asukohta ja suudmekõrguse üleviimine hetkel

Eestis kasutatavasse Lambert-Est '97 koordinaatsüsteemi käib enamasti kaartide kõrvutamise teel. See protsess on küllaltki veaaldis. Ka originaalandmete täpsus pole teada. Varasemate puuraukude asukohta pole tavaliselt võimalik kontrollida. Lihtsam on puurkaevudega, mille suudmete koordinaate Tartu kaardilehel kontrollis Maa-amet 2005. aastal (Maa-amet 2005). Kontrolli käigus selgus, et tiheasustusega aladel oli puurkaevude asukoha viga keskmiselt 20..25 meetrit, hõreda asustusega aladel aga 140..145 meetrit. Suurim leitud viga ulatus 860 meetrini. Suudmekõrguse vead olid kontrollitud puurkaevudest pooltel, keskmiseks veaks saadi 9 m. Et puuraukude andmestik on pärit samast ajast ja nende asukoht ja suudmekõrgus mõõdetud ja Lambert-Est süsteemi teisendatud sarnasel viisil, võib ka puuraukude suudmete asukoha ja kõrguse vead lugeda samasse suurusjärku.



Joonis 9. Ebatäpsete andmetega puurkaevu (-augu) mõju mudelile (Maa-amet 2005).

Kuna Eesti geoloogilist ehitust iseloomustab tavaliselt väljapeetud horisontaallasumus, mõjutab viga andmepunkti suudme kõrguses mudelit rohkem kui viga x ja y koordinaatides. Kõikide puursüdamikus määratud kihipindade kõrgused (nt kihistute piirid) on mõõdetud suudme suhtes ning viga suudme kõrguses põhjustab omakorda vea kõikide pindade kõrgustes (Joonis 9).

2.6. 3D mudeli lisaväärtused

2.6.1. Kolmemõõtmeline visualiseerimine

Kolmemõõtmelise visualiseerimise võimalusi on uuritud ja arendatud juba väga pikka aega (http8). Välja on töötatud mitmeid tehnoloogiaid, mis loovad andmetest kolmemõõtmelise kujutise, aga arenenud on ka tavalisel tasasel ekraanil realistlike kolmemõõtmeliste vaadete kuvamine. Esimene võimalus on endiselt suhteliselt kallis ja

investeeringu tasuvus on kaheldav. Kaasaegsed arvutid on võimelised reaalajas kuvama suhteliselt mahukaid 3D andmeid, luues perspektiivi ja varjutuse efekte kasutades tõetruu vaate.

Kolmemõõtmelised vaated on eriti kasulikud kujust ja üldisest ruumilisest paigutusest arusaamisel. Kahemõõtmelised vaated on omakorda paremad kahe objekti omavahelise suhte selgitamisel ja täpsusmõõtmistel (St John et al. 2001). Maapõue ehituse mõistmiseks, mis eeldab kivimkehade kuju ja üldise paigutuse tajumist, sobib seega paremini kolmemõõtmeline vaade. Häid tulemusi on andnud ka kolmemõõtmeliste ja kahemõõtmeliste vaadete kombineerimine (Tory et al. 2004), mis on kolmemõõtmelise mudeli baasil samuti teostatav.

Kolmemõõtmelised vaated sisaldavad informatsiooni objekti kõigi kolme mõõtme kohta. Üks kahemõõtmeline vaade võimaldab aga edasi anda vaid kahte. Kolmanda mõõtme kirjeldamiseks tuleb lisada eraldi vaade. Praeguse kaardistuse skeemi järgi on selleks kolmandat mõõdet kirjeldavaks vaateks läbilõige, mis lisatakse aluspõhja geoloogia, pinnakatte geoloogia ja hüdrogeoloogia teemakaartidele, iga kaardilehe kohta üks või kaks. Eraldi vaate kokkusobitamine tervikliku kujutise tajumiseks on kasutajale keerukas ja aeganõudev ülesanne. Lisaks jääb kahe läbilõike vahele jääva ala ehitus kasutaja interpreteerida. Kolmemõõtmelise mudeli korral on kasutajal võimalik vaadata “mudeli sisse” ja lugeda kaardistaja interpretatsiooni.

2.6.2. Uued teemakaardid

Lisaks hetkel toodetavatele “põhilistele” teemakaartidele on 3D maapõue mudeli baasil võimalik genereerida ka mitmeid uusi teemakaarte. Ka “põhilisi” teemakaarte on lihtne ümber kujundada. Näiteks kujutab aluspõhja reljeefi kaart praegu reljeefi samajooni 10 meetrise intervalliga. 3D mudeli baasil, kus aluspõhja reljeef säilitatakse pinnana, on võimalik samajooni genereerida soovitud intervalliga. Samuti on analüüsiks võimalik väljastada pind ise (samajoonte alusel analüüsiks pindade loomine toob endaga kahtlemata kaasa andmekao).

- Lisaks aluspõhja reljeefi ja pinnakatte paksuse teemakaartidele on 3D mudeli baasil võimalik luua iga kivimkeha lasuva ja lamava pinna reljeefi ning kivimkeha paksuse kaarte. Kasutades kivimkehade automaatset liitmist, saab neid kaarte leida soovitud kivimkehade kombinatsiooni (nt lademe või ladestu) kohta.

- Lisaks kivimkehade avamuste kaardile saab 3D mudelist kätte ka iga kivimkeha leviala, võimalik on arvutada levialade kattumisi.
- 3D mudeli alusel on võimalik automaatselt koostada läbilõikeid soovitud kohas.

2.6.3. Simulatsioonid

Kolmemõõtmelise geoloogilise mudeli võimalused ei piirdu maapõue visualiseerimisega, sobiva tarkvara ja mudeli struktuuri (andmete) olemasolul on võimalik mudeliga “mängida” – simuleerida maapõues/maapõuega toimuvaid protsesse. Simulatsioonide abil saab mudeli täpsust hinnata, visualiseerida protsesse, prognoosida protsesside kulgu erinevate stsenaariumide korral, katsetada teooriaid jne. Võimalikud valdkonnad, kus simulatsioone kasutada, on põhjavee liikumise modelleerimine, seismoloogia, tektoonika, geofüüsika, meteoriidiplahvatuse modelleerimine jne.

2.7. Olemasolevad 3D geoloogia tarkvarad

3D geoloogiliste mudelite modelleerimiseks on alates 90-ndate algusest välja töötatud mitmeid tarkvarapakette. „Mootoriks“ selle juures on olnud peamiselt naftatööstus. Ülevaade on antud kolme levinuima ja võimekaima paketi (gOcad, GSI3D ja RockWorks) kohta. Lisaks neile on laiemas kasutuses ka 3d GeoModeller, Vulcan 3D, earthVision, Leapfrog, Geotouch jpt.

2.7.1. gOcad (Earth Decision Suite)

Nimi gOcad sisaldab endas mõisteid geoloogia ja CAD (*Computer Aided Design*). Oma pika arengu jooksul on tarkvarapakett teinud pika sammu, võimaldades arvukate lisamoodulite abil kõikvõimalikke päringuid, analüüse, simulatsioone jms, ning ei ole enam pelgalt CAD programm, liikudes üha enam GsIS (*Geoscience information system*) tarkavara suunas (Apel 2004).

gOcad-i sünnikohaks on Prantsusmaal Nancy's asuv National School of Geology, kus 1989. aastal algatati vastav uurimisprogramm. Projekti eesmärk oli arendada välja uus meetod arvutiga geoloogiliste objektide modelleerimiseks, peasuunaga geofüüsika, geoloogia ning naftaotsingute rakendustele. Peagi liitus projektiga ka teisi Prantsusmaa uurimisasutusi ning tänaseks on projektist välja kasvanud rahvusvaheline konsortsium, mille liikmeteks on 22 firmat ja 83 ülikooli üle maailma.

1998. aastal eraldati tarkvara laiemasse kasutusse viimiseks tarkvaraarendus ja uurimistööd. *Gocad Consortium* andis tarkvara arendamise ja levitamise õigused tarkvarafirmale *Earth Decision Sciences* (endine T-Surf). Sellest ajast on programm gOcad ja tema laiendused *Earth Decision Suite* paketi nime all kommertsalustel kasutatavad. *Gocad Consortium* jätkab aga tarkvara aluseks oleva teadustöö tegemist ning uute laienduste väljatöötamist ([http4](http://4)).

gOcad-i südameks on Weileri RES mudel (piiralade esitus) ja DSI (*Discrete Smooth Interpolation*) interpoleerimismeetod. Tarkvara võimaldab geoloogilisi pindu luua erinevate andmete põhjal. Pindade (ja kehade) loomisel hõredast andmestikust kasutatakse gOcad projekti algataja, emeriitprofessor Jean-Laurent Mallet poolt välja töötatud DSI interpoleerimismeetodit. Sisestatud pindade ja geoloogilise tulba (GES, vt ptk 2.3) alusel arvutatakse Weileri REP mudel, mille põhjal on võimalik luua erinevate lisamoodulite abil ka võre- ja rakk-mudeleid.

DSI töötab diskreetse pinna või keha mudelil. Diskreetset topoloogilist mudelit kujutatakse graafina $G(\Omega, N, \phi, C)$, kus Ω on modelleeritavat nähtust esindavate diskreetsete punktide hulk, N kirjeldab punktidevahelisi naabrussuhteid, ϕ sisaldab kõiki objekti omadusi (atribuute, muuhulgas punktide koordinaate) ja C määrab mudelile kehtestatud piirangud. Sisuliselt on ka TIN mudel diskreetne mudel. gOcad-i pinnad erinevad TIN mudelist aga seetõttu, et on nõ “päris” kolmemõõtmelised. See tähendab, et sama pinna x,y koordinaatpaarile võib vastata mitu z väärtust. Diskreetne mudel võib kirjeldada ka keha, nt iga rakk-mudeli primitiiv oma parameetritega moodustab diskreetse mudeli punkti.

DSI meetod võimaldab interpoleerida kõiki mudeli parameetreid, nii punktide koordinaate kui näiteks keemilisi omadusi. Iga graafi G kuuluva punkti α korral arvutatakse interpoleeritava parameetri uus väärtus vastavalt punkti naabrusele $N(\alpha)$ ja punktidele kehtestatud piirangutele. Protsessi korratakse teatud arv kordi või kuni parameetrite väärtused punktides enam oluliselt ei muutu. Iga korduse juures arvestatakse uusi, eelmise korduse käigus korrigeeritud naaberpunktide $N(\alpha)$ parameetreid (Mallet 2002).

Earth Decision Suite (gOcad) on hetkel turul olevatest 3D maapõue modelleerimise tarkvaradest võimekaim ja on lihtsalt laiendatav lisaks olemasolevatele arvukatele

laiendustele. Tarkvara taga seisab rahvusvaheline konsortsium, mis tagab pideva teadustöö ja arengu. Kõige selle tulemuseks on ka tarkvara kõrge hind.

2.7.2. GSI3D

GSI3D (*Geological Surveying and Investigation in 3 dimensions*) on 3D maapõue modelleerimise meetod ja vastav tarkvara, mille on välja töötanud sakslane Hans-Georg Sobisch koostöös Alam-Saksimaa ja Suurbritannia geoloogiateenistustega. Tarkvara on kirjutatud Java programmeerimiskeeles ning kasutab andmete säilitamiseks XML (*extensible mark-up language*) faile.

GSI3D kasutab 3D mudeli loomisel maapinna kõrgusmudelit, avamuste ja levialade piirjooni ja puursüdamike andmeid. Tarkvara võimaldab modelleerijal puursüdamike põhjal koostada läbilõigete võrgustiku (*fence diagram*). Maapinna kõrgusmudeli pinnale projitseeritud avamuste, levialade ja koostatud läbilõigete võrgustiku alusel interpoleeritakse nähtuste piirid läbilõigete vahele jäävas ruumis ning moodustatakse rakk-mudel. Geoloogi interpretatsioon modelleerimisel sisestatakse mudelisse läbilõigete koostamise ajal ([http11](http://11)).

GSI3D modelleerimise tarkvarale lisaks kuuluvad sama paketi juurde ka kaks levitamise tarkvara. *Subsurface analyst*© on mõeldud (litsentseeritud) asutusesiseseks mudeli levitamiseks ja võimaldab GSI3D vahenditega loodud maapõue mudeli visualiseerimist ja analüüsi. Loodud mudeli publitseerimiseks on ette nähtud *subsurface viewer*©, mis võimaldab ainult mudeli visualiseerimist (sh läbilõigete koostamist). Mõlemal juhul integreeritakse loodud mudel vastava tarkvaraga ning levitada on võimalik saadud exe-faili. Faili saaja ei pea installeerima eraldi tarkvara, saadud failis on kõik vajalik (nii mudel kui tarkvara) olemas. *Subsurface viewer*© tarkvara koos näidismudeliga on võimalik internetist alla laadida ja vastavate võimalustega tutvuda ([http6](http://6)).

GSI3D meetod on sobilik, kui modelleeritava ala kohta on olemas kahemõõtmelised avamuste ja levialade kaardid, ehk siis, kui ala on piisava detailsusega kaardistatud. Eesti maapõue 3D mudeli juures on soovitatav aga vastupidine tulemus, kus avamuste ja levialade kaardid genereeritakse mudeli põhjal.

2.7.3. RockWorks

RockWorks (kehtiv versioon 2006) on *RockWare* nimelise tarkvarafirma esitoode. *RockWare* tegeleb eelkõige loodusteaduste alaste tarkvarade arendamise ja levitamisega. Ettevõtte on asutatud 1983. aastal Ameerika Ühendriikides. Tootevalikus on üle 200 programmi arheoloogia, atmosfääriteaduste, projekteerimise, hariduse, hüdrogeoloogia, metsanduse, mäenduse ja naftatööstuse vajaduste rahuldamiseks (http10). *RockWorks* on välja kasvanud puursüdamike andmete haldamise tarkvarast. Iga versiooniga on lisandunud uusi visualiseerimise ja analüüsimise võimalusi.

RockWorks oskab 3D mudeleid koostada nii enda poolt hallatavate puursüdamike andmestiku kui imporditud andmepunktide (X; Y; Z; M) alusel. Puursüdamike andmete põhjal tuleb esmalt koostada läbilõigete võrgustik (*fence diagram*). *RockWorks*-i 3D mudel on võremudel, mille resolutsioon sõltub uuringuala suurusest (programm kasutab kindlat arvu võrgusilmi). Igal võrgusilmal saab olla vaid üks parameeterväärtus (litoloogiline tüüp, aine sisalduse protsent vms). Mõne teise parameetri visualiseerimiseks tuleb luua sellele parameetrile vastav mudel (*RockWare* 2006).

RockWorks sisaldab arvukalt võimalusi 3D mudeli visualiseerimiseks. Lisaks on võimalik mudelit mitmel viisil analüüsida. Võimalik on arvutada homogeensete plokkide paksusi ja mahte, teha parameetri väärtuse põhjal päringuid jpm. *RockWorks* võimaldab töö automatiseerimist tarkvara sisese skriptikeelega. Kasutajapoolne laienduste lisamine pole aga võimalik. Üks *RockWare* kompanii põhimõtteid on müüa oma tooteid võimalikult soodsalt. Võrreldes *RockWorks*-i litsentsitasu *Earth Decision Suite* aastase litsentsi hinnaga on *RockWorks* väga soodne ost. Samas jääb *RockWorks* *Earth Decision Suite*-le alla nii kasutusmugavuse, võimaluste kui laiendatavuse osas.

2.8. Teiste riikide kogemus

Suurbritannia on geoloogilise kaardistamise vallas esirinnas olnud geoloogilise kaardistamise algusaegadest (William Smith'i Suurbritannia geoloogilise kaardi valmimisest 1815. a-l) saadik. Ka suuremõõtkavalise üleriigilise kaardistuse on Suurbritannia geoloogiateenistus (BGS) lõpule viinud ja pärast seda on võetud suund erinevates mõõtkavades 3D mudelite tootmisele. Ka selles valdkonnas ollakse maailmas esireas.

