



Enno Reinsalu

EESTI MÄENDUS II

1 mm



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ENERGEETIKATEADUSKOND

Enno Reinsalu

EESTI MÄENDUS II

**Õpik
geotehnoloogia
magistrantidele ja doktorantidele**

Elektroniline teavik



TTÜ mäeinstituut

Korrigeeritud 2019

Õpiku koostamist toetas TTÜ Energia- ja geotehnika doktorikool
Õpiku ilmumist toetasid



Esikaas – Ain Anepaio mikrofoto Piusa klaasiliivast
Tagakaas – Lasnamäe ehituspae kihid Tallinnas Kumu paljandil Laagna teel

Tallinna raamatutrükikoda
Autoriõigus: Enno Reinsalu, 2013, 2019
ISBN 978-9949-430-61-1 (pdf)

Sisukord

1. GEOANALÜÜS	7
1.1. Looduslike objektide mõõtmisest	7
1.1.1. Geoloogilised objektid	7
1.1.2. Geoanalüüsis kasutatavad matemaatilise statistika mõisted	9
Tunnus	9
Valim	10
Peamised statistilised tunnused	10
Näide 1. Valimi statistiliste tunnuste määramine	11
Valimi suurus	12
1.1.3. Looduslike objektide oluline ja mitteoluline erinevus	13
Näide 2. Valimite erinevuse hindamine	14
1.1.4. Erinevuse hindamine dispersioonianalüüsi abil	14
Näide 3. Valimite erinevuse hindamine dispersioonianalüüsi (ANOVA) abil	14
Kokkuvõtte mõõtmistulemuste hindamisest	17
1.2. Jaotuste analüüsimisest	18
1.2.1. Jaotusseadused	18
Näide 4. Metalli sisaldus varuplokis	18
Näide 5. Karstivööndid	19
Näide 6. Kullaotsing	19
1.2.2. Jaotuse analüüsi eesmärk	19
1.2.3. Jaotuse analüüsi lihtsamad meetodid	20
1.3. Andmestiku eelanalüüsist	23
Näide 7. Põlevkivi varuplokkide usaldatavuse analüüs	23
1.4. Purdmaterjali jaotuse analüüs	25
1.4.1. Purdmaterjalid	25
1.4.2. Purdmaterjali tavalised jaotused	27
Astmejaotus	27
Rosini-Rammleri jaotus	28
Logistiline funktsioon	28
1.4.3. Purdmaterjali jaotuse hindamise meetodid	29
Trendline-meetod	29
Solver-meetod	30
1.5. Trendi analüüs	31
1.5.1. Muutlikkus, variatsioon	31
1.5.2. Juhuslikud, süstemaatilised ja regulaarsed nähtused	31
Lineaarne trend	33
mittelineaarne trend	33
1.5.3. Trendi analüüsi lihtsamad võtted	33
Näide 8. Ehitusliiva peensusmooduli muutumise uurimine (trendi analüüs)	34
1.6. Korrelatsioonianalüüs	35
1.6.1. Seos kahe tunnuse vahel	35
osakorrelatsioonikordaja,	36
1.6.2. Korrelatsioonimaatriks	36
Näide 9. Savikivi mikroelementide korrelatsiooni analüüs	36
1.7. Valimite identsuse ja/või erinevuse analüüs	39
Näide 10. Kahe kivikogumi erinevuse analüüs	39
2. MAAVARA UURINGU ALUSED	42
2.1.1. Uuringu põhimõisted	42
Maavara kvaliteeti	42
Maardla kvaliteedi	42
maardla on toode	42
2.1.2. Uuringuala ja -ruum	43
uuringuruum,	44
kompleksmaardla	44
uuringuala,	44
2.1.3. Uuringuluba	44
2.2. Maavara uuringu tööd	45
Välitöö	45
Sisetöö	45
2.2.1. Maa mõõdistamine	46
2.2.2. Proovimine	46
Kaljuste ja poolkaljuste kivimite mõõtmine ja proovimine	46