Juba on valminud kogu Suurbritanniat kattev 1:1 000 000 mõõtkavas mudel (*LithoFrame1M*). Mudeli koostamisel kasutati 1:625 000 mõõtkavas kaarti, puuraukude

ja geofüüsikaliste uuringute andmeid. Kavas on kogu riik katta ka 1:250 000 ja 1:50 000 mõõtkavas kolmemõõtmeliste mudelitega (*LithoFrame250* ja *LithoFrame50*). Pinnakatte kohta on kavas koostada ka 1:10 000 mõõtkavas (*LithoFrame10*) mudel (<http3>).

Suurbritannia geoloogiateenistus kasutab 3D mudelite koostamisel peamiselt GSI3D aga ka gOcad, Vulcan jpt tarkvarasid. GSI3D kasutamisel ollakse oluliseks partneriks tarkvara väljatöötamisel. Ettevalmistus 3D mudeli loomiseks algab juba andmete kogumise faasis. Välitöödel kasutatakse kaasaskantavaid arvuteid ning uued andmed sisestatakse otse üleriigilisse andmebaasi, kust kõigil uurijail ja modelleerijail neid läbi veebiportaali on võimalik kasutada. Ühtlasi on garanteeritud andmete ühtlane reaalsusmudel, kvaliteet ja formaat. 3D modelleerimisel võib uurija kasutada vabalt valitud tarkvara.

Valminud ja geoloogiateenistusele edastatud mudelid (vastava tarkvara faili-formaadis) salvestatakse GLOS (*Geoscience Large Object Store*) andmebaasi ning seotakse metaandmetega. GLOS andmebaas koos metaandmestikuga võimaldab otsida soovitud ala kohta mudeleid ja neid originaalformaadis taastada. Mudeli kasutamiseks on aga tarvis tarkvara, millega mudel loodi. Vajadus loodud mudeleid ka teiste tarkvaradega kasutada tingis tarkvaradest sõltumatu andmestruktuuri väljatöötamise. Kõik GLOS-i kantud maapõue mudelid teisendatakse ja salvestatakse ka GSF (*Geoscience Spatial Framework*) andmebaasi. GSF on põhimõttelt relatsioonilisel andmebaasil teostatud piiralade mudel. Seotud tabelites kirjeldatakse ka trianguleeritud piirpinnad. Andmed on tihedalt seotud teiste Suurbritannia geoloogiateenistuse andmekogude ja metaandmestikuga. Sellisel kujul andmed on sõltumatud kommertstarkvaradest. GSF ei suuda kajastada kõikide tarkvarade kõiki omadusi ning teatud andmekaoga tuleb teisendamise juures arvestada. Seetõttu säilitatakse originaalformaadis mudelid endiselt ka GLOS andmebaasis. (Smith 2005).

Kolmemõõtmelisi mudeleid on hakatud tootma ka mitmetes teistes riikides. Siiski pole kusagil peale Suurbritannia alustatud süstematiseeritud modelleerimisega, enamasti on tegemist mõne kindla piirkonna või objekti mudelitega. Reeglina on erinevad mudelid toodetud iseseisvate projektide raames ning ei pruugi kasutada isegi ühesugust reaalsusmudelit. Modelleerimiseks kasutatakse erinevaid kommerts-tarkvarasid. Mitmel pool (näiteks Austraalias) on toodetud mudelid vabalt kasutatavad

VRML (*Virtual Reality Mark-up Language*) formaadis. Lisaks Austraaliale ([http5](#)) on selline võimalus ka Prantsusmaal ([http1](#)).

3. Eesti geoloogilise 3D mudeli keskkond *ESRI/ArcScene* baasil

3.1. Vajadused

Kolmemõõtmelise mudeli kasutuselevõtt Eesti maapõue kaardistamisel annab suurel hulgal lisavõimalusi. Suurim eesmärk on seniste 2D kaartide genereerimine 3D mudeli põhjal sellisel viisil, et on tagatud erinevate teemakaartide kompleksus ning lihtne teemakaartide uuendamine andmete täienemise korral. Eelmiste peatükkide käigus kirjeldatud teadmiste taustal, ning arvestades seatud eesmärke ja 3D mudeli poolt pakutavaid lisavõimalusi, tuleb modelleerimiskeskonna loomisel arvestada järgnevate põhimõtetega.

1. Mudeli põhjal on võimalik automaatselt genereerida kõiki praeguseid teemakaarte.
2. Mudeli aluseks on 1:50 000 geoloogilise baaskaardi reaalsusmudel.
3. Ühtne mudel suudab katta kogu Eesti territooriumi. Samas peab olema võimalik teha mudelist väiksema piirkonna kohta väljavõtteid ning töötada (sh mudelit redigeerida) väiksema piirkonna (kaardileht) mudeliga.
4. Säilitatakse kasutatud andmestiku (puuraugud, puurkaevud, vaatluspunktid, modelleerija lisatud punktid, süsteemi poolt genereeritud punktid) metaandmed.
5. Keskkonna kasutamine ja modelleerimine on lihtne ja loomulik.
6. Mudeli täiendamine on lihtne ja järgib samu protseduure kui esialgne modelleerimine.
7. Keskkond võimaldab mudelit kolmemõõtmeliselt visualiseerida.
8. Mudeli põhjal on võimalikud lihtsamad arvutused ja päringud (vajalikud teemakaartide genereerimisel), nt kivimkeha paksuse ja mahu leidmine.
9. Mudel võimaldab generaliseerimist nii nähtuste kui ruumikujude tasemel. St võimalik on nii homogeensete kehade agregeerimine mõne parameetri alusel (nt stratigraafilise klassifikatsiooni järgi) kui ruumikujude lihtsustumine väiksemas mõõtkavas.

10. Geoloogilise mudeli genereerimisel on võimalik kasutada teisi Maa-ametis olemasolevaid andmekogusid ja teenuseid (nt kuvada taustaks ortofoto või põhikaart). 3D mudel ja selle põhjal genereeritud kaardid ühilduvad ülejäänud Maa-ameti infosüsteemidega.
11. Mudelist on võimalik teha väljavõtteid enamlevinud geoloogilise modelleerimise tarkvarade või nende poolt toetatavas formaadis.
12. Võimalik on mudeli veebipõhine (VRML baasil) avalikustamine.
13. Mudel ja temaga seonduv andmestik säilitatakse andmebaasis.
14. Vähemalt mudeli vaatlemise ja analüüsimise osas on võimalik multikasutus. Samaaegse redigeerimise võimalus mitme kasutaja poolt tuleb kasuks.

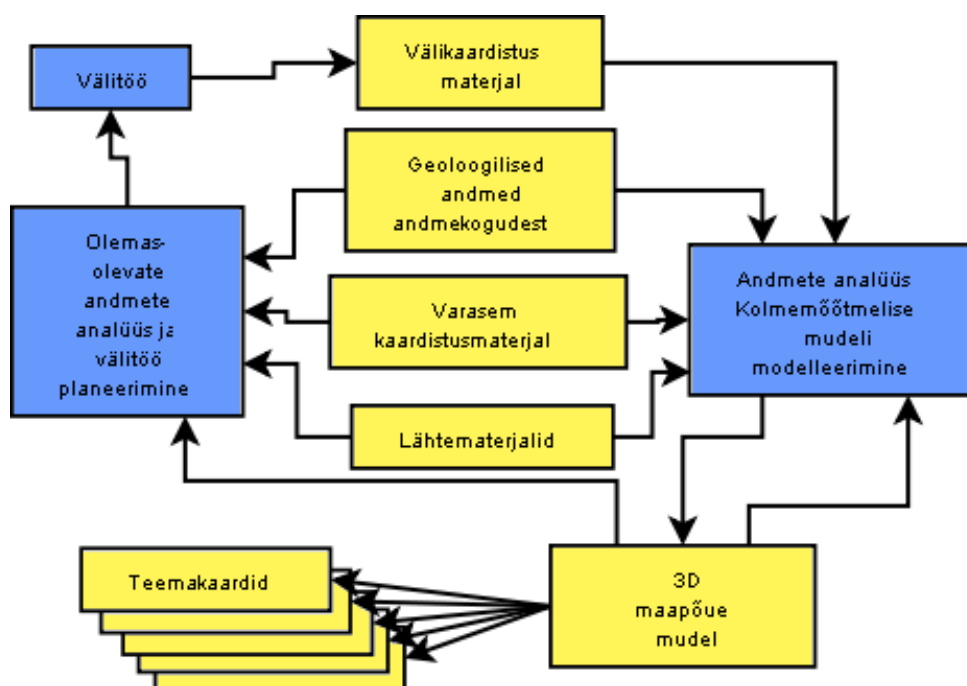
Kõigile välja toodud põhimõtetele vastavat tarkvara ei ole olemas. Geoloogilise modelleerimise võimaluste poolest on autori hinnangul kõige lähedasem *Earth Decision Suite*, aga ka see vajab kõigi põhimõtete elluviimiseks laiendamist. Näiteks on sellele küll loodud andmebaasi laiendus, ent see kasutab andmebaasisüsteemi, mis ei ühildu Maa-ametis olemasolevate baasidega. Lisaks ei ole Maa-amet huvitatud kallite nišitoodete ostmisest. Maa-amet on kõikides geoinfoga seotud valdkondades kasutusele võtnud *ESRI ArcGIS* perekonna tooteid. Teiste Maa-ameti infosüsteemidega ühilduvuse huvides on ka maapõue modelleerimise keskkonnaks sobivaim *ESRI* platvormi kasutamine. Koos *3D Analyst* laiendusega võimaldab *ArcGIS* kolmemõõtmelist visualiseerimist (*ArcScene* rakenduses) ning on kergesti laiendatav. Platvorm pole “päris” kolmemõõtmeline vaid nõ 2,5D, kuid laiendatud andmestruktuure kasutades on võimalik vajadused rahuldada.

3.2. Üldised alused

Eesti maapõue kolmemõõtmelise mudeli keskkond rajatakse *ESRI ArcGIS* platvormile. Kolmemõõtmeliseks visualiseerimiseks ja andmetöötluseks laiendatakse vajalike töövahenditega *ArcScene* rakendust, mudeli ja keskkonna andmed säilitatakse *ArcSDE* andmebaasis.

3D andmemudelina kasutatakse topoloogiliste piirpindade mudelit, mis on maapõue modelleerimiseks sobivaim. Ühtlasi on piirpindade mudel *ESRI* platvormil hõlpsasti realiseeritav. Piirpinnad salvestatakse *terrain* andmetüübiga, eraldi tabelites

kirjeldatakse pindade omadused ja moodustuvad homogeenised kehad. Nähtused, mis ei hõlma kogu kolmemõõtmelist ruumi (punkt ja joon tüüpi), kujutatakse vastavat tüüpi nähtusklassides ja vajadusel seostatakse 3D pindade või kehadega.



Joonis 10. Kaardistamise tehnoloogiline skeem 3D mudeli kasutamisel

Modelleerimine loodavas keskkonnas tähendab olemasoleva mudeli täiendamist. Esmalt luuakse hõreda, kuid esindusliku puursüdamike valiku alusel “jäme” mudel, millele hakatakse lisama täiendavaid andmeid. Uue puursüdamiku andmete lisamisel võrreldakse seda olemasoleva mudeliga nii kihtide esinemise, järjekorra kui sügavuse osas. Sellisel viisil on andmete analüüsi lisaks uuele puuraugule kaasatud laiem geoloogiline kontekst vastavas kohas koos juba mudelisse sisestatud andmetega (Joonis 10).

3.3. Reaalsus- ja infomudeli kohandamine

Kolmemõõtmelise mudeli aluseks on 1:50 000 mõõtkavas geoloogilise baaskaardi juhend. Selles juhendis kirjeldatud reaalsus- ja infomudelid, mis on koostatud kahemõõtmeliste kaartide jaoks, tuleb kohandada kolmemõõtmelise mudeli tarbeks.

1. **Aluspõhja geoloogiline teemakaart.** Kui kahemõõtmelisel kaardil kujutatakse kivimkehade (nähtused koodiga 13102 – 13157) avamusi, siis kolmemõõtmelises mudelis kogu kivimkeha. Kivimkeha kood on kolmemõõtmelises mudelis homogeense keha atribuut. Kindlaks tehtud

(12004) ja oletatavad (12003) rikked on kahemõõtmelisel kaardil kujutatud maapinnale avanevate rikkejoontena. Kolmemõõtmeline mudel võimaldab kujutada nihkepinda. Kuna rikke pinda on tihti informatsiooni puudusel kujutatud vertikaalsena ning *terrain* ei võimalda salvestada vertikaalseid osi, tuleb rikete kujutamisel kasutada teistsugust lähenemist. Nendest räägib lähemalt alapeatükk 3.8. Rikked salvestatakse endiselt joontena ning seostatakse piirpindadega, mida nad mõjutavad. Stratotüübid tuleb kirjeldada mudelist eraldiseisvate punktidenä. Täienduseks on võimalik kõrguskoordinaadi lisamine (nt täpsustamaks stratotüübi asukohta paljandil).

2. **Pinnakatte geoloogiline teemakaart.** Sarnaselt aluspõhja kivimkehade jaotusele on ka pinnakatte settekeha stratigraafilis-geneetiline settetüüp (23102 – 23122) ja litoloogiline tüüp (23201 – 23215) kolmemõõtmelises mudelis homogeense keha atribuutideks. Stratigraafilis-geneetilise settetüübi ja aluspõhja kivimkeha koodid moodustavad ühtse atribuudi domeeni.
3. **Hüdrogeoloogiline teemakaart.** Hüdrogeoloogilise kaardi nähtuste kujutamiseks tuleb homogeense keha atribuutidele lisada keha veeandvus ja veekompleksi indeks, milles keha asub. Veetud karbonaatkivimid (32023) tuleb tähistada vastava kivimkeha atribuutides. Veekomplekside survepindu, mida kahemõõtmelisel kaardil kajastatakse samajoonte abil (32010 – 32022), on võimalik kujutada 2.5D pindadena. Kuivõrd veekomplekside veetaseme survepinnad erinevad suuresti teistest mudelis kajastatavatest (homogeenseid kehi eraldavatest) pindadest, siis on mõistlik nende kujutamine piirpindadest lahus. Eraldi pinnana tuleb kujutada ka põhjavee mineraliseerumise väärtust, mida kahemõõtmelisel kaardil näidatakse samamineraalsusjoontega (32007). Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et z ei tähista sellel juhul mitte pinna kõrgust, vaid põhjavee mineraalsust vastavas piirkonnas. Mitmeid hüdrogeoloogilise teemakaardi nähtusi tuleb kujutada eraldiseisvate elementidenä: allikad, karstinähtused, põhjavee liikumise suund (punktid), maa-alune jõgi, veelahe (jooned), kaevandusala, maa-alune kaevandus, üldraud põhjavees ja karstiväli (alad). Võimalusel saab neid seostada mõne homogeense

kehaga. Ülevoolu piirkond (33209) on arvutatav survetaseme pindade ja reljeefi alusel ning eraldi säilitamist ei vaja.

4. **Põhjavee kaitstuse teemakaart.** Põhjavee kaitstuse klass ja teised selle teemakaardi nähtused on arvutatavad 3D mudeli põhjal ja eraldi salvestamist ei vaja. Erandiks on tasakaaluala (43201), mis tuleb salvestada iseseisva alana.
5. **Maavarade teemakaart.** Kõik maavarade teemakaardi nähtused ja kaasnevad tärgandmed tuleb kujutada 3D mudelist eraldiseisvana ning võimalusel (kui nähtus järgib homogeense ploki piire nt leviala korral) seostada homogeense kehaga.
6. **Geomorfoloogia teemakaart.** Paljud geomorfoloogilised nähtused on tihedalt seotud settetüübiga. Samas on ka palju nähtusi, mis settekehade piiridega ei ühti. Ka sama nähtusklassi nähtused võivad vastavalt olukorrale olla settekehaga seotud või mitte. Esineb ka nähtusi, mis ühest küljest ühtivad settekeha piiriga ja teisest mitte. Seega tuleb geomorfoloogia teemakaardi nähtusi kujutada eraldiseisvate nähtustena (nii alad, jooned kui punktid) ning vajadusel siduda kas homogeensete kehade või nendevaheliste piiridega (piirilõikudega). Alternatiivina saab pinnavormi moodustumise määrata homogeense keha atribuudiga ning vajadusel lisada mudelisse pinnavormide piirpinnad. Lõplik lahendus tuleb välja töötada koostöös modelleerijatega.
7. **Aluspõhja reljeefi teemakaart.** Aluspõhja reljeefi kolmemõõtmeline pind sisaldub 3D mudelis, koosnedes kõikide aluspõhja ja pinnakatte sette kivimite vahelistest piirpindadest. Selle pinna alusel on võimalik genereerida soovitud samajooni (72003 ja 72004). Aluspõhja astanguid (72001 ja 72002) tuleb kujutada eraldi joontega. Astangujooni tuleb arvestada ka mudelis kasutatavate pindade loomisel. Astangujooned on vastavate pindadega seotud. Mattunud orgude piirid (73101) on arvutatavad aluspõhja reljeefi pinna alusel.
8. **Pinnakatte paksuse teemakaart.** Pinnakatte paksus on samuti leitav 3D mudeli põhjal ning eraldi nähtusklassi 3D mudelis ei ole vaja. Aluspõhja reljeefi ning tänapäeva reljeefi pindade vahena arvutatakse pinnakatte

paksuse pind, mille põhjal on võimalik genereerida soovitud tihedusega samapaksusjooni.

9. Aeromagnetiliste anomaaliate teemakaart ja Bouguer anomaaliate

teemakaart. Geofüüsikaliste nähtuste kaardid kujutavad mõlemad iseseisvaid pindu. Kahemõõtmelise kaardi puhul interpoleeritakse mõõdistusandmete põhjal kolmemõõtmeline pind, millest genereeritakse samajooned. 3D keskkonna puhul tuleb vastav pind koostada samas keskkonnas ning samajoonte asemel säilitada kogu pind.

10. Faktiline materjal. Alates 2004. aastast on kaardistamisel kasutatud

faktiline materjal (puursüdamikud, puurkaevud ja vaatluspunktid) kirjeldatud faktilise materjali andmebaasis. 3D mudeli juures on faktiline materjal aluseks pindade loomisel. Faktilise materjali andmepunkt osaleb kõikide nende pindade kujundamisel, mida ta läbib. Samas on oluline säilitada ka andmepunkti kui terviku metaandmed. Selleks tuleb iga pinna kohta, millega andmepunkt lõikub (puursüdamiku läbimine kivimkehade vahelisest piirist) luua andmepunkt ja säilitada iga punkti kohta teave, milline kivimkeha asub temast üleval ja milline allpool. Iga selline punkt seotakse metaandmete tabeliga, kus on kirjeldatud kogu nähtuse (puursüdamik, vaatluspunkt) metaandmed. Modelleerimise käigus lisatud andmepunktid salvestatakse sarnaselt faktilise materjali punktidele ning metaandmetes kirjeldatakse punkti tekkimise metaandmed (modelleeri, modelleerimisaeg jne). Faktilise materjali kolmemõõtmeliseks visualiseerimiseks tuleb välja töötada esitusmudel.

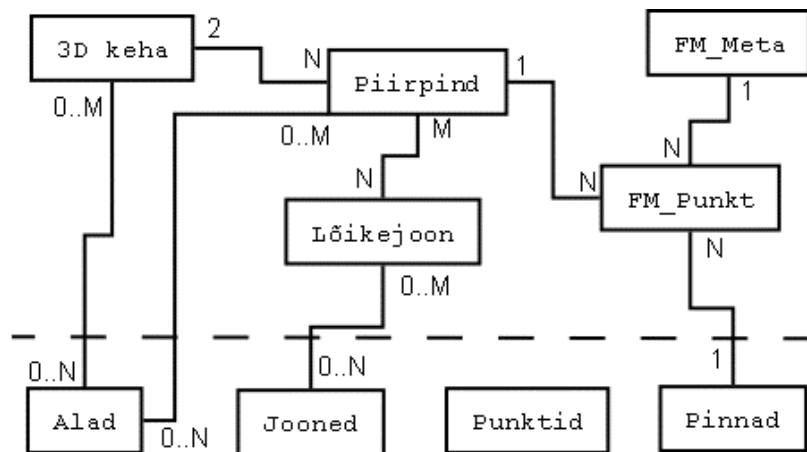
11. Läbilõiked. Kuna läbilõiked on 3D mudeli põhjal genereeritavad, siis eraldi salvestamist need ei vaja. Kirjeldada tuleb läbilõike koostamise reeglid ning programmeerida läbilõike koostamise funktsioon neid täitma.

12. Kaardikirjad. Kaardikirjad (geoloogilised indeksid, pinnavormide nimed jne) tuleb kujutada vastavate nähtuste atribuutidena. Selliste nähtuste jaoks, mida ei ole võimalik määrata või mudelis piiritleda (nt aluspõhja reljeefivormide nimed), on võimalus määrata kirja paiknemise asukoht punktina ning kirja tekst selle punkti atribuudina (*annotation feature class*).

13. Topograafiline alusmaterjal. Praeguse kaardistamisjuhendi järgi annab Maa-amet kaardistajale kaardistamisel kasutamiseks ja trükikaardil kujutamiseks digitaalselt Eesti Baaskaardi nähtused. Praktikas on baaskaardi andmestikku kasutatud aga vaid trükikaardi kujundamisel. Looduses liikumiseks ja faktilise materjali asukoha määramiseks on kasutuses peamiselt põhikaart. *ESRI* platvormil modelleerimiskeskond võimaldab kasutada kõiki Maa-ameti ruumiandmete kogusid. Seega on võimalik mudelil orienteerumiseks kasutada nii baaskaardi kui põhikaardi (ETAK-i) andmeid ja ka ortofotosid. Võimalik on defineerida, millises mõõtkavas milliseid andmeid kuvatakse. Lihtsaim viis selleks on Maa-ameti WFS (*Web Feature Service*) või WCS (*Web Coverage Service*) teenuste kasutamine. Topoloogilist andmestikku saab kujutada pool-läbipaistvana ning drapeerida soovitud (reljeefi) pinnale. Eraldi lähenemist võib vaja minna veekogude kujutamisel, mida on võimalik kajastada ka 3D mudeli kehadena.

Joonisel 11 on saadud infomudel esitatud üldistatud kujul ER diagrammina. Kirjeldamata on olemite atribuudid ning olemid on grupeeritud ruumikuju ja selle iseloomu järgi. Näiteks erinevate atribuutidega, kuid ühesuguste seostega ala tüüpi nähtused (kaevandusala, karstiväli jne) on kujutatud ühise olemi „Alad“ all. Joonisel kujutatud katkendjoon eraldab piirpindade kontseptsioonis osalevaid ja sellest eraldatud olemeid.

Olemid FM_Punkt ja FM_Meta kajastavad mudelis kasutatavat faktilise materjali andmestikku. Samasse salvestatakse ka modelleerija poolt lisatud andmepunktid. Iga punkt osaleb mõnes piirpinnas või mõnes eraldiseisvas pinnas (geofüüsika, veetasemed jm). Iga pind koosneb paljudest punktidest. Iga piirpind on ümbritsetud teiste piirpindadega lõikumisel tekkivatest lõikejoontest. Iga piirpind on seega seotud mitme lõikejoonega. Piirpindade mudelis on pindade lõikejooned mittesiledat muutkonda põhjustava omadusega, seetõttu külgneb iga lõikejoon vähemalt kolme piirpinnaga. Eraldiseisvad joon tüüpi nähtused võivad lõikejoontega ühtida. Iga piirpind on seotud täpselt kahe 3D homogeense kehaga, sest kummalgi pinna küljel on üks homogeenne keha. Eraldiseisvad alad võivad olla seotud nii piirpindade kui 3D kehadega, samas võib esineda alasid, mis pole seotud ühegi pinna ega kehaga ning pindu ja kehi, mis pole seotud ühegi alaga.



Joonis 11. Üldistatud infomudeli ER diagramm

Pikemas perspektiivis on võimalik 3D maapõue mudeli ja sellega seonduvate nähtusklasside seostamine teiste Maa-ameti ja Maa-ameti väliste registritega. Näiteks Keskkonnaregistri Maavarade Nimistuga või OÜ Eesti Geoloogia Keskuse poolt hallatava puurkaevude andmebaasiga “Põhjavesi-Puurkaev”. Esimesel juhul on võimalik geoloogilise konteksti ja maardlate võrdlemine, teine võimaldaks kaardil kujutatavate puurkaevude andmestiku automaatset uuendamist ning mudeli ajakohastamist.

3.4. Agregeeritav geoloogiline süntaks

Geoloogiline süntaks kirjeldab kaardistatavaid kivimkehi ja nende vahelisi seoseid. Agregeerimisel liidetakse kõrvuti paiknevad kehad. Agregeeritav geoloogiline süntaks kirjeldab lisaks kivimkehadele ja nende vahelistele seostele ka agregeerimise reegleid. Agregeerimine on vajalik mudeli generaliseerimise võimaldamiseks. Lisaks annab kivimkehade agregeerimise oskus juurde mitmeid analüüsivõimalusi.

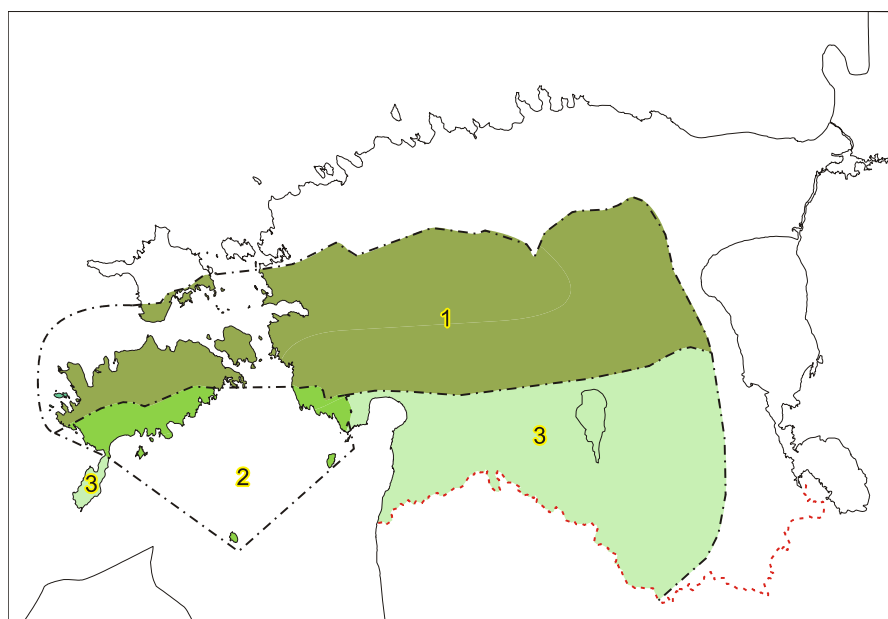
Vanade puursüdamike kirjeldused sisaldavad sageli aegunud ja kaardistusjuhendile mittevastavaid üksusi. Esineb nii juhendist detailsemaid üksusi kui ka vahemikke, mis ulatuvad üle mitme kivimkeha. Esimesel juhul on vajalik agregeerimine, teisel juhul väljaselgitamine, millised kivimkehad vahemikku kuuluvad. Selle järgi on võimalik lasta modelleerijal määrata vahemiksisestest kivimkehade piirid. Seega on ka faktilise materjali kasutamisel agregeeritav süntaks vajalik.

Iga settekeha (kivimkeha ja kivimkehade vahemik) kirjeldatakse selle nime ja indeksi abil. Võimalik on ka definitsiooni lisamine. Litostratigraafiline kivimkehade jaotus, mida geoloogilise kaardistuse juures kivimkehade määratlemisel kasutatakse,

põhineb settekeha vanusel ja litoloogilisel koostisel. Valdav enamus settekehi on eristatavad vanuse põhjal; sama vanusega, kuid erineva litoloogiaga settekehad ei esine ühes piirkonnas korraga.

Settekeha vanus tähistatakse selle alguse ja lõpu vanuse märkimisega topoloogilisel ajaskaalal. Topoloogiline ajaskaala tähendab, et ei ole vaja välja selgitada setteperioodi alguse ja lõpu täpset vanust miljonites või tuhandetes aastates, vaid peab olema võimalik määrata, milline settekeha on vanem, milline noorem; kas ühe settekeha lõpu ja teise alguse vahel on ajaline lünk jne. Mitmeid kivimkehi liitvad vahemikud algavad vanima agregeeritava kivimkeha algusajaga ja lõppevad noorima kivimkeha lõpuga. Sama kivimkeha võib osaleda mitme erineva vahemiku koosseisus. Generaliseerimisel kasutatakse ühte neist vastavalt mõõtkavale. Sobivaim viis on väiksemates mõõtkavades järgida suurema stratigraafilise jaotuse piire (ladestud jne). Selleks tuleb igale settekehale lisada juurde ka tema „järk“ generaliseerimisel, mis selgitab, kas on tegemist kaardistatava kivimkehaga või ladekonda kokku võtva vahemikuga. Eraldi järgu abil tuleb tähistada ka vahemikud, mida kasutatakse vaid faktilise materjali andmete interpreteerimisel, mitte generaliseerimisel (samas võib soovi korral ka selline agregeerimine võimalik olla) ja kaardistatavatest kivimkehadest detailsemad ühikud.

Eesti maapõues on ladestute siseselt eristatavad erinevad struktuur-fatsiaalsed vööndid (Joonis 12). Vööndid on moodustatud sama vanusega kivimite erinevate litoloogiliste tunnuste põhjal (Raukas ja Teedumäe 1997). Erinevad litoloogilised tunnused on tingitud erinevatest settetingimustest (madal meri või sügav meri jne). Struktuur-fatsiaalsete vööndite litoloogilise erinevuse tõttu on ka litostratigraafilise jaotuse järgi vööndites erinevad kivimkehad (Joonis 13).



- Siluri ladestu struktuur-fatsiaalsete vööndite leviku piir
 Kesk- ja Lääne-Eesti vöönd (1)
 Saaremaa, Tõstamaa, Kihnu ja Ruhnu vöönd (2)
 Lõuna-Eesti ja Sõrve vöönd (3)

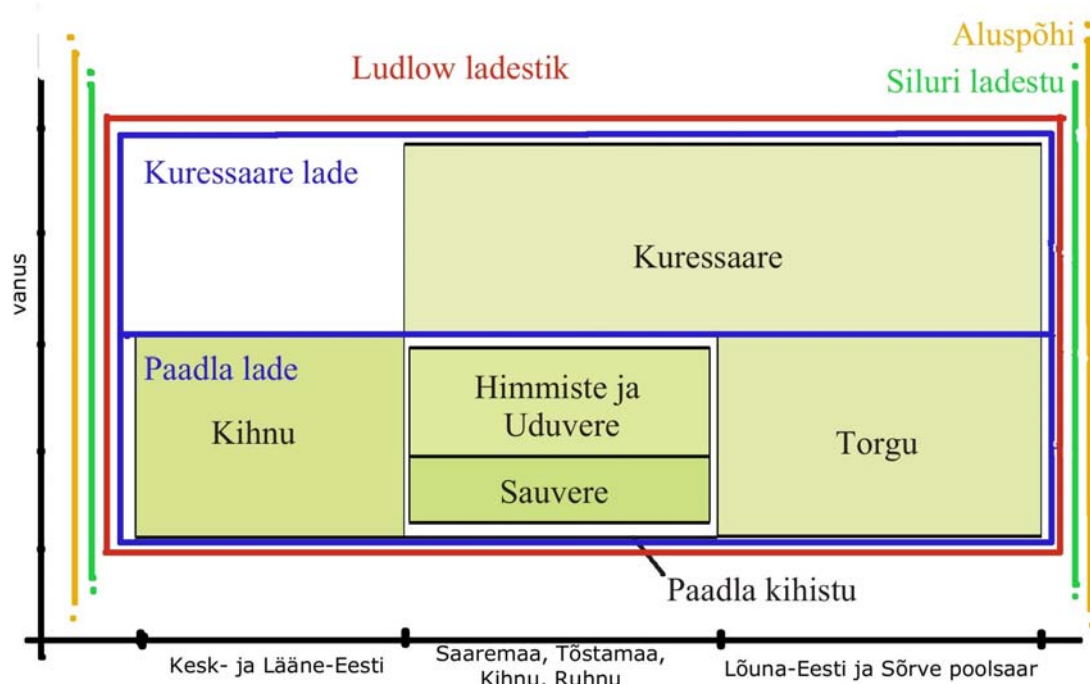
Joonis 12. Siluri ladestu struktuur-fatsiaalsed vööndid (Maa-amet 2007a)