Erinõuded põlevkivi mõõtmisel ja proovimisel	49
Puistesetete mõõtmine ja proovimine.....	49
Erinõuded turba ja veerikaste setete uurimisel	49
Kiirgushinnang	50
2.2.3. Maapõue häirituse uurimine	50
2.2.4. Hüdrogeoloogiliste ja hüdroloogiliste tingimuste uurimine – veeuring.....	51
2.2.5. Tehniline katsetamine	51
2.2.6. Maavara uuring kaevandamise käigus	52
Õpetlik kogemus maavara varu täpsustamisest.....	54
2.3. Uuringu projekteerimise alused	55
2.3.1. Üldised nõuded maavarale	55
2.3.2. Lihtsad võtted maavara uuringul.....	59
2.3.3. Maardla kvaliteedi tagamine	60
Varu usaldusväärsus	60
Varu kaevandamisväärsus	64
2.3.4. Plokkimine.....	66
2.3.5. Varu arvutamine.....	67
kihindi tootlus	67
tootus lasund, tootus kihind	68
Näide 11. Fosforiidi tootsa kihindi määramine.	69
2.4. Maavara uuringu projekteerimine	70
2.4.1. Mõisted	70
Mõõtmiskoht	70
Mõõtmispunkt	70
Proov	71
Proovimiskoht	71
Proovimispunkt	71
2.4.2. Geoloogilise teabe adresseerimine	71
Traditsioonilised adresseerimismeetodid	72
Geograafilised koordinaatsüsteemid	72
2.4.3. Teabe kodeerimine	72
Teabe kohaldamine ristkoordinaadistikku	73
Mõningad adresseerimise lihtsustused lavamaardlates.....	73
2.4.4. Projekteerimise lähteülesanne.....	74
2.4.5. Projekti koostamine	74
Projekti seletuskiri.....	74
Projekti graafiline osa	74
Projekti tekstilisad.....	75
2.5. Uuringuvõrgu arvutamine.....	75
2.5.1. Mõõtmis- ja proovimiskohad	75
2.5.2. Mõõtmis- ja proovimispunktide arvutamise meetodika.....	76
Näide 12. Mõõtmispunktide arvu määramisest proovimise meetodil	77
2.5.3. Mõõtmis- ja proovimiskohtade optimaalne paiknemine.....	77
Mõõtmis- ja proovimispunktide tihedus	77
Varuploki optimaalne suurus lavamaardlas.....	78
2.5.4. Uuringuvõrgu orienteerimine	81
Trendi tüüp ja tunnused.....	81
Näide 13. Uuringuvõrgu arvutamine Ida-Kabala fosforiidialal	82
2.5.5. Uuringuala valimine	83
2.6. Uuringu aruanne	84
2.6.1. Aruande sisu	84
2.6.2. Aruande tekstilisad:	84
2.6.3. Aruande graafilised lisad:	84
3. MÄENDUSANALÜÜS	85
3.1. Analüüs kui loomingu protsess.....	85
3.1.1. Põhimõisted	85
Analüüs.....	85
Süntees.....	85
Mäendusanalüüsi objektid	85
3.1.2. Loomingulise ülesande kavandamine	85
Probleemi sisse elamine.....	85
Küsimustiku koostamine	86
Eraldumine ehk haudumine	86

Õpetlik lugu sunderaldumisest	86
Probleemi teadvustamine	86
3.1.3. Tegevuskava koostamine	87
Eesmärk.....	87
tööhüpotees,	87
vastandhüpotees.	88
3.1.4. Urimisülesanded	88
3.1.5. Metoodika ja ajakava	88
Metoodika	88
Info kogumine ja hoidmine.....	89
Õpetlik lugu pealiskaudsest välitööst.....	90
3.2. Analüüsi meetodid.....	90
3.2.1. Andmete töötlemise põhitõed	90
uurimismeetodid	90
Andmete töötlemise eesmärk	90
Analüüsi esmane eesmärk	90
Uuringuala hindamine	91
teoreetiline mudel.	91
3.2.2. Lihtsad mudelid.....	92
Lineaarne mudel.....	92
küsimusi enesekontrolliks	92
pöördlineaarne mudel.....	93
EkspONENTmudel.....	93
Astmemudel.....	93
Küsimusi enesekontrolliks	93
3.2.3. Lihtsate mudelite lihtsad graafikud	94
3.2.4. Näiteid mudelite kasutamisest.....	95
Pöördlineaarne mudel – lõhkeaine erikulu	95
Neli mudelit kambriplokkide varingu ennustamiseks	96
Näide 14. Kambriteplokki varinguhetke prognoosimine logistilise funktsiooniga.....	98
Näide 15. Maapinna vajumiskõvera kirjeldamine logistilise funktsiooniga	100
Näide 16. Lineaarne mudel - kaevandustest pumbatava vee päritolu	100
Näide 17. Kaks eksponentmudelit suletud kaevanduse vee isepuhastumise kirjeldamiseks ..	101
3.2.5. Monte-Carlo meetod.....	103
Olemus – juhuslikkuse modelleerimine	103
Näide 18. Suletud naaberkaevandusest sisse tungiva vee koguse hindamine Monte-Carlo meetodiga	103
3.3. Optimeerimine kui analüüs	107
3.3.1. Ühe argumendiga mudeli optimeerimine.....	107
3.3.2. Lineaarplaneerimine	108
Näide 19. Tudengi toiduratsiooni optimeerimine	108
3.3.3. Optimeerimine proovimise meetodil	109
Näide 20. Põlevkivikihi optimaalse väljamise valimine	109
3.3.4. Optimeerimise kogemus	110

Saateks

See maapõueinseneride õpik kasvas välja TTÜ energeetikateaduskonna doktorikooli õppematerjalist, mis ilmus veebikeskkonnas juba 2007. a. Käesolev üllitis on selle arendus värskete faktide ja arenenud tausta valguses. Esimese digiteaviku lisaks olnud harjutusülesanded on siin trükises asendatud näidetega, mistõttu õpiku kasutamine on muutunud lihtsamaks.

Endiselt sisaldab õpik kolme suhteliselt iseseisvat, metodoloogiliselt sarnast osa:

Geoanalüüs – algõpetus maa ja maapõue elementide mõõtmisest ning mõõtetulemuste interpreteerimisest. Selle õpetuse juured on geostatistikas, mille nüüdisaegsed arengud on siirdunud laiemasse maateadusse ja kartograafiasse. Geoanalüüs kuulub geotehnoloogiasse, on mäetehnika rakendusgeoloogia vahend. Siin esitatu annab ülevaate ja algteadmisi eeskätt looduslike mineraalsete objektide mõõtmise ja mõõtmistulemuste käitlemise lihtsamatest meetoditest, tehes seda laiatarbe arvutiprogrammide abil. Vaatamata mäenduslikule käsitlusele võiks siintoodust kasu olla ka loodusteadusliku suunitlusega geoloogidele.

Maavara uuring – maapõueinseneri õppeaine, mille sisuks on mineraaltoormetööstuse ressursside mõõtmine. Seejuures põhirõhk on pandud maavara omaduste, kaevandmisväärsuse ja koguse hindamisele, mis peab toimuma vastavalt tellija majanduslikele ning tehnilistele võimalustele. Järgnevas esitatu toob ja loob metoodilisi aluseid, mis tuginevad geoanalüüsile ja mille abil projekteeritakse ning tehakse maavara uuring ning koostatakse tehtud tööde aruanne.

Mäendusanalüüs – metoodiline juhend doktori-, aga ka teaduslikumate magistriuringute tegemiseks. Sisaldab seletusi töö eesmärgi, ülesannete ja hüpoteeside püstitamise kohta samuti ka soovitusi nende valimiseks ja käitlemiseks. Teaduse metodoloogia on lai, seepärast on siin võimalik esitada vaid lihtsamaid soovitusi ja erialaseid näiteid, lootes, et nende järgijal tekivad oma ideed, mida juhendajaga arutada ja arendada.

Enno Reinsalu
TTÜ emeriitprofessor

PS. Käesolevas, 2019. a digiversioonis on parandatud ainult ilmsiks tulnud trükivead ja muudetud ühe jaotusfunktsiooni nimetust. Trükiversioonis (2013) muudatusi ei ole.

1. GEOANALÜÜS

1.1. Looduslike objektide mõõtmisest

1.1.1. Geoloogilised objektid

A.



on meie käsitusel kõik need kivid ja kivimid, lademed ja lasundid, mineraalid ja setted, vedelikud ja gaasid, millega geoloogia tegeleb. Geoloogilised objektid on osa loodusest.

Loodusobjektid ei ole lihtmoel kirjeldatavad ega mõõdetavad. Nad on mitmekülgsed, paljude eri omadustega, paljuski mitte sellised, millega tutvutakse klassikaliste inseneriteaduse harude algkursusel.

Alustame lihtsatest näidetest ja vaatame kõigepealt fotosid siin kõrval. Mõlemal pildil on kümme kivi¹. Mäenduse ja ehitusmaterjalide vaatenurgast on tegu kruusa osistega suurusklassist 50...100 mm. Geoloogias nimetatakse neid käsipaladeks. Pildil nähtavaid ümaramaid kive võib nimetada ka veeristeks.

Need kivid on **erikujulised** objektid.

B.