LADESTU	LADESTIK	LADE	KAARDISTATAVAD KIVIMKEHAD (KIHISTUD)		
			Kesk- ja Lääne-Eesti	Saaremaa, Tõstamaa, Kihnu, Ruhnu	Lõuna-Eesti ja Sõrve poolsaar
SILUR	PRIDOLI	Ohesaare			Ohesaare (S_{oh})
		Kaugatuma			Kaugatuma Ülem-Lõo kihid (S_{AgL_1}) Kaugatuma Alam-Lõo kihid (S_{AgL_2})
					Kaugatuma Ülem-Aigu kihid (S_{AgA_1}) Kaugatuma Alam-Aigu kihid (S_{AgA_2})
	LUDLOW	Kuressaare			Kuressaare (S_{kr})
		Paadla	Kihnu (S_{kh})	S_{pd} H-U S_{pd} S	Torgu (S_{tr})
	WENLOCK	Rootsiküla	Sakla (S_{sk})		Rootsiküla (S_{rt})
		Jaagarahu			Sõrve (S_{sr})
			Muhu (S_{mh})	(S_{jg}) S_{rk}	Jamaja (S_{jm})
		Jaani	Jaani (S_{jn})		Riia (S_{rg})
	LLANDOVERY	Adavere			Velise (S_{vl}) Rumba (S_{rm})
		Raikküla	S_{hl} S_{rk_1}	$S_{nrJõ-M}$ $S_{nrJä-V}$	(S_{sr} I-St) (S_{sr} H-K)
			S_{hl}	$S_{nrJä-V}$	
		Juuru	Tamsalu (S_{tm}) Varbola (S_{vr})		Õhne (S_{oh})

Joonis 13. Siluri ladestu litostratigraafiline skeem (Maa-amet 2007a)

Lihtsustatud kujul saab teineteisest erinevad struktuur-fatsiaalsed vööndid järjestada ühisel teljel ja iga settekeha juures märkida selle positsioon teljel. Juhul, kui settekeha

positsiooni sellel teljel kujutada vahemikuna ja ristuväl teljel kujutada settekeha vanusevahemikku, on võimalik koostada settekeha struktuur-fatsiaalsed vööndid (võimalikku leviala) ja vanust iseloomustav ala (Joonis 14). Tekkinud alade omavaheliste suhete abil on võimalik kindlaks teha settekehade vahelised suhted. Kui üks ala on teise sees, siis kuulub vastav kivimkeha vastavasse vahemikku, vahemiku kuuluvate settekehade leidmiseks tuleb leida kõik alad, mis on täielikult päritava vahemiku sees jne. Kui kahe settekeha ala vahel piki ajaskaalat esineb selline piirkond, mida ei kata ükski settekeha, siis on nende settekehade settimise vahelisel ajal toimunud erosioon. Lahendus on realiseeritav ala tüüpi ruumiandmete väljaga andmetabelina. Sellist tabelit kasutatakse juba praegu faktilises materjalis esinevate vahemike kontrollimiseks. Näiteks, kui kirjelduses on ülemiseks üksuseks vahemik, kuid üldosas on avamuse lahtris kindel kaardistatav kivimkeha, siis kontrollitakse, kas see kivimkeha kuulub vastavasse vahemikku.



Joonis 14. Ludlow ladestik ja sellega kattuvad settekehad settekeha vanust ja vööndit iseloomustavate aladena

Järgmine samm geoloogilise süntaksi täiendamisel on kivimkeha leviala kirjeldamine järjestatud telje asemel reaalsel leviala tähistava alana. Settekeha alguse ja lõpu ajad tuleb sel juhul kirjeldada kolmanda mõõtmega ning tulemuseks on omamoodi 3D mudel. Ka maapõue 3D mudeli põhjal on võimalik kivimkeha leviala määrata. Seega on võimalik erinevaid settepiirkondi eristada juba olemasoleva mudeli põhjal. Eelduseks on, et vastava piirkonna kohta on mingisuguselgi tasemel mudel olemas, mis

kivimkehade levialasid üldises plaanis kajastaks. Koos mudeli redigeerimisega ja levialade täpsustumisega täpsustub sellisel juhul ka geoloogiline süntaks. Iga settekehaga peab seotud olema tema leviala ja seadmise alguse ja lõpu ajad ajaskaalal. Settekehade omavaheliste suhete selgitamisel kontrollitakse esmalt setteaegu ning nende kattumisel ka levialasid.

Agregeerimisel koostatakse vastavalt mõõtkavale või kasutaja soovile mittekattuvate settekehade nimekiri. Näiteks pinnakatte läbilõike koostamiseks võib kõiki aluspõhja kivimkehi kujutada ühe abstraktse kivimkehana „aluspõhi“ ning eraldi kõiki pinnakatte settekehi. Mudeli kuvamisel või analüüsil vaadatakse üle kõikide uuringualasse jäävate piirpindade külgnvad kivimkehad. Määratakse, millisesse moodustatud nimekirjas olemasolevasse settekehasse vastav kivimkeha kuulub (millisega ajavahemik ja leviala kattuvad) ning kuni settekehade nimekirja muutmiseni kasutatakse esialgse kivimkeha asemel seda. Protsessi tulemusel on kõikide ühte settekehasse agregeeritud kivimkehade vaheliste piirpindade mõlemad külgnvad (nii pealne kui alumine) settekehad samad (vastavad atribuudid on võrdsed). Sellised piirpinnad jäetakse visualiseerimisel ja analüüsil kõrvale ning moodustuvad agregeeritud kehad.

3.5. Piirpindade mudel *ESRI* platvormil

Alates versioonist 9.2 on *ESRI* platvormile lisandunud uus andmetüüp *terrain*, mis sisuliselt võimaldab TIN mudeli salvestamist andmebaasis. *Terrain* pind trianguleeritakse selle kasutamisel jooksvalt. Pinna moodustamisel osalevaid nähtusi ei salvestata andmebaasis uuesti, vaid neid kasutatakse algsest nähtusklassist, moodustatakse vaid indeks andmete kiireks töötlemiseks. Nähtuste muutumisel algsest nähtusklassis muutub ka *terrain*'i pind. Iga nähtusklassi seostamisel *terrain*'iga määratakse ka vastava nähtusklassi nähtuste roll (andmepunkt, välimine piir jne) ja kõrgusandmete allikas (z koordinaat, atribuut) pinna moodustamisel sarnaselt TIN mudeli loomisele. *Terrain* ja kõik selles osalevad nähtusklassid peavad *ESRI* andmebaasi siseselt paiknema ühe ja sama andmekogu (*dataset*) sees. Sellisel viisil on tagatud, et kõik kasutatavad andmed on ühtses koordinaatsüsteemis. *Terrain* pind on multiresolutsiooniline, võimaldades määrata TIN-i koostamiseks vastavalt mõõtkavale erinevaid püramiidi tasemeid ja nii automaatselt pinna mudelit generaliseerida. Visualiseerimiseks on võimalik *terrain* vastavalt soovitud piirkonnale ja püramiidi tasemele pärida TIN või rasterkujul, ning seejärel kasutada vastavate töövahenditega (ESRI 2006).

Terrain kasutab temaga seostatud nähtusklassist kõiki elemente, nende filtreerimine ei ole võimalik. Seetõttu on vajalik iga mudelis osaleva *terrain*'i jaoks selles pinnas osalevatest andmepunktidest koostada eraldi nähtusklass. Vastavatesse nähtusklassidesse kantakse ainult andmepunkt ja selle identifikaator. Ülejäänud tärkandmed säilitatakse kõiki andmepunkte hõlmavas nähtusklassis. Nii on tagatud võimalikult kiire *terrain*'i loomine ning andmeanalüüsi võimalus üle kõikide andmepunktide.

ESRI TIN (ja seega ka *terrain*) pinda saab piiritleda lõikepolügooniga (*clip polygon*). Pinna sisse on võimalik lõigata ka auke. Lõikepolügooni lisamine ei kustuta polügoonist välja jäävaid andmepunkte ja kolmnurki, vaid märgistab need vastavalt. Kui geoloogilise mudeli ehitamisel tavaliselt esialgse pinna ülearused osad kustutatakse, siis *ESRI* platvormil on võimalik need osad varjatult säilitada. Seeläbi on võimalik pinda mõjutada väljaspool lõikepolügooni asuvate andmepunktidega ja arvestada neid ka hilisemal mudeli redigeerimisel. Iga mudelis osalev piirpind omab lõikepolügooni. Piirpindade lõikepolügoonid moodustatakse pindade lõikumisel tekkivatest lõikejoontest ja Eesti Vabariigi piirist.

Kahe mudelis osaleva pinna lõikumisel salvestatakse tekkinud lõikejoon vastavasse tabelisse. Vastavalt lõikuvate pindade vanusele ja sellele, kas pindade seadistamise vahelisel ajal on esinenud erosiooni, määratakse, kumb pind katkestatakse (vt ptk 2.3). Teatud tingimustes, näiteks pinnakatte setete korral, küsitakse modelleerija käest, kumb pind katkestada. Lõikejoon seostatakse katkestatava pinnaga ning seda kasutatakse hiljem koos teiste sama pinnaga seotud lõikejoontega lõikepolügooni koostamisel. Teine pindade lõikumisel osalev nõ lõikav pind seostatakse samuti lõikejoonega. Sel juhul aga lõikejoon ainult ei piira vastavat pinda, vaid jaotab selle kaheks. Seda seetõttu, et lõikuva pinna poolisel küljel on lõikaval pinnal erinevad homogeensed kehad. Et sama pinna ühel küljel saab olla vaid üks homogeenne keha, tuleb vastav pind kaheks jagada. Pärast kõikide pinnaga seotud lõikejoonte väljaselgitamist moodustatakse lõikejoontest tekkinud võrgustiku (pind võib jaotuda väga paljudeks osadeks) põhjal alad. Iga moodustunud ala saab uue *terrain*'i lõikepolügooniks. Luuakse seosed lõikejoonte ja uute pindade vahel. Lisaks tõstetakse esialgse *terrain*'i punktide tabelist vastava ala sisse jäävad andmepunktid uue *terrain*'i punktide tabelisse. Esialgne *terrain* seostatakse tekkinud punktitableliga, säilitades ka seose varsema(te) punktitableli(te)ga. Mudelis osalevad edaspidi vaid tekkinud uued pinnad, andmetabelis salvestatakse iga uue pinna juurde viide esialgsele pinnale, säilitatakse

edaspidise modelleerimise tarbeks. Kahel juhul on sellel pinnal ka omaette väärtus – üks sellistest pindadest on maapinna reljeef ja teine aluspõhja reljeef, mis sellisel kujul on tervikuna kiiresti kätte saadavad.

Juhul, kui lõikejoonte võrgustikku jääb „avatud silm“ ehk selline ala, mida piiravad lõikejooned ei moodusta suletud polügooni, siis seda ala eraldi piirpinnana ei kujutata. Tegemist on „rippuva“ pinnaga, mis ei ulatu järgmise lõikumiseni. Sellisesse piirkonda jäävad andmepunktid kantakse mõne külgneva piirpinna punktitalbiselt ehk lõigatakse ära, sest punktid jäävad väljapoole lõikepolügooni.

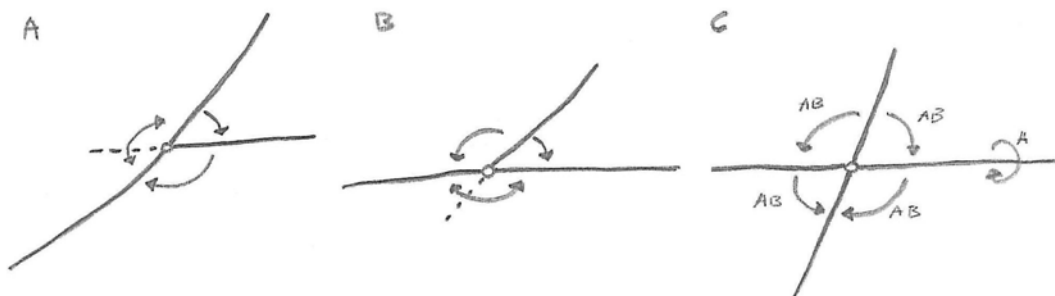
Mudelisse uue pinna lisamisel kirjeldatakse selle pinna alumine homogeenne keha. Kui kõiki selle keha atribuute ei teata, siis märgitakse teadmata atribuudid esialgu tühjana ning arvestatakse, et need atribuudid on mõlemal pool seda pinda võrdsed. Selleks tähistatakse iga pinna juures, milliste atribuutide erinevusi vastav pind lahutab. Näiteks võib mudelis esineda pindu, mille külgnevad kehad erinevad kõikide atribuutide poolest, aga ka neid, mis erinevad ainult ühe atribuudi (nt veeandvuse või litoloogia) osas. Selliste pindade puhul, mis ei erista stratigraafiliselt erinevaid kehi, vaid ainult mõnda muud atribuuti, on võimalik, et pindade lõikumisel tuleb mõlemad lõikuvad pinnad piki lõikejoont kaheks jaotada (Joonis 15 c).

Mudeli kasutamise seisukohast on iga piirpinna juures oluline teada ka pinna pealpool asuva keha atribuute. Mudelisse sisestavate pindade kohta määratakse aga vaid alumine keha ja seegi mõnikord vaid ühe atribuudi piires. Mitmed pinnad tükeldatakse mudeli ehitamise käigus ning iga tekkinud tükk külgneb esialgsest erinevate kehadega. Vastavalt kolmele lõikumise tüübile (kas ja milline pind lõikumisel katkestatakse) kehtivad kolm erinevat reeglistikku kehade atribuutide omistamiseks kõikide vastavat keha piiravate piirpindade külgedele (Joonis 15).

- A. Kui noorema ja vanema pinna settimise vahel on esinenud erosioon, siis katkestab noorem pind vanema. Mõlemad pinnad jaotatakse piki lõikejoont kaheks. Vanema pinna see osa, mis jääb nooremast pinnast kõrgemale kustutatakse (pinna lõikepolügooni muudetakse vastavalt). Vanema pinna osale, mis jääb nooremast pinnast madalamale, omistatakse pealmise keha atribuutideks noorema pinna alumise keha atribuudid. Noorema pinna vanemast pinnast allapoole jääva osa alumise keha atribuutideks määratakse vanema pinna alumise keha atribuudid. Noorema pinna mõlema osa pealmine

keha on sama. Seda ei muudeta ning määratakse seos, et neist ühe muutmisel muudetakse automaatselt ka teist.

- B. Kui noorema ja vanema pinna settimise vahel ei ole esinenud erosiooni, siis katkestab vanem pind noorema. Noorema pinna see osa, mis jääb vanemast pinnast allapoole kustutatakse (jäetakse väljapoole löikepolügooni). Vanema pinna mõlema osa alumine keha on sama ja atribuute ei muudeta. Vanema pinna osale, mis jääb nooremast pinnast madalamale, omistatakse pealmise keha atribuutideks noorema pinna alumise keha atribuudid. Vanema pinna teisele osale, mis jääb nooremast pinnast kõrgemale, omistatakse pealmise keha atribuutideks noorema pinna pealmise keha atribuudid.
- C. Kui üks lõikuvatest pindadest on vanuseta (ei määra stratigraafilist piiri), siis lõigatakse mõlemad pinnad kaheks. Vanuseta pinna osade pealmiste kivimkehade atribuudid loetakse lõikuva pinna atribuutidest. Lõikuva pinna alla jääv osa saab alumise keha atribuudid ja lõikuva keha peale jääv osa saab pealmise keha atribuudid. Kui vanuseta pinna pealmise keha atribuudid on määratud, siis omistatakse vastavalt pinna alumisele kehale need ülemise pinna atribuudid, mille osas pind kehi ei eralda (tähistatud pinna loomisel, joonisel atribuut A). Sarnaselt toimitakse kõikide pindadega, mille puhul on määratud, et pind ei eralda kõiki atribuute. Seejärel omistatakse lõikuva pinna alumisele osale vanuseta (sel hetkel tegelikult juba vanusega) pinna atribuudid. Lõikuva pinna alumisele kehale antakse lõikuvast pinnast allapoole jääva vanuseta pinna osa alumise keha atribuudid ja pealmisele kehale lõikuvast pinnast kõrgemale jääva osa alumise keha atribuudid.