Silmaga on näha, et kivid erinevad – nad on mitmevärvilised, eri suuruse ja kujuga. Pihus tunneks, et igal kivil on oma tihedus (tundub kergem või raskem) ja soojusjuhtivus (tundub külmem või soojem). Kõik see viitab kivide erinevale mineraloogilisele ja petrograafilisele koostisele. Kuid piirdugem edasises ainult kujuga.

Ja **kui erinevad** nad suuruselt ikkagi on, see ongi selle teema esimene küsimus, mille usaldusväärset vastust hakkame mõõtmiste abil otsima.

Kuna fotod on ligilähedaselt samas mõõtkavas, siis võib ju öelda, et kivikogumid erinevad ka omavahel. Ülemisel pildil olevad A-kogumi kivid on suuremad ja enamasti ümarad. Alumise pildi B-kogumis on pooled kivid nurgelised ja paar üsna kiltjat.

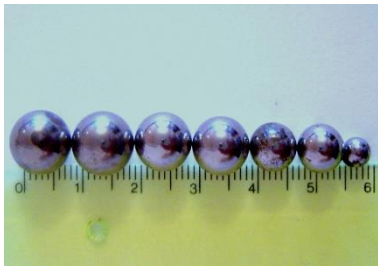
Ka küsimusele, kas kivikogumid A ja B on ikka erinevad ja **kui erinevad**, püüame saada vastuse järgnevas.

Pilt 1.1 Kaks kivikogumit

Geoloogia tegeleb erikujuliste objektidega, geomeetria – samakujulistega.

Järgnev Pilt 1.2 näitab **samakujulisi** objekte. Nad on küll erineva suurusega, ent neid iseloomustab vaid üks mõõde – kuulidel läbimõõt ja tetraeedritel ning kuupidel külje pikkus. Need samakujulised objektid on **ühemõõtmelised**.

¹ Sellele, kes kivikeste mõõtmist lapsemänguks peab, olgu öeldud, et sama meetodikat, mida edasises tutvustan, kasutatakse maardlate, lasundite, maagikehade ja paljude teiste ülimalt tähtsate geoloogiliste objektide olulisuse, sarnasuse, väärtuse ja tunnuste hindamiseks. Kivid on võetud seepärast, et tavainimesele on nad kõige käepärasemad geoloogilised objektid.



Pilt 1.2 Samakujulised ühemõõtmelised objektid:

A. Kuulid ehk sfäärid



B. Tetraeedrid



C. Kuubid



Pilt 1.3 Ehitusel kasutatud tehiskivid – samakujulised objektid



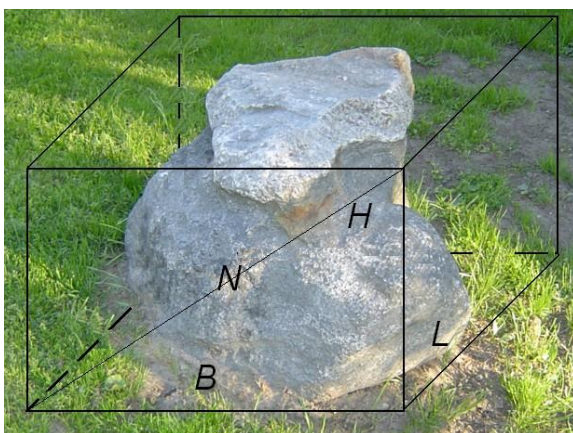
Pilt 1.4 Ehituspae plaadid

Paljusid samakujulisi objekte iseloomustab mitu mõõdet. Neist lihtsaimad on **kolmemõõtmelised**, näiteks risttahukad, millel on pikkus, laius ja kõrgus. Pilt 1.3 on ehitusmaterjalid, õigemini küll nende jäätmed, mis kõik on risttahukad. Hoolimata sellest, et nad kujult erinevad – kõige alumine on plaatjas ja kõige pealmine nõeljas risttahukas, on nad ikkagi samakujulised. Neid on lihtne mõõta ja kirjeldada ning neid on ka lihtne mõõtmete alusel jaotada.