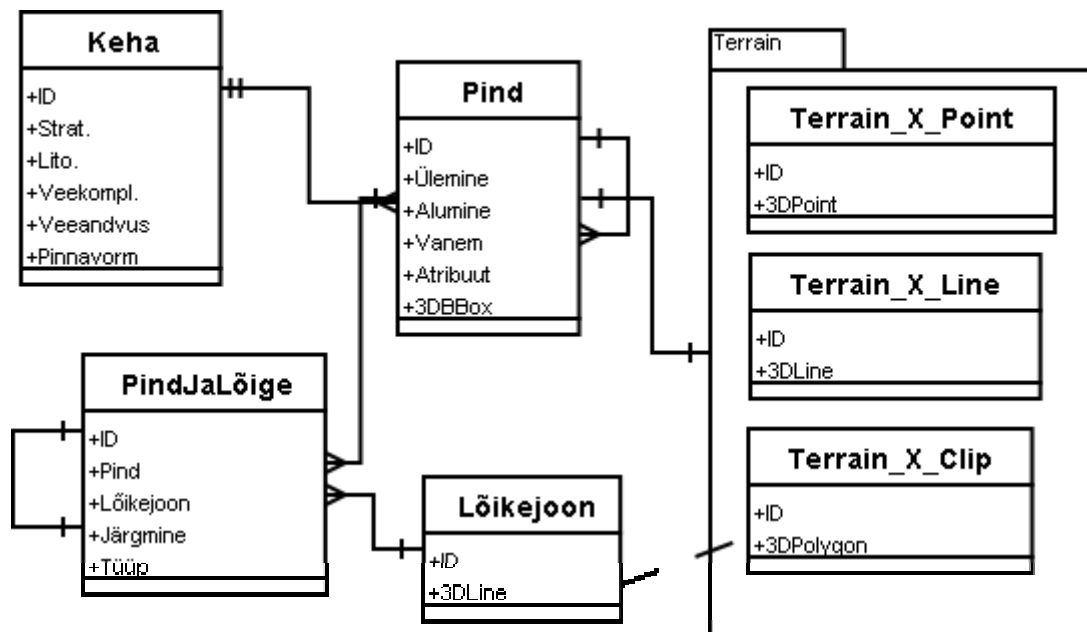
Joonis 15. Atribuutide omistamise reeglid erinevate lõikumiste korral

Hilisema mudeli redigeerimise huvides tuleb kirjeldatud atribuutide omistamise reeglid salvestada ka edaspidiseks. Selleks järjestatakse radiaalselt kõik ühe löike-

joonega seotud piirpinnad. Järjestus salvestatakse pinna ja löikejoone vahelise seose atribuudina. Atribuudi väärtuseks on radiaalselt järgmise pinna seose identifikaator. Järjestus moodustab suletud “ringi” ja järjestuse suund ei ole oluline. Eraldi atribuudiga seose juures kirjeldatakse ka vastava pinna ning sellest järgmise pinna külgnivate kehade atribuutide omistamise reeglid. Vastaval atribuudil saab olla 8 erinevat väärtust:

- minu alumise keha atribuudid omistatakse järgmise pinna pealmise keha atribuutideks,
- järgmise pinna alumise keha atribuudid omistatakse minu pealmise keha atribuutideks,
- minu alumise keha atribuudid omistatakse järgmise pinna alumise keha atribuutideks,
- järgmise pinna alumise keha atribuudid omistatakse minu alumise keha atribuutideks,
- minu pealmise keha atribuudid omistatakse järgmise pinna pealmise keha atribuutideks,
- järgmise pinna pealmise keha atribuudid omistatakse minu pealmise keha atribuutideks,
- minu ja järgmise pinna pealmiste kehade atribuudid on võrdsed ja
- minu ja järgmise pinna alumiste kehade atribuudid on võrdsed.

Mõne pinna atribuutide muutumisel (nt uue pinna lisandumise tagajärjel) leitakse seoste abil kõik pinnad, mille atribuudid muudetud pinnalt omistatakse ja tehakse vastavad muudatused ka neis. Iga muudetud pinna korral korratakse sama protseduuri rekursiivselt, kuni kõikide mõjutatud pindade atribuudid on muutunud. Lisaks atribuutide omistamisele üle servade arvestatakse pindade omadusi atribuutide piiramisel. Kui pinna pealmisel küljel muudetakse atribuuti, mille erinevusi kõnealune pind ei kajasta (märgitud vastava atribuudi abil), siis kantakse muudetud atribuudi väärtus ka pinna alumisele küljele.



Joonis 16. Piirpindade andmemudel

Kuna samad atribuutide komplektid kehtivad kõigi sama keha piiravate pindade juures, siis andmeliiasuse ja potentsiaalse andmete vastuolu vältimiseks tuleb vastav relatsioon (piirpindade tabel) normaliseerida. Selleks tuleb kõik keha iseloomustavad atribuudid viia eraldi relatsiooni (kehade tabelisse) ning piirpindade tabelisse lisada kummagi pinna külje jaoks välisvõtmena kehade identifikaatorid (Joonis 16). Keha omaduste üle kandmisel kantakse seega üle ainult keha identifikaator. Erandiks on olukord, kus pinna ühelt küljelt teisele kantakse vaid mõne atribuudi väärtus.

3.6. Piirpindade redigeerimine

Pinna esmane mudelisse lisamine on suhteliselt arvutusmahukas. Juba mudelis oleva pinna redigeerimine on aga tunduvalt lihtsam. Mudeli hilisemal redigeerimisel muudetakse või lisatakse *terrain*'i punktitalabelisse punkte. Juhul kui muudatus on toimunud mõne lõikejoone läheduses (muudatusest mõjutatud kolmnurgad piirnevad pinna lõikepolügooniga) siis leitakse pärast punktitalabelite redigeerimist uuesti ka vastav lõikejoon. Mitmeks jaotatud pindade asemel kasutatakse lõikejoone määramisel esialgset pinda. Vajalik on ainult muudatusest mõjutatud lõikumise arvutamine. Lõikumise muutust pole vaja leida ka pindade täies ulatuses, vaid ainult muutunud piirkonnas. Seejärel kantakse parandused sisse kõikide muutunud lõikejoonega piirnevate piirpindade lõikepolügoonidesse. Juhul, kui mõni andmepunkt on muudatuse tulemusel jäänud jaotatud pinnal mõne teise jaotuse sisse (teisele poole lõikejoont), siis tuleb vastav andmepunkt liigutada vastava *terrain*'i punktitalabelisse. Kindlasti tuleb aga

kontrollida, kas muudatus pole tekitanud lõikumisi mõne pinnaga, millega enne muudatust lõikumist polnud.

Pindade loomisel ja hilisemal muutmisel on võimalik kasutada mitmesuguseid andmeid. Võimalik on selekteerida punkte faktilise materjali tabelist, kasutada olemasolevat *ArcGIS* nähtusklassi ja lisada punkte interaktiivselt kasutajaliidese kaudu. Võimalik on ka pind eelnevalt TIN või *terrain* mudelina valmis teha ning seejärel koos vastavate atribuutidega mudelile lisada. Eelkõige maapinna ja aluspõhja reljeefide pinna kohta on olemas samajoonte andmestik. Samajoonte kasutamine TIN mudeli koostamisel muudab pinna terrassiliseks. Triangulatsioonil seotakse omavahel sama samakõrgusjoone punktid ning tekivad ebanormaalsed tasased alad (terrassid), mis sildavad kitsamad orud ja nõod ning lõikavad maha harjad. Terrasside elimineerimiseks lisatakse terrassitud aladele valitud punktid ning arvutatakse nende kõrgused selliselt, et pind oleks võimalikult ühtlane. Lisatavad punktid valitakse kontuuridest moodustuva ala skeleti sõlmpunktide seast (Pruulmann 2007).

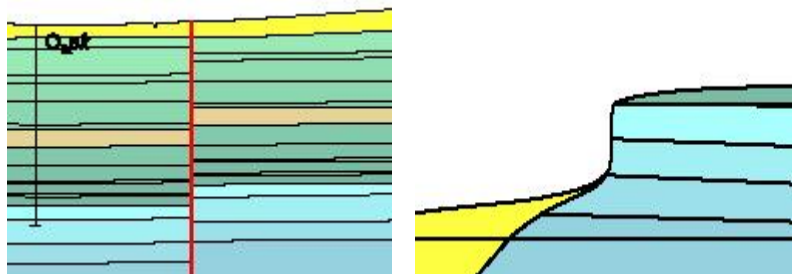
3.7. Generaliseerimine

Kõrgematel *terrain*'i püramiiditasemetel toimuval generaliseerimisel arvestatakse automaatselt ainult punkt-tüüpi andmetega. Joon ja ala tüüpi nähtusklasse (sealhulgas lõikepolügoone) *terrain* automaatselt generaliseerida ei oska ning neid kasutatakse ka kõrgematel püramiidi tasemetel täies mahus. Selliste andmete generaliseerimine on siiski võimalik läbi generaliseeritud nähtusklasside. Selleks tuleb vastavast nähtusest (lõikepolügoonist, murdejoonest) luua uus generaliseeritud nähtusklass ning *terrain*'i kirjeldamisel määrata, et kõrgema püramiidi taseme korral kasutataks originaalse nähtusklassi asemel seda. Nii on võimalik määrata iga püramiidi taseme jaoks oma lõikepolügoon. Generaliseeritud lõikepolügoonide loomiseks tuleb esmalt generaliseerida lõikejooned ning nende alusel luua generaliseeritud polügoonid, et oleks tagatud külgnivate pindade kokkusobivus. Pindade generaliseerimisega paralleelselt tuleb kasutada ka kivimkehade agregeerimist (ptk 3.4).

3.8. Astangud ja rikked

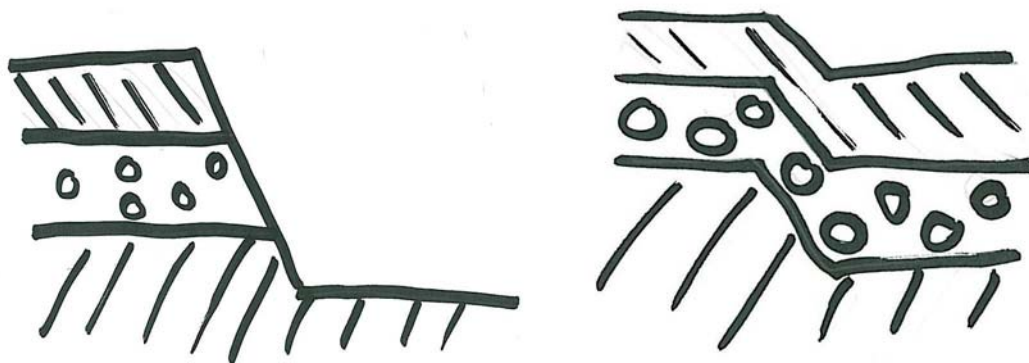
Nii astangud kui rikked mõjutavad settekehade pindu, katkestades nende sujuvuse. Nii astangu kui rikke korral on mõjutatud pind kahel pool joont erineva kõrgusega (Joonis 17). Astangu korral võib keha ka lõppeda. Nii riket kui astangut võib kujutleda vertikaalse pinnana. *Terrain*'i koosseisus aga ei ole vertikaalset pinda võimalik

kujutada, sest põhjustaks mitme z väärtuse esinemise ühe x,y koordinaatpaari kohta. Lahenduseks on see, et astang pinnas kirjeldatakse kahe paralleelse ja teineteise lähedal oleva murdejoone abil, mille vahele tekib peaaegu vertikaalne pind.



Joonis 17. Rike ja astang läbilõikel

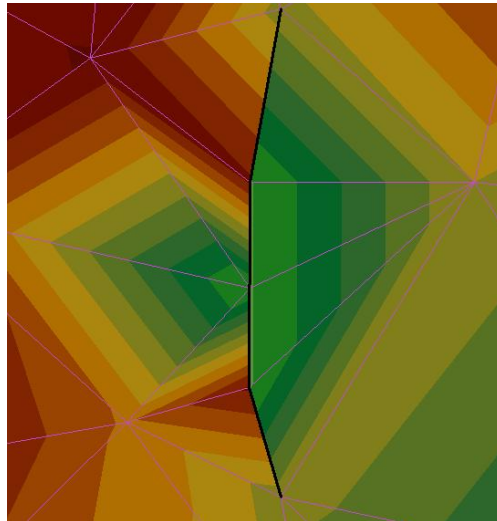
Astangud sisestatakse keskkonda astangute asukohta kirjeldavate joontena. Astangud jaotatakse mattunud ja avanevateks. Mattunud astangu korral on astang ainult aluspõhja kivimeis ning kaetud pinnakatte setetega. Avaneva astangu korral eristub astang ka tänapäeva reljeefis, ulatudes pinnakatte setetest läbi. Mattunud astanguid arvestatakse aluspõhja reljeefi koostamisel. Avanevad astangud tuleb kaasata maapinna reljeefi modelleerimisel. Astangu kujutamiseks genereeritakse paralleelselt astanguga kummalegi poole astangujoont üks joon. Paralleelsete joonte vahekaugus hoitakse võimalikult väike. *Terrain*'i sisaldava andmekogu koordinaatsüsteem kirjeldab ka andmete resolutsiooni. Kui kaks andmepunkti satuvad teineteisele lähemale kui määratud resolutsioon, siis üks punktidest heidetakse kõrvale. Astangut kajastavate paralleelsete joonte vahe peab kirjeldatud resolutsioonist suurusjärgu võrra suurem olema, sest selles vahemikus (astangul) võib toimuda lõikumine teiste geoloogiliste pindadega ning mudeli resolutsioon peab võimaldama lõikejooni täpselt salvestada. Joonte käänupunktile lisatakse z koordinaadid. Z koordinaadi väärtus leitakse vastava paralleeljoonega astangujoonest samale poole jääva pinna kõrgusele või määratakse (korrigeeritakse) käsitsi. Seejärel lisatakse saadud jooned tugevate murdejoontena (*hard break lines*) *terrain*'ile. Selleks koostatakse vastava *terrain*'iga samasse andmekogusse joon tüüpi geomeetriaväljaga nähtusklass, kuhu vastavad murdejooned kantakse ning lisatakse see nähtusklass *terrain*'ile. Astangu asukoha korrigeerimisel arvutatakse vastavad murdejooned uuesti.



Joonis 18. Nihe piirpindades astangu ja rikke kujutamisel

Rike tekitab mõjutatud pinda astangu. Seega on rikete kujutamist võimalik lahendada sarnaselt astangutele. Rikked sisestatakse mudelisse nende asukohta tähistavate joontena. Iga rikke juures kirjeldatakse tema tekkimise aeg geoloogilise süntaksi juures kasutataval ajaskaalal, selle alusel on võimalik määrata, millised pinnad on rikke poolt mõjutatud. Lisaks tuleb kirjeldada rikke amplituud ning nihke suund. Nende alusel arvutatakse paralleelsete murdejoonte kõrgusväärtused. Mõnel puhul, kui nihkumine rikke pinnal on toimunud pika aja jooksul, võib tarvis olla kirjeldada iga mõjutatud pinna kohta oma amplituud. Vanemad pinnad on suurema amplituudiga kui nooremad, sest võivad olla rikke poolt mõjutatud juba enne nooremate pindade tekkimist. Rikete puhul ei ole tähtis paralleelsete murdejoonte vahekauguse hoidmine võimalikult väiksena, vaid selle läbi on võimalik mudelis kujutada rikkevööndi ulatust, mis võib sageli olla üsna suur. Rikkevööndi keskmine ulatus tuleb seega kirjeldada rikkejoone atribuudina. Oletatavaid rikkeid kujutatakse mudelis sarnaselt kindlaks tehtud riketele. Lisatakse vaid vastav märg.

Sellisel viisil saab kirjeldada vertikaalseid ja vertikaalilähedasi rikkeid. Suurema nurga all olevad rikked tuleb kujutada pinnana ning lisada vastav pind mudelile. Sellisel juhul tuleb aga rikke poolt mõjutatud pinnad kujutada kahes osas ning eraldi kontrollida nihke amplituudi nende pindade vahel.



Joonis 19. Kõrgusväärtuse "hüppamine" üle astangut kujutavate murdejoonte

Murdejooni (*break line*) arvestatakse TIN'i ja *terrain*'i trianguleerimisel selliselt, et piki murdejooni kulgeks alati kolmnurkade servad. Selle saavutamiseks ning Delaunay kriteeriumi rahuldamiseks lisatakse vajadusel murdejoone lõigule automaatselt käänupunkte. Delaunay kriteeriumi järgi ei tohi ühegi kolmnurga kõiki tippe ühendava ringjoone sees olla ühtegi andmepunkti. Sellega tagatakse võimalikult täidlased kolmnurgad. Kahe lähestikku paikneva murdejoone lisamisel võib tekkida olukord, kus esimese murdejoone lisamisel Delaunay kriteeriumit ei rikuta, kuid teise joone lisamisel on vaja lisada sellele uusi punkte. Paraku ei arvestata sellisel juhul enam varasemate murdejoontega ning uue punkti lisamisel moodustuvad kolmnurgad ulatuvad üle paralleelse murdejoone, kaotades selles kohas astangu (Joonis 19). Üks lahendus oleks sellised kohad eelnevalt välja otsida ning mõlemale murdejoonele vajalikesse kohtadesse käänupunkte lisada. Iga paralleelsele murdejoonele lisatud käänupunktid võib aga tingida vajaduse järgmiste käänupunktide järele. Probleem on seotud murdejoonte käänupunktide ja ümbruskonnas asuvate punktide tihedusega. Kui piki murdejooni asuvad käänupunktid tunduvat tihedamalt kui ümbruskonnas olevad andmepunktid, siis sellist probleemi ei teki. Astangujoone käänupunktide vahe, ümbruskonna andmepunktide tiheduse ja paralleelsete murdejoonte omavahelise kauguse seosed Delaunay kriteeriumi rahuldamiseks vajavad lähemat uurimist, mis ei mahu käesoleva töö raamesse. Esialgse lahendusena tihendatakse astangute ja rikete lõikude, kus kõnealune probleem tekib, käänupunkte, kuni probleem kaob.

3.9. Piirpindade mudeli välised andmed

Piirpindade mudeli välised andmed on sellised nähtused, mida ei ole võimalik kujutada homogeense keha atribuudina või puudutab vastav atribuut väga väikest osa mudelist ning pole kõikide kehade või pindade korral määratav ja tooks kaasa suure hulga “tühje välju”. Üldistatud infomudelis (Joonis 11) on piirpindade mudeli välised nähtusklassid esitatud abstraktselt ja andmetüüpide alusel grupeeritult. Iga sellise nähtusklassi korral tuleb aga eraldi üle vaadata nähtustega koos säilitatavad tärgandmed ning erinevate nähtuste salvestamine ühises tabelis on võimalik vaid siis, kui nähtuste ruumikuju tüüp ja kõik atribuudid on ühesugused.

Suuremal osal juhtudest on nähtus võimalik säilitada sama struktuuriga andmetabelis kui kahemõõtmelise kaardi korral. Praeguse kahemõõtmelise kaardi andmebaasi struktuuri kirjeldab Pruulmann (2005). Vajadusel kirjeldatakse seos nähtuste ja piirpindade mudeli (keha, pinna või lõikejoone) vahel, mis võimaldab 3D mudeli muutumisel uuendada ka jooni ja alasid. Nähtusklasside kirjeldavatele tabelitele lisandub geoloogilist süntaksit kirjeldav tabel ja mitmeid koodinimekirju. Viimased on *ESRI* keskkonnas kirjeldatavad ka atribuutide domeenidena.

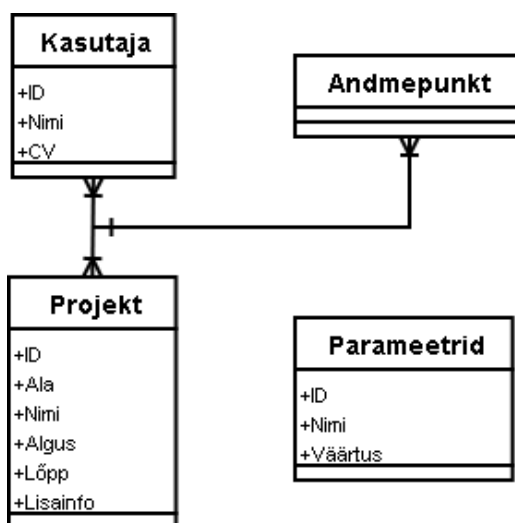
3.10. Keskkonna parameetrid

Maapõue mudeli haldamiseks ja modelleerimiskeskkonna töös hoidmiseks on vaja säilitada mitmesuguseid mittegeoloogilisi andmeid. Siia alla kuuluvad näiteks informatsioon keskkonna kasutajate, nende õiguste kohta ja mitmesugused meta-andmed.

Üldine ligipääs maapõue mudeli andmetele on reguleeritud andmebaasi kasutusõigustega. Kõigil, kellel on olemas ligipääs andmebaasile, on võimalik kogu baasis olevat mudelit kasutada. Lisaks on võimalik määrata, kas kasutajal on lubatud andmeid muuta. Vastavate õigustega andmebaasi kasutajal on võimalik andmete redigeerimine ka otse andmebaasis või kõikvõimalike *ArcGIS* töövahenditega. Seda tuleks aga vältida ning kasutada modelleerimiseks mõeldud laienduse töövahendeid, mis haldavad automaatselt nähtusklassidevahelisi seoseid ja nähtuste metaandmeid. Metaandmetest saab iga andmepunkti kohta lugeda: kes, millal ja mis asjaoludel vastava punkti mudelisse lisanud on. Selleks säilitatakse andmebaasis andmed kaardistusprojektide (riigihangete) ja modelleerijate kohta.

3D mudeli keskkonna (*ArcScene* laienduse) käivitamisel kuvatakse Eesti ülevaatekaart ning palutakse kasutajal määrata piirkond, mille mudelit näha või muuta soovitakse. Võimalik on piirkond määrata interaktiivselt või valida eelnevalt defineeritud alade seast. Viimased võivad olla näiteks haldusüksuste või kaardilehtede järgi jaotatud. Iga eeldefineeritud ala kohta märgitakse, kas see ala piirab kaardistusprojekti (ühe riigihanke käigus modelleeritav või täiendatav piirkond), märkides selle juurde projekti alguse ja lõpu ajad. Selleks, et mudelit redigeerida, peab kasutaja ennast identifitseerima. Juhul kui identifitseeritud kasutaja on seotud sellise kaardistusprojektiga, mis katab valitud piirkonna ja on parasjagu töös, aktiveeritakse redigeerimist võimaldavad töövahendid. Muudatuste jäädvustamiseks on aga vaja ka andmebaasi tasemel kirjutusõigusi.

Iga lisatava ja redigeeritava andmepunkti juurde märgitakse viide modelleerijale ja kaardistusprojektile ning muudatuse tegemise aeg. Muudatuse aja märkimine on oluline multikasutuse seisukohast. Nii saab rakendus aegajalt kontrollida, kas kuvatavas mudeli osas on tehtud muudatusi ning muudatuste olemasolul andmeid uuendada. Eriti oluline on see redigeerimise ajal, kui mitu modelleerijat soovivad töötada üheaegselt. Enne andmete salvestamist kontrollitakse, kas andmebaasis olevad andmed on vahepeal muutunud. Kui pole, siis kantakse muudatus baasi. Kui aga mõni teine modelleerija on “ette jõudnud”, siis antakse võimalus teise modelleerija tehtud parandust vaadelda ning seejärel otsustada, kas kirjutada see üle või mitte. Sarnase põhimõttega tehnoloogiad on rakendatud ka andmebaasi siseselt, kuid need toimivad vaid nähtusklasside piires ning ei pruugi hakkama saada kogu 3D mudeli struktuuriga.



Joonis 20. Infomudel: keskkonna parameetrid

Lisaks piiritletud uuringualadele tuleb eraldi kajastada ka kogu mudeli piir. Selleks sobib kõige paremini Eesti Vabariigi piir. Vastavat piiri kasutatakse ka kõigi pindade lõikepolügooni koostamisel. Juhul, kui pind ei lõiku ühegi teise pinnaga ning ei ole määratud teda piiravaid lõikejooni, siis saab selle pinna lõikepolügooniks mudeli piir.

Mudeli piiri saab kujutada samas tabelis koos teiste eeldefineeritud aladega. Eraldi parameetriga on aga sellisel juhul vaja määrata, milline neist aladest on mudeli piir. Eraldi parameetriga tuleb määrata näiteks ka viide aluskaardi andmetele (serveri aadress), kasutatavad tabelite nimed jne. Sellised parameetrid on võimalik programmeerida rakenduse siseselt, kuid kasulikum on need salvestada andmebaasis, kus on võimalik neid tsentraalselt redigeerida. Andmetabelis säilitatakse parameetri nimi ning väärtus. Rakenduse siseselt on vaja teada ainult parameetri nime. Näiteks aluskaarti pakkuva serveri vahetusel tuleb muudatuse rakendustele selgeks tegemisel muuta serveri nimi vaid andmebaasi vastavas kirjes.

Erinevad keskkonna parameetrid ja nendevahelised seosed (infomudel) on kujutatud joonisel 20.

3.11. Läbilõigete genereerimine

Läbilõige on vaade maapõue sisemisele pinnale. Läbilõiget on võimalik koostada nii punkti, joone kui pinna järgi. Punkti korral selekteeritakse kõik vastava punkti x ja y koordinaatidega kattuvad mudeli piirpinnad ja leitakse nende z koordinaadi väärtus punkti kohal. Pinnad järjestatakse z koordinaadi väärtuse alusel ning koostatakse geoloogiline tulp.

Kui läbilõike koostamise aluseks on joon, siis genereeritakse esmalt seda joont järgiv vertikaalne pind. Järgmiseks selekteeritakse kõik piirpinnad, mis saadud pinnaga lõikuvad ning arvutatakse ka lõikejooned. Et *ESRI* platvormil ei ole võimalik kujutada täiesti vertikaalset pinda, tuleb lõikejoonte leidmine läbi viia algse joone baasil. Selleks leitakse piirpinna kõrguse väärtused kõikides algjoone käänupunktides ning algjoone ja piirpinna triangulatsiooniservade lõikumise kohtades (joon projitseeritakse pinnale). Saadud lõikejoonte juures säilitatakse lõikunud piirpinna atribuudid pealpool ja allpool asetsevate settekehade kohta. Settekeha piiride kujutamisel läbilõikel selekteeritakse leitud lõikejoonte seast kõik jooned, mille ükskõik kummal küljel on vastav settekeha, ning moodustatakse neist ala. Nii toimitakse kõigi läbilõikele jäävate settekehadega.

Läbilõige ei pea olema koostatud vertikaalselt. Sama meetodiga saab koostada ka horisontaalseid, vertikaalseid ja ka keerukate kujudega (kumeraid) läbilõikeid. Sellistel juhtudel tuleb soovitud lõike pind kirjeldadagi pinnana ning lõikejooned arvutatakse pindade lõikumise järgi. Keerukamate lõikepindade korral tuleb läbilõike joonise koostamisel arvestada ka lõikepinna kulgu.

Parema orienteerumise huvides saab läbilõikele kanda mitmesugust lisa-informatsiooni, nt läbilõikelasuvate andmepunktide asukohad, nende nimed, kohanimed jne. Geoloogilise kaardistamise juures on traditsioonilised puuraukudevahelised vertikaalsed läbilõiked. Puuraukude asukoha kajastamine aitab läbilõikel paremini orienteeruda. Lisaks aitab see ka hinnata läbilõike täpsust. Vertikaalsel läbilõikel on lisaks puuraugu asukohale võimalik kajastada ka puuraugu sügavust. Horisontaalsetel ja muu kujuga läbilõigetel tuleb piirduda asukohaga.

3.12. 2D kaartide genereerimine

Kahemõõtmeliste kaartide genereerimine kolmemõõtmelise mudeli põhjal automatiseeritakse. Paralleelselt 3D mudeliga säilitatakse samas andmebaasis ka 2D kaartide nähtusklasse. Muudatusi 2D nähtusklassidesse ei viida sisse jooksvalt, vaid pärast mõne piirkonna modelleerimise lõpetamist. Jooksvalt säilitatakse infot piirkondade kohta, kus 3D mudelis muudatusi on tehtud ning 2D kaartide uuendamisel genereeritakse uued kaardid vaid neis piirkondades, viies vastavatesse 2D kaardi nähtustesse sisse parandusi. *ArcGIS* võimaldab joonte ja alade käanupunktidele salvestada ka z koordinaadi väärtuse. Kuivõrd z väärtus mudeli põhjal juba olemas on, siis säilitatakse see ka 2D kaardi nähtuste juures.

Aluspõhja avamuste 2D teemakihi loomiseks tuleb mudelist selekteerida kõik sellised piirpinnad, mille ühel küljel on aluspõhja ja teisel küljel pinnakatte settekeha või „õhk“. Selekteeritud pindade lõikepolügoonide projitseerimisel x;y tasapinnale saamegi aluspõhja kivimite avamuse kaardi. Et 2D kaardiaknas toimub see projitseerimine automaatselt, siis ei olegi vaja teha rohkem, kui iga selekteeritud pinna lõikepolügoon koos pinna alla jääva aluspõhja settekeha koodiga vastavasse nähtusklassi kopeerida. Täpselt samasuguse skeemi alusel on võimalik koostada ka pinnakatte settekehade avamuste kaart. Erinevuseks on ainult see, et selekteerida tuleb kõik sellised pinnad, mille pealmine keha on „õhk“. Kuna külgnevad avamused (lõikepolügoonid) on

koostatud sama lõikejoone alusel, siis on nende ühine külg ja selle käänupunktid identsed ning saadud avamuste kaardid on topoloogiliselt korrektsed.

Hüdrogeoloogilisel kaardil kajastatavad veekihi on määratavad keha veekompleksi ja veeandvuse alusel. Teemakihi koostamiseks selekteeritakse mudelist aluspõhja reljeefi kajastavad pinnad, juhendiga määratud kohtades asendatakse pinnad kvaternaari veekompleksi lasuvat pinda kajastavate piirpindadega ning määratakse iga piirpinna alla jääva keha atribuutide järgi vastava ala veekiht. Veekomplekside survetasemed kujutatakse 3D keskkonnas iseseisvate pindadena, mille alusel saab kergesti luua samajooned (hüdroisohüpsid). Samamoodi saab luua ka samamineraalsusjooned.

Tabel 1. Põhjavee kaitstuse kaudne hindamine pinnakatte paksuse ja muude põhjavee looduslikku kaitstust mõjutavate tegurite alusel (Maa-amet 2007a).