Pilt 1.2 C olid sillutuskivid, mis on küll looduslikud, kuid mis pole enam loodusobjektid. Neid on püütud kujundada kuubikujuliseks. Rangelt võttes pole nad siiski kuubid vaid kuupjad kivid. Nende puhul juba tekib küsimus, kas nad on sama- või erikujulised. Veidi järele mõeldes võib tõdeda, et vastus sellele küsimusele sõltub mõõdetate muutlikkusest (p. 1.5.1) ja tarbija nõuetest sillutuskividele. Kui kuupjate kivide külje pikkus jääb lubatavatesse rajadesse, siis võime nõustuda, et nad on samakujulised. Kui mõne kivi külje pikkus või tipunurk erineb nõutavast "liiga palju", tunnistame ta erikujuliseks. Selline kivi tuleks tootjale tagastada, sest ta ei sobi sillutuseks. Siit ka järeldus, et selline ebameeldiv tegevus nagu praakimine sõltub lubatava erinevuse määrast, tolerantsist, mida esialgu tähistasime sõnapaariga "liiga erikujulised"?

Pilt 1.4 on ehituspae murtud paeplaadid. Üsna looduslikud, sest suhteliselt sirged servad ja täisnurksed nurgad tekivad maapõuelõhedest. Plaadid on valitud samast kihist, seetõttu on nad ka üsna ühepaksused. Kõigest hoolimata on need paeplaadid erikujulised. Need on plaatjate kivid, puhtakujulised loodusobjektid.

Geoloogilised objektid ei ole samakujulised, neid ei ole lihtne mõõta, jaotada ega klassifitseerida



Pilt 1.5 Kivi mõõtmed

Geoloogiliste objektide mõõtmise tehnika selgitamiseks võtame vaatuse alla ainult kivide mõõtmed, jättes kõik muud omadused kõrvale. Käsitleme kive kui erikujulisi objekte, mida iseloomustab kolm mõõdet: pikkus (L), laius (B) ja kõrgus (H).

Risttahuka puhul, olgu see tellis, tikutoos või kingakarp, on selge, mis on pikkus, mis laius ja mis kõrgus. Näiteks tavatellise mõõtmed on vastavalt 24, 12 ja 6 cm. Samuti on erikujulisel kehal pikkus suurim, laius keskmine ja kõrgus vähim mõõde, ehk $L > B > H$. Oluline on, et mõõtmed olgu ortogonaalsed. teisisõnu – pikkus, laius ja kõrgus mõõdetagu üksteisega risti olevates suundades (Pilt 1.5).



Kuid see reegel ei kehti tarvitse alati kehtida. Näiteks pildil oleva kivilinna suurim mõõde on tiivaulatus. Kuid kivilind ei ole enam kivi vaid skulptuur.

Pilt 1.6 Orgita paest välja raiutud kivilind sümboliseerib TTÜ mäeinstituuti

Kivi kuju on informatiivne. Geoloog oskab käsipala kuju järgi öelda, millised protsessid on ta selliseks kujundanud ja miks ta just nii on maapõue pidama jäänud.

Mäetehnikas, kus kive ei mõõdetata ükshaaval vaid sortitakse hulgi, sõltub kivi kujust, millisest sõela avast ta läbi läheb. Samuti sõltub kivi kujust, kuidas ta purustisse satub. Tavaliselt eeldatakse, et pikergune kivi läbib sõela pikuti. Teisisõnu, kivi või kivitüki pikkusega risti olev löige peab läbima sõela ava. Sellest lähtuvalt defineerime kivi nominaali ehk nominaalmõõtme

$$N = (B^2 + H^2)^{0,5}$$

Enamasti eeldatakse, et kui nominaal on väiksem kui sõela ümara ava diameeter või ruudukujulise ava küljepikkus, siis kivi läheb sõelast läbi². Näiteks klassi 50...100 mm kuuluvaks loetakse veerised, mille nominaal on just selles vahemikus.

Kivi iseloomustamiseks võib arvutada ka kujuteguri

$$T = L / (B \times H)^{0,5}$$

Kujuteguri jaoks on ka teisi määranguid ja valemeid. Siinse valemi kohaselt võib kive ja kilde jaotada tabelis 1 esitatud kujuteguri alusel.

Tabel 1 Kivide ja kildude kuju hindamine mõõdetate ja kujuteguri alusel

Kuju	Tingimus	Kujutegur	Eripind*
Kuupjas, ümar, isomeetiline	$L < 1,4 B$ ja $B < 1,4 H$	1...1,6	5,5...6,1
Tahukas, pikergune	$L < 3 B$ ja $B < 3 H$	1,7...5,2	4,5...6,8
Plaatjas, lapik	$H < 3 B$	> 5,3	Kuni 41
Nõeljas, pikk (pikerguste ja lapikute hulgas)	$L > 3 N$ ja $B < 3 H$	3...5,3	4,5...7

* Eripind on arvatud kuju kõigi erimite puhul sama nominaali juures

Kivi kujust sõltub tema mahu ja välispinna suhe, ehk eripind³, mis on oluline betoonide puhul. Tsement, bituumen ja teised sideained seovad betooni komponente pindmiselt. Mida rohkem on killustikus või kruusas suure eripinnaga osiseid, seda enam kulub sideainet ja seda nõrgem saab tehismaterjal. Eriti suure eripinnaga on plaatjad kivid ja killud, sellised, mille paksus ehk kõrgus on mitu (leppeliselt kolm) korda väiksem kui teised mõõtmed (Pilt 1.4). Plaatjate kivide eripind on sama nominaali puhul 7...8 korda suurem tavaliste, ka nõeljate ning kuupjate kivide eripinnast (Tabel 1). Põhja-Eesti tüüpilistel sette kivimitel on looduslik eeldus anda purustamisel palju plaatjat kildu.

Kõiki neid üksikasju tutvustatakse lähemalt mäenduse ja ehituse erikursustel. Siin käsitleme kive vaid kui käepärast loodusobjekti, mille suuruse ja kuju mõõtmise alusel saab selgitada geoanalüüsi lihtsamate meetodite võtteid ja võimalusi.

1.1.2. Geoanalüüsis kasutatavad matemaatilise statistika mõisted

Tunnus

on meie käsitluses geoloogilise objekti: maavara, kivimi, lasuvuse jmt omadusi mõõtev arvvaartus, näiteks lasundi paksus, liiva peensusmoodul, põlevkivikihindi energiatootlus, kihi kaldenurk jmt. Tunnus võib olla raskelt mõõdetav või isegi mittemõõdetav. Sellest ei maksa heituda – kui tunnus ei ole mõõdetav, on ta ikka hinnatav, nagu näiteks värvus, lõhn, läige, murd (geoloogilise mõistena) jmt.

² Tegelikult on asi keerukam. Kivide ja kildude sõelumisel mängib rolli veel sõelte kalle, sõelutava materjali niiskus, materjali hulk sõelal jm.

³ Eripind on puistematerjali disperssuse oluline tunnus. Mida peenem on materjal, seda suurem on eripind. Kahjuks ei ole puistematerjali eripinna määramine ei arvutuslikult ega laboratoorselt lihtne ega täpne, mistõttu seda tunnust eriti sagedasti ei kasutata.

Hinnangud võib alati mingil moel viia vastavusse arväärtustega – panna hindeid (palle) ja nii saada tulemusi, mille jaoks on võimalik leida analüüsimeetodeid. Tunnused ongi statistilise töötuse peamised objektid.

Valim

on mõõdetava objekti tunnuste kogum, näiteks mõõtmiskohtades, proovimisel, teimimisel jne saadud mõõtmis- või hindamistulemused.

Geoanalüüsis on valim tavaliselt esitatud tabelina, maatriksina. Näiteks maavara geoloogilise uuringu tulemused võivad olla tabelis, millel on kolm veergu mõõtmiskoha geograafiliste koordinaatide (x, y, z) jaoks, vähemalt üks veerg tunnuse mõõtmistulemustega ning tavaliselt ka veerg või enam proovi(de), südamik, näidise, käsipala jms) indeksitega (geoloogiline kood, järjekorranumber jms) ja kirjeldusega (vt järgmine tabel).

Tabel 2 Valimi näide - mõningate proovide tulemused Kurevere dolokivimaardlas

Puuraugu number	Koordinaadid, m			Kihhi paksus, m	Komponentide sisaldus, %		
	x	y	z		CaO	MgO	Jääk
1	6496908	474751.2	11.44	4.70	29.97	20.68	3.03
2	6496547	474029.4	7.47	3.70	30.41	19.31	2.46
3	6496907	473807.6	7.48	1.10	27.78	20.36	5.43
4	6497283	473684.3	8.25	2.80	30.70	17.84	5.14
5	6497749	473448.2	9.91	4.70	30.41	20.36	2.95
6	6498811	473952.5	13.12	3.80	29.92	20.68	2.93
7	6498610	474816.2	12.62	4.50	29.10	21.10	2.64
8	6497951	475300.8	13.51	7.00	28.73	20.83	3.40
9	6497493	475666.3	9.16	2.40	29.80	19.73	3.38
10	6497340	474022.2	11.41	2.20	29.53	20.99	2.62
11	6498811	474232.2	14.51	8.10	30.03	20.45	3.00
12	6498283	475046.4	12.40	2.90	29.88	21.99	3.26
14	6498800	472385.1	9.42	6.50	27.78	20.57	5.95
15	6499522	473242.3	15.81	10.20	29.55	20.17	3.14