KLASS	Põhjavee kaitstuse klassi üheselt määravad geoloogilised nähtusklassid			Klasside levikut korrigeerivad geoloogilised nähtusklassid	
	Pinnakatte paksus (m), litoloogia				
	Moreen, aleuriit või saviliiv	Savi või liivsavi		+ 1 klass (kaitstuse poole)	- 1 klass (kaitsmatuse poole)
Kaitmata	<2	Pole	Alvar, karstiaala, aluspõhja lõikuv vooluveekogu	➤ Savi või liivsavi esinemine kvaternaariset etes	-
Nõrgalt kaitstud	2...10	< 2		➤ Savi lamamiga sood	➤ Karstilehter/alang alvari lähedal
Keskmiselt kaitstud	10...20	2...5	aluspõhjalised veepidemed paksusega >2 m, tasakaalualad	➤ Tõusuallikate olemasolu	➤ Glatsifluviaalsed setted aluspõhjal
Suhteliselt kaitstud	20...50	5...10	Põhjavee ülevoolu piirkonnad	➤ Tüseda (>1 m) järvelubja kihi või järvemuda esinemine	➤ Rikutud põhjavee-režiimiga alad
Kaitstud	>50	>10	Regionaalsed veepidemed	-	➤ Poorsete kivimite põhjaveekiht
					➤ Purdsetetega täitunud mattunud org aluspõhjas
					➤ Aluspõhja kivimeid avavad magistraalkraavid , vooluveekogude orundid

Põhjavee kaitstuse kaart koostatakse mitme teise teemakaardi alusel ning põhjavee kaitstuse (PVK) klassi määramisel osalevad mitmed nähtused, mida on võimalik jaotada PVK klassi otseselt määravateks ja seda mõjutavateks (Tabel 1). Oluline roll on aluspõhja veekihi kohal asetsevate pinnakatte settekehade litoloogilistel tüüpidel ja

paksusel. Esmalt luuakse põhjavee kaitstuse klassi otseselt määravate ja nõ pidevate nähtuste põhjal pind, mille z väärtused kajastavad kaitstuse klassi (1 – kaitsmata, 2 – nõrgalt kaitstud jne) vastavas kohas. Korregeerivate nähtuste olemasolul tehakse pinnale vastavad korrektuurid (vähendatakse või suurendatakse z väärtust 1 võrra). Viimaks genereeritakse pinnast klassi piiride kohale samajooned ning luuakse nende alusel alad.

Maavarade ja geomorfoloogia teemakaartide nähtused on infomudeli järgi kujutatud eraldiseisvate nähtuste abil, mis võivad olla seotud mõne 3D mudeli keha, pinna või lõikejoonega. Need ja ka paljud teiste teemakaartide nähtused, mis on kujutatud sarnasel viisil, ei vaja 2D kaardil kujutamiseks lisatöötlust. 3D mudeliga seotud nähtuste juures võib vaid vajalikuks osutuda kontroll, kas 3D objekt, millega nähtus on seotud, ei ole vahepeal muutunud. Selleks lisatakse kõikidele objektidele ja nähtustele **TIMESTAMP** (ajatempel) – väli, mille väärtust uuendatakse iga kord, kui vastav objekt või nähtus üle kirjutatakse. Sama välja kasutab ka Maa-ameti avaliku teenuse kaardiserver andmete puhverdamise korraldamisel.

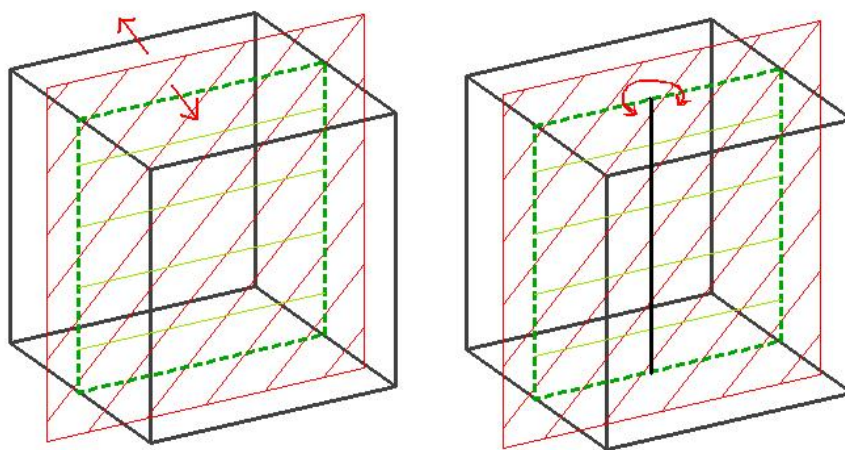
Mitmesugused samajoonte kaardid (aluspõhja reljeef, pinnakatte paksus, geofüüsikalised kaardid) genereeritakse vastavate pindade põhjal. Geofüüsikaliste kaartide puhul luuakse vastav pind interpoleerimise teel. Interpoleerimise meetod ja selle parameetrid on määratud juhendi seletuskirjas. Aluspõhja reljeefi pinda koostatakse kõigist piirpindadest, mis osalevad ka aluspõhja avamuste kaardi koostamisel. Oluline on tähelepanu pöörata, et ei kasutatakse esialgset mudelisse sisestatud aluspõhja reljeefi pinda, sest see võib kohati olla maapinda kujutava piirpinna poolt kärbitud. Pinnakatte paksuse saamiseks tuleb mudelist leida aluspõhja reljeefi ja maapinna reljeefi pinnad ning arvutada nende vahe. Sarnasel viisil on võimalik leida kõikide settekehade paksusi, tuleb vastava keha lasuvast pinnast lahutada sama pinna lamav pind. Pindadevahelistel tehetel tehakse arvutusi z koordinaadi väärtustega.

3.13. 3D vaate loomine

Kindla homogeense keha kujutamiseks kolmemõõtmelisel vaatel selekteeritakse kõik seda keha piiravad piirpinnad ning joonistatakse need vastavat keha iseloomustava värvi ja mustriga. Mingi piirkonna kogu mudeli kujutamiseks ei ole vaja eraldi selekteerimist läbi viia. Kuvatakse kõik pinnad, mis tähistavad mudelis vaadeldava

atribuudi muutust. Pinna kumbki külg kuvatakse vastaskülje atribuudile vastava värvi ja mustriga. Sellisel viisil on vaatajale, ükskõik kummalt poolt ta pinda näeb, näha selle keha atribuudid, mis vaadeldavast pinnast algab (lähtudes vaatajast).

Ainult piirpindade kuvamine jätab maapõue mudeli nõ tühjaks. Mudelist on võimalik pindade vahelt läbi vaadata. Mahulise ja täidetud mudeli efekti loomiseks joonistatakse vaadeldava ala servad kinni. Selleks moodustatakse piki vaadeldava ala piiri läbilõige ning kuvatakse see koos piirpindadega. Servade kinni joonistamisel võib töökiiruse suurendamiseks jätta mudeli sisesed pinnad joonistamata. Vajalikud on vaid pealmised ja alumised pinnad. Alles tuleb jätta ka võimalus serva läbilõiget tervenisti või osaliselt välja lülitada, võimaldamaks vaadata „mudeli sisse“, kihtide vahele.



Joonis 21. 3D vaate lõikepind ja selle liigutamine

Kuvatud pindu on võimalik vaadelda kasutades kõiki *ArcScene* rakenduse navigatsioonivahendeid. Võimaldamaks mudeli kasutajal tungida ka vaadeldava mudeli osa sisemusse, võetakse vaate juures kasutusele eraldi lõikepind, mida on võimalik liigutada vaatajast kaugemale ja lähemale. Lõikepinna kohale luuakse ja kuvatakse läbilõige ning lõikepinnast vaataja poole jäävat mudeli osa ei kuvata. Lisaks lõikepinna eemale ja lähemale nihutamisele on võimalik lõikepinda pöörata (Joonis 21). Lihtsama tehnoloogilise lahenduse tõttu (*OpenGL view plane* kasutades) jääb küll lõikepind ise paigale, aga pööratakse kogu mudelit selle taga. Nii on näiteks võimalik uue puursüdamiku andmete mudelisse lisamisel vaadelda andmete mudeliga sobivust vastava puuraugu asukohast kõikides suundades kulgevate läbilõigete peal. Sellisel juhul asetatakse lõikepind selliselt, et see läbiks puuraugu asukohta ning pööratakse mudelit ümber puuraugu asukoha.

3.14. ArcScene'i laiendus

Andmebaasis salvestatud nähtusi on võimalik vaadelda ja töödelda kõikide ArcGIS keskkonna töövahenditega. Erinevate nähtuste omavahelise kokkusobivuse ja meta-andmete haldamise huvides tuleb vähemalt muudatuste tegemisel kasutada spetsiaalseid töövahendeid ja funktsioone. Ka mudeli kuvamine on erivahendite abil tunduvalt lihtsam. Kõik keskkonna kasutamiseks vajalikud vahendid koondatakse ühisesse laiendusse (*extension*). Kõik vahendid programmeeritakse C++ programmeerimiskeeles. Võimalikult palju kasutatakse ära ArcGIS keskkonna olemasolevaid lahendusi – laiendatakse olemasolevaid objekte ja kasutatakse töövahendeid.

Terrain andmetüüpi oskavad ArcGIS paketi vaikimisi kuvada vaid ArcMap (kahemõõtmeline) ja ArcGlobe (globaalne 3D vaade) rakendused. Maapõue mudeli kuvamiseks on sobivaim aga ArcScene (lokaalne 3D vaade). Lisaks ei oska ArcGIS vaikimisi ei *terrain* ega TIN mudeli külgi erinevate värvidega kuvada nagu piirpindade esitamisel vaja on. Nähtusklasside ja mudelite kuvamine ArcGIS rakendustes on kihtide (*layer*) põhine. Seega on vajalik uue ArcScene kihi loomine, mis oskab lugeda *terrain* andmetüüpi ning pinna mudeli külgi kujutada erineva värvi ja tekstuuriga. Seda kihti kujutav klass kajastab ka kõiki pinna atribuute ning omab funktsioone nende muutmiseks ning muudatuste kajastamiseks andmebaasis.

Kõik rakenduses avatud kihid loetletakse sisukorras (*TOC – Table of Content*), kus tavaliselt on võimalik ka kihi kuvamiseks kasutatavaid värve ja sümboleid muuta. Piirpindade puhul seda ei lubata, et mitte tekitada olukorda, kus sama keha piiravad pinnad on erinevat värvi. Kivimkehade värvi ja tekstuuri muutmiseks ning soovi korral agregeerimiseks laiendatakse ArcScene dokumendi sisukord uue lehega, kus loetletakse kõik mudelis esinevad homogeensed kehad. Selle abil on võimalik muuta iga keha kujutamiseviisi ning stratigraafilise üksuse alusel kehasid agregeerida. Vaikimisi värvid ja tekstuurid loetakse geoloogilist süntaksit kujutavast tabelist, kus need on kirjeldatud iga stratigraafilise üksuse atribuudina. Sama tabeli alusel genereeritakse agregeerimise tarbeks stratigraafilise skeemi tasemeid järgiv puu-struktuur. Keha esitusviisi muutmisel muudab kivimkehade loetelu kajastav klass automaatselt kõikide vastavat keha piiravate pindade värvi või tekstuuri. Kehade agregeerimisel lülitatakse automaatselt kõik tekkinud homogeense keha sisse jäävad pinnad välja ning muudetakse seda piiravate pindade esitusviis uuele kehale vastavaks.

Uue kiht tüüpi klassina tuleb laienduses kujutada ka kõik läbilõiked, kasutaja poolt määratud läbilõigete seas ka valitud uuringuala serv ja lõikepind. Pärast kivimkeha esitusviisi muutmist või kehade agregeerimist kohandatakse ka kõik kuvatud läbilõiked vastavalt muudatusele ümber. Läbilõigete kihil on vastavalt sellele, kas joonistatakse kolmemõõtmelisele vaatele või kahemõõtmelisele vaatele, erinevad joonistamise funktsioonid. Kolmemõõtmelisse vaatesse joonistatakse läbilõige sinna, kus ta mudelis asub, kahemõõtmelise vaate korral aga arvutatakse kõik koordinaadid ümber selliselt, et läbilõige oleks $x;y$ tasapinnal. Sealjuures läbilõige ei projitseerita tasapinnale vaid nõ tõmmatakse sirgu.

Lisaks kolmele kirjeldatud objektiklassile tuleb koostada mitmeid töövahendeid, teiste seas nt kahemõõtmeliste kaartide genereerimiseks, puursüdamike andmete lisamiseks, kehade atribuutide pärimiseks ja muutmiseks jne. Kõik mudeliga seotud töövahendid koondatakse ühise menüü või tööriistakasti sisse. Käesoleva töö maht ei võimalda neid kõiki detailselt kirjeldada.

4. Arutelu

Kolmemõõtmeline modelleerimiskeskond maapõue modelleerimiseks ja geoloogiliste kaartide tootmiseks on suur samm edasi geoloogilise kaardistamise arengus. Kolmemõõtmelisi maapõue mudeleid toodetakse juba mõnda aega mujalgi maailmas. Peamiselt mõne kindla, tihti tööstusliku projekti raames. Autorile pole teada, et 3D maapõue mudelit oleks varem kasutatud geoloogilise kaardistamise juures. Valdavalt on olemasolevaid geoloogilisi kaarte kasutatud hoopis 3D modelleerimisel. Suurbritannias, kus on kahemõõtmelise kaardiga kogu riik juba kaetud, on alustatud üleriigilise 3D mudeli koostamist. Autori hinnangul taanduvad 2D geoloogilised kaardid tulevikus 3D mudelite ees. Eestis, kus 1:50 000 kahemõõtmeline kaardistamine on suhteliselt algusjärgus, oleks mõistlik seetõttu panustada 3D mudeli loomisele. 2D kaardid, millega paljud kasutajad on harjunud, on 3D mudeli põhjal kergesti genereeritavad.

Senised maapõue modelleerimise keskkonnad on valdavalt suunitlusega olemasolevate kaartide ja andmete põhjal mingi kindla projekti jaoks maapõue mudelit koostada. Käesolevas töös välja pakutud keskkond soodustab mudeli kasutuse käigus täiendamist. Mudelis osalevate pindade lõikumisel säilitatakse seos tekkivate pinna osade vahel ja “maha lõigatud” pinna osasid ei kustutata, vaid need säilitatakse väljaspool pinna lõikepolügooni. Pindade lõikumiste juures säilitatakse informatsioon atribuutide levimise kohta, seetõttu on kehade atribuutide muutmisel tagatud, et kõikide seotud pindade atribuudid muudetakse korrektselt.

Väljatöötatud modelleerimise keskkond võimaldab stratigraafiliste üksuste põhist kivimkehade agregeerimist ja mudeli generaliseerimist. Settekeha suhtelist vanust ja struktuur-fatsiaalset võõndit iseloomustavate alade põhjal on võimalik kergesti määrata üksuste omavahelisi seoseid. Lisaks agregeerimisele on samade alade põhjal võimalik määrata, millised madalamad üksused kivimkeha sisse kuuluvad. Viimane on vajalik varasemate puursüdamike andmete kasutamisel, kus esineb mitmeid mudelis eraldatud settekehi hõlmavaid kirjeldusi.

Käesolev töö paneb paika vaid rajatava 3D keskkonna põhialused. Piiralade esitusmudel *ArcGIS* platvormil ning agregeeritav geoloogiline süntaks on neist peamised. Mitmed keskkonna ja selles modelleeritava mudeliga seotud teemad

väärivad omaette uurimistööd ning seetõttu on neid teemasid käsitletud suhteliselt ülevaatlikult. Seega pakub töö laia valiku teemasid edasisteks töödeks.

Esiteks tuleb detailselt üle vaadata ja täpsustada 3D maapõue mudeli info- ja andmemudelid. Käesolev töö toob välja põhilised klassid ja nende omavahelised seosed, kuid jätab lahtiseks paljud konkreetsed nähtused ja nendega seotavad atribuudid. Kõik senise juhendi nähtused tuleb info ja andmemudelis täpselt määratleda ning analüüsida võimalike uute nähtusklasside lisamise vajadust.

Teiseks tuleb välja töötada kõikides tarkvara klassides ja töövahendites kasutatavad funktsioonid ja nende funktsioonide algoritmid. Ka tarkvara struktuur (klassid ja nendevahelised seosed) täpsustub seeläbi. Näiteks vajavad täpsustamist küsimused, kuidas leitakse pindade lõikejooned, kuidas koostab programm läbilõikeid, kuidas rakenduse siseselt andmeid hallatakse jne. Osaliselt on selliseid täpsustavaid uurimistöid juba tehtud. Näiteks on avaldamisel artikkel samajoonte alusel moodustatud pindades tasaste terrasside vältimisest valitud skeletipunktide lisamisega (Pruulmann, 2007).