Millest selline mõiste nagu valim? Aga seepärast, et me ei saa kunagi mõõta kogu objekti vaid **valime** oma järelduste tegemiseks mingi tunnuste kogumi. Näiteks, eelmises punktis esitatud arutlusi kividest oleksime saanud sama hästi teha ka siis, kui oleksime kasutanud teisi käsipalade komplekte (valimeid), mitte neid, mis piltidel. Nii võib ka lasundi geoloogiliste tunnuste määramiseks valida ühed või teised puurimise kohad, võtta kivimiproove ühest või teisest paljandist ja veeproove ühest või teisest vaatluskaevust, või siis ühel või teisel ajal jne. Seepärast

on juhuslik mitte ainult mõõtmistulemus vaid ka tulemuste kogum.

Kuna eesmärgiks on määrata geoloogilise objekti tunnuseid võimalikult hästi, siis peab ka valim olema hästi valitud. Ta peab olema **esinduslik**, mis tähendab, et ta peab:

- iseloomustama just seda, mida uuritakse,
- olema tehtud ajal, mil objekt, näiteks põhjavesi on parimal moel mõõdetav ja hinnatav,
- koosnema tunnustest, mis objektiivselt iseloomustavad objekti, s.t mõõdistused peavad olema kontrollitavad ja vajadusel korratavad ja
- olema piisavalt suur.

Valimi esinduslikkus on geoloogilise objekti mõõtmiste juures oluline nõue ja see eeldab piisavat praktikat, ainuüksi teoreetilistest, sellest õpikust ammutatavatest teadmistest ei piisa.

Peamised statistilised tunnused

on:

- keskväärtus: aritmeetiline keskmine, mediaan, mood,
- muutlikkuse ja mõõtmistulemuste hajuvuse tunnused nagu dispersioon, standardhälve, hajuvusvahemik, variatsioonikordaja, asümmeetria, püstakus (ekstsess),
- tunnustevaheliste seoste hinnangud: korrelatsioonikordajad, regressioonikordajad jm.

Kõigi nende tunnuste arvutamise valemid ja meetodid on toodud erialakirjanduses, laiatarbeprogrammide ⁴ seletustes jne, mis väljastab siin nende kirjeldamise. Järgmises tabelis on näitena toodud programmpaketi *Excel* abil arvatud statistilised tunnused. Vastavad protseduurid on *Tools* ⇒ *Data Analysis* ⇒ *Descriptive Statistics*.

Näide 1. Valimi statistiliste tunnuste määramine

Tabel 3 Põlevkivikihi parameetrite valim

PÕLEVKIVIKIHTIDE JA VAHEKIHTIDE PAKSUSED PUHATU VÄLJAL													
Paksus, m Paksused on mõõdetud väljal hajali paiknevates puuraukudes.													
NR	KIHID												
	F ₁	E	D/E	D	C/D	C	B/C	B	A/A	A'	A/A'	A	KIHT
Arv:	79	76	80	78	79	79	78	79	78	80	80	80	74
1	0.55	0.64	0.05	0.11	0.27	0.43	0.11	0.45	0.13	0.12	0.00	0.12	2.98
2	0.40	0.55	0.03	0.12	0.32	0.47	0.05	0.45	0.17	0.11	0.00	0.12	2.79
3	0.35	0.60	0.05	0.12	0.27	0.40	0.10	0.42	0.17	0.12	0.04	0.12	2.76
4	0.50	0.52	0.03	0.10	0.32	0.55	0.00	0.32	0.18	0.11	0.00	0.11	2.74
5	0.35	0.55	0.07	0.10	0.28	0.55	0.00	0.38	0.20	0.10	0.00	0.10	2.68
6	0.37	0.50	0.05	0.08	0.28	0.50	0.10	0.47	0.15	0.07	0.00	0.10	2.67
7	0.29	0.70	0.08	0.10	0.25	0.44	0.15	0.35	0.10	0.10	0.00	0.10	2.66
8	0.38	0.50	0.12	0.12	0.30	0.40	0.25	0.40	0.30	0.10	0.00	0.13	3.00
9	0.31	0.52	0.04	0.05	0.24	0.40	0.18	0.50	0.19	0.10	0.00	0.10	2.63
10	0.30	0.60	0.05	0.05	0.23	0.40	0.23	0.45	0.17	0.12	0.00	0.11	2.71
70	0.39	0.57	0.04	0.08	0.30	0.43	0.23	0.33	0.22	0.05	0.03	0.08	2.75
71	0.33	0.52	0.04	0.10	0.30	0.35	0.16	0.31	0.21	0.11	0.04	0.08	2.55
72	0.28	0.60	0.07	0.07	0.26	0.45	0.09	0.29	0.20	0.08	0.03	0.10	2.52
73	0.32	0.59	0.04	0.06	0.32	0.42	0.19	0.35	0.21	0.08	0.04	0.11	2.73
74	0.30	0.57	0.05	0.08	0.27	0.52	0.18	0.39	0.18	0.11	0.00	0.14	2.79
75	0.34	0.52	0.05	0.08	0.27	0.36	0.16	0.35	0.2	0.05	0.03	0.15	
76	0.30	0.5	0.06	0.06	0.3	0.4	0.25	0.4	0.22	0.1	0.04	0.12	
77	0.26		0.06	0.06	0.29	0.42	0.21	0.31	0.19	0.1	0.04	0.09	
78	0.32		0.06	0.07	0.27	0.37	0.13	0.31	0.17	0.09	0.05	0.11	
79	0.30		0.03		0.25	0.42		0.32		0.09	0.04	0.12	
80			0.06							0.08	0.04	0.11	