Kuna väljatöötatud keskkond pole veel valmis, siis on raske hinnata, kas see ka toimib. Autor ei näe vähemalt aluspõhja kivimite kujutamisel probleeme. Aluspõhja kivimid lasuvad suhteliselt ühtlaste kihtidena, neid lõikava aluspõhja reljeefi pinna kohta on olemas suhteliselt palju andmeid. Raskem on olukord pinnakattega, mille ehitus on märksa keerulisem. Ka hüdrogeoloogiliste nähtuste kujutamise osas on mitmeid lahtisi otsi. Mudel aluspõhja kivimkehadega ja kvaternaari osas agregeeritud settekehaga on aga kindlasti toimiv ning vähemalt selles mahus tuleb kasutusele võtta. Selle alusel on võimalik luua ka aluspõhja avamuste, aluspõhja reljeefi ja pinnakatte paksuse kaarte. Autori hinnangul vähendab 3D mudeli kasutuselevõtt nende teemakaartide valmistamise töömahtu, muutes kaardistamise kiiremaks ja odavamaks. Täpsus ja teemakaartide kokkusobivus sealjuures suurenevad. Pinnakatte settekehade ja hüdrogeoloogiliste atribuutide modelleerimise kasuteguri osas nii kindel olla ei saa ning keskkonna valmimise järel on võimalik seda uurida.

5. Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärkideks oli põhjendada 3D maapõue mudeli kasutuselevõtu otstarbekust geoloogilise kaardistamise juures, anda ülevaade maapõue 3D modelleerimise põhimõtetest, võimalustest, varasematest töödest sellel teemal ja muu maailma kogemusest ning töötada välja keskkond Eesti maapõue 3D modelleerimiseks ja mudeli säilitamiseks.

Esimese eesmärgi täitmisest saab ülevaate juba sissejuhatavas peatükis, kuid ka teistes peatükkides tuuakse välja uusi põhjusi. Kolmemõõtmeline maapõue mudel tagab geoloogiliste teemakaartide kompleksuse, kiirendab teemakaartide valmistamist ja uuendamist, võimaldab lihtsasti luua uusi teemakaarte ja annab uusi ja efektiivseid võimalusi geoloogiliste nähtuste visualiseerimisel. Lahendatakse ka praeguse kahemõõtmelise kaardistuse tehnoloogilise skeemi probleemid, kus erinevatel kaardilehtedel on kivimkehad agregeeritud erinevalt ning trükikaart on kaardistamise vaheetapp, mitte lõpp-produkt.

Teine peatükk refereerib varasemaid samalaadseid ja teemaga seotud töid, keskendudes töö teisele eesmärgile. Kirjeldatakse erinevaid 3D mudelite kujutamise viise: võremudelit, rakk-mudelit ja topoloogilist piiralade esitust. Kõigil neist on maapõue mudeli seisukohast omad plussid ja miinused. Võremudel on sobivaim maapõuesiseste protsesside (parameetrite muutumise) simuleerimisel, rakkmudel aga maapõue moondumisega (kehade kuju muutumisega) seotud protsesside simuleerimisel. Modelleerimiseks on sobivaim topoloogiline piiralade mudel, mis hiljem Eesti maapõue mudeli tarbeks ka kasutusele võetakse. Tutvustatakse maapõue modelleerimise meetodit ning selle jaoks vajalikku geoloogilise süntaksi kirjeldamist. Ülevaade antakse olemasolevatest maapõue modelleerimise tarkvaradest ning teiste riikide praktikast 3D modelleerimisel. Kõige kaugemale on 3D mudelitega jõudnud Suurbritannia, kes kasutab ka mitut võimekat kommertstarkvara, teiste hulgas *Earth Decision Suite (gOcad)* ja *GSI3D*. Suurbritannia kogemuse kasutamine Eestis eeldab aga ressursi, mida Eesti riigil hetkel kasutada ei ole.

Kolmandas peatükis täidetakse töö peamine eesmärk, töötada välja keskkond Eesti maapõue 3D modelleerimiseks ja mudeli haldamiseks. Selleks määratakse keskkonnale esitatavad nõuded ja kohandatakse geoloogilise kaardi infomudel kolmemõõtmelisele mudelile vastavaks. Mitme nõude täitmiseks rajatakse keskkond *ESRI ArcGIS*

platvormile. Kirjeldatakse piiralade mudeli *terrain* andmetüübil põhinev andmemudel. Suurt tähelepanu on pööratud sellele, et maapõue mudel oleks kergesti muudetav. Geoloogilise süntaksi kirjeldamiseks pakutakse tavapärase graafi asemel alasid kahemõõtmelises ruumiandmete tabelis, kus ühel teljel kajastatakse kivimkehade suhtelist vanust ning teisel struktuur-fatsiaalseid vööndeid. Sellises tabelis on võimalik kirjeldada mitut kaardistatavat üksust hõlmavaid kõrgemaid üksusi ja vahemikke ja võimaldada kivimkehade automaatset agregeerimist. Kirjeldatakse mitmeid töökäike ja põhimõtteid mudeli loomisel, redigeerimisel ja kasutamisel. Täpsed algoritmid jäävad antud töö raamidest välja.

Käesolev töö täidab sellele seatud eesmärgid. Edasi on antud kavandatava keskkonna põhiomadused ja määratletud järgneva tegevuse suunad. Keskkonna valmimine ja kasutuselevõtt eeldab veel palju tööd, kuid käesoleva töö põhjal võib arvata, et see on reaalne ja viib Eesti geoloogilised kaardid uuele tasemele.

6. Summary

The framework for 3D geological model of Estonia

The 1:50000 scale digital geological mapping of Estonia is in the beginning. So far, less than 10 % of the country is mapped and digitized. The map set includes 10 thematic maps. Countries, where geological mapping is finished are working on the three-dimensional (3D) subsurface models. The computing power is increasing rapidly and already able to handle large 3D models. It is obvious that 3D models represent and explain the construction of the subsurface better than two-dimensional maps. In addition, the current map set can be automatically generated from the 3D model. Therefore, it is reasonable to start producing a 3D model instead of the 2D map set. The purpose of the thesis is to explain the advantages of 3D modeling, review the methods and practice of the subject and work out the basis of the framework for the 3D geological model of Estonia.

The 2D geological map set is complex. Different thematic maps are closely related to each other. The current technique of the mapping is ancient. Each thematic map is handmade and digitized to CAD files on the digitizing table. Attribute values are associated with features later. This means that the connection between different thematic maps lies in the author's head. Whenever one thematic map changes (because of some new knowledge), all related thematic maps need to be redrawn. Within 3D subsurface model all themes are technically integrated and modifications included once will automatically reflect on every thematic map.

3D model enables several new analyses and features. It includes more information and additional thematic maps can be generated. Automatic cross-sections can be drawn anywhere. Several simulations can be run. The subsurface is a 3D object and therefore is generally understandable on the 3D view. Using 2D map needs additional interpretation to fully understand the subsurface. The advantages of 3D view arise already during the modeling as the model interacts with the modeler in the same 3D space.

Three approaches to solid model representation are presented. In the 3D regular grid the space is divided to voxels. Several properties can be assigned to each voxel. The grid is easy to handle and use but very storage consuming. Cellular model is an irregular grid. This means that in addition to cell properties edges and nodes (the shape

and location) of the cell need to be stored. Cellular model is best for model transformation simulations. Finally, the topological boundary representation (B-Rep) model divides space to homogeneous blocks with boundary surfaces. This is the best model for subsurface modeling as subsurface features are easily definable by surfaces. The model provides the easiest way of 3D visualization, as well. To run simulations, grid and cellular models can be generated.

For subsurface modeling on boundary representation model, the geological syntax (or Geological Evolution Scheme) is needed. The geological syntax describes surfaces and blocks participating in the model. Also relationship between surfaces is defined. This includes rules for surface cutting. If surfaces cross and younger surface represents on lap block, then the younger surface interrupts at the crossing. If the younger surface represents unconformity, then the older surface interrupts.

To achieve integration with other datasets and GIS systems in the company, the framework is designed for the ESRI ArcGIS platform as an extension to the ArcScene application. The B-Rep model is adjusted for ESRI data types. Boundary surfaces are saved as terrains, the new data type included from ArcGIS version 9.2. Terrains enable to extend B-Rep model. Terrains enable to store data points outside the terrain data area and therefore store surface trends beyond clip polygon. If the intersecting surface is modified and new intersection is apart from the previous clip, then the trend outside the clip is accounted. Other aspects of the model are designed to predispose model changes and later enhancement. Even the initial modeling is conceptualized as enhancing. At first, a rough model based on sparse data is created. New data points of the drill cores' data and modeler interpretation are then included to detail the model.

The geological syntax is proposed to describe as a 2D feature class with polygon type geometries instead of a usual graph representation. In the 2D space, one dimension describes time (the relative age of units) and another dimension describes different lithofacies. Each settlement unit can be described as an area in this feature class. Its name and other properties can be added as attributes. According to the time dimension, it is possible to define older and younger surfaces. Larger units, that aggregate several modeled units, can also be described. In this case, the polygon in the feature class entirely covers all the polygons of the units it includes. This enables sensible block aggregation in the model. This helps to manage model generalization.

In the thesis only principal ideas and the structure of the framework are described. Attributes of several geological features and detailed algorithms of functions and procedures will be specified in the future work. As there are several unspecified details, the framework is not yet realized and the result is difficult to estimate. The Estonian subsurface is relatively simply structured, especially the bedrock, and the author is positive, that the proposed framework is successful. Using the 3D model will speed up the process of mapping. The result will be more accurate and different thematic maps will be better integrated.

7. Kasutatud materjalid

- Apel M. 2004 A 3d geoscience information system framework. Doctoral dissertation. Freiberg 2004. 103 p.
- Arens C., Stoter J., Oosterom P. 2005 Modelling 3D spatial objects in a geo-DBMS using a 3D primitive. *Computers & Geosciences* 31 (2005) 165-177. Elsevier Press.
- Botsch M., Pauly M., Rossi C., Bischoff S., Kobbelt L. 2006 Geometric modelling based on triangle meshes. *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM SIGGRAPH 2006 Courses*. Boston
- Bloomenthal J. 1995 Skeletal Design of Natural Forms. Ph.D. Dissertation. The University of Calgary, Alberta, 1995.
- Brandel S., Schneider S., Perrin M., Guiard N., Rainaud J.F., Lienhardt P. and Betrand Y. 2004 Automatic Building of Structured Geological Models. *ACM symposium on Solid and Physical Modeling. Proceedings of the ninth ACM symposium on Solid modelling and applications* p 59-69. Genoa, Italy. Eurographics Association, 2004.
- Date C. J. 2004 *An Introduction to Database Systems* 8th Ed. Addison-Wesley, 2004. 983 lk.
- ESRI 2006 ArcGIS Desktop Help. Environmental Research Institute 1999-2006.
- Fernandez O., Munoz J.A., Arbues P., Falivene O. and Marzo M. 2004 Three-dimensional reconstruction of geological surfaces: An example of growth strata and turbidite systems from the Ainsa basin (Pyrenees, Spain). *AAPG Bulletin*, v 88, No 8 (August 2004), pp 1049-1068.
- Ford A. 2007 Visualizing Integrated Three-Dimensional Datasets. *Modeling data in the geodatabase using multipatch features. ArcUser* January - March 2007 pp 15 - 19.
- Gong J., Cheng P., Wang Y. 2004 Three-dimensional modelling and application in geological exploration engineering. *Computers & Geosciences* 30 (2004) 391 – 404. Elsevier Press.
- Hansen H.O., Christensen N.J. 1993 A Model for n-Dimensional boundary Topology. *Proceedings on the second ACM symposium on Solid modelling and applications SMA '93* pp 65-73. ACM Press
- Lee S.H., Lee K. 2001 Partial entity structure: a compact non-manifold boundary representation based on partial topological entities. *Proceedings of the sixth ACM symposium on Solid modelling and applications* p159-170. Michigan, United States 2001.
- Mallet J.-L. 2002 *Geomodeling*. Oxford University Press, 2002. 599 lk.

- Pruulmann, O. 2007. Supplementing contour-based TIN surface models with selected skeleton points. - In: Strobl, J. & Car, A. (Hrsg.) Angewandte Geographische Informationverarbeitung XIX. Beiträge zum AGIT-Symposium. H. Wichmann Verlag, Heidelberg (in press).
- Raukas A., Teedumäe A. 1997 Geology and Mineral Resources of Estonia. Teaduste Akadeemia Kirjastus, 1997. 436 lk.
- RockWare 2006 RockWorks v.2006 User Manual. RockWare Earth Science & GIS Software. Golden, CO, USA, 2006. 310 lk.
- Santi M.R., Campos J.L.E., Martha L.F. 2003 3D Geological Restoration using a Finite Element Approach. Proceedings of 23rd GOCAD Meeting 2003, Nancy, France, Jun. 2003, pp. 1-12.
- Smith I. F. 2005 Digital Geoscience Spatial Model Project Final Report. British Geological Survey Occasional Publication, No. 9. 56 lk.
- Sprague K., de Kemp E., Wong W., McGaughey J., Perron G., Barrie T. 2006 Spatial targeting using queries in a 3-D GIS environment with application to mineral exploration. Computers & Geosciences 32 (2006) , 396 – 418. Elsevier Press.
- St John M., Cowen M.B., Smallman H.S., Oonk H.M. 2001 The use of 2D and 3D displays for shape-understanding versus relative-position tasks. Human Factors, 43, 1 (2001), 79-98.
- Zlatanova S., Rahman A.A., Shi W. 2003 Topological models and frameworks for 3D spatial objects. Computers & Geosciences 30 (2004) 419 – 428. Elsevier Press.
- Tory M., Moller T., Stella Atkins M., Kirkpatrick A.E. 2004 Combining 2D and 3D views for orientation and relative position tasks, Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, p.73-80, April 24-29, 2004, Vienna, Austria
- Ware J.M. and Jones C.B. 1997 A data model for representing geological surfaces. Proceedings of the 5th ACM international workshop on Advances in geographic information systems. pp 20-23. ACM Press, New York 1997.
- Weiler K. 1988 The radial edge structure: a topological representation for non-manifold geometric boundary modelling. Geometric Modeling for CAD Applications p 3-36. Elsevier Science Publish 1988.
- Wu L.X. 2004 Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modelling system. Computers & Geosciences 30 (2004) 405 – 418. Elsevier Press 2004.

Interneti viited:

- http1: 3D Geological Mapping the BRGM Experience (France)
<http://3dweg.brgm.fr/Models/index.html> [25.04.2007]
- http2: 3D geological Surface Construction (Oscar Fernandez and Josep Anton Munoz)
<http://www.ub.es/ggac/research/3d/3d.htm#algo> [9.04.2007]

- http3: British Geological Survey <http://www.bgs.ac.uk/> [25.04.2007]
- http4: Gocad Consortium <http://www.gocad.org> [23.04.2007]
- http5: Interactive 3D Models. Geoscience Australia. <http://www.ga.gov.au/map/web3d/> [25.04.2007]
- http6: Lithosphere – applied 3D geological surveying. <http://www.lithosphere.de/> [23.04.2007]
- http7: Maa-amet <http://www.maaamet.ee> [19.03.2007]
- http8: A History of Volumetric Imaging http://www.holoverse.com/3d_history.htm [22.03.2007]
- http9: Directions Magazine
<http://www.directionsmag.com/press.releases/index.php?duty=Show&id=13504&trv=1> [04.04.2007]
- http10: RockWare Inc. <http://www.rockware.com/> [24.04.2007]
- http11: Wikipedia <http://www.wikipedia.org> [23.03.2007]

Käsitõrjalised materjalid:

- Maa-amet 2005 Seletuskiri. Baaskaardi Tartu kaardilehe (5441) faktilise materjal tarbepuurkaevude ja riikliku põhjaveeseire puurkaevude kontroll. Käsitõri Maa-ametis. 18 lk.
- Maa-amet 2007a Eesti geoloogiliseks digitaalkaardistamise (mõõtkavas 1:50000) juhendi seletuskiri. Maa-amet, 2007. 49 lk.
- Maa-amet 2007b Juhend Eesti geoloogiliseks digitaalkaardistamiseks mõõtkavas 1:50000 versioon 1.3. Maa-amet, 2007. 191 lk.
- Pruulmann O. 2005 Eesti 1:50000 geoloogilise kaardi andmebaasi loomine Bakalaureusetõõ geoinformaatikas. Käsitõri TÜ geograafia instituudis. 86 lk.

8. Lisad

8.1. Lisa 1. Andmemudel