Tabel 4 Puhatu uuringuvälja põlevkivikihi B paksuse statistilised tunnused

Statistilised tunnused		Tulem	Ühik
Inglise keeles	Eesti keeles		
<i>Mean</i>	Aritmeetiline keskmine	0.41	m
<i>Standard Error</i>	Aritmeetilise keskmise standardhälve	0.009	m
<i>Median</i>	Mediaan, mahukeskmise	0.40	m
<i>Mode</i>	Mood, sagedamini korduv väärtus ⁵	0.37	m
<i>Standard Deviation</i>	Valimi standardhälve	0.062	m
<i>Sample Variance</i>	Valimi dispersioon	0.0039	m ²
<i>Kurtosis</i>	Püstakus, ekstsess	-0.12	
<i>Skewness</i>	Asümmeetria	0.63	
<i>Range</i>	Hajuvusvahemik	0.27	m
<i>Minimum</i>	Vähim	0.30	m
<i>Maximum</i>	Suurim	0.57	m
<i>Sum</i>	Summa	20.25	m
<i>Count</i>	Valimi suurus	50	
<i>Confidence Level (95,0 %)</i>	Aritmeetilise keskmise usaldusraja, mõõtemääramatus 95% tasemel	0.02	m

⁴ Selles õpikus kasutame ainult *Excel*/it ja selle protseduure

⁵ Moodi puhul võib juhtuda, et tavaprogramm jätab selle määramata

Valimi suurus

Nagu mainitud, on valim juhuslik. Kui see koosneb ühe ja sama tunnuse kordusmõõtmise tulemustest ja valimi iseloomustamiseks leitakse keskväärtus (tavaliselt aritmeetiline keskmine), siis veidi järele mõeldes saab aru, et kui oleks võetud sama tunnuse teine valim (teisest kohast, teisel ajal, teise isiku poolt), siis oleks saadud ka teine keskväärtus. Seega valimi keskväärtus on juhuslik suurus. Kuna see on nii, siis, järelikult on tal ka oma hajuvustunnused, näiteks aritmeetilise keskmise standardhälve, mis on Tabel 4 teises reas.

Uuringu eesmärk on mõõta ära kogu objekt. Ideaalne oleks, kui mõõtmiste arv oleks lõpmatult suur, sest ainult lõpmatult suure valimi esinduslikkus on maksimaalne. Mida väiksem valim, seda vähem esinduslik ta on. Samas on arusaadav, et mida suurem valim, seda kulukam on selle hankimine. Seepärast tuleb leida optimaalne lahend ja leppida kokku, kui suur võib olla valimi keskväärtuse lubatav mõõtemääramatus (hajumine, viga) ja kui suure tõenäosusega võib keskväärtus ületada ette antud raja⁶. Tabel 4 viimases reas valimi aritmeetilise keskmise (0,41 m) usaldusraja (0,02 m) on tasemel 95%. See tähendab, et nende mõõtmistulemuste alusel on Puhatu uuringuvälja põlevkivikihi B keskmine paksus tõenäosusega 95% vahemikus 0,39...0,43 m. Samal ajal üksikud mõõtmistulemused ise olid vahemikus 0,30...0,57 m (vt Tabel 4).

Valimi suuruse määramisel peab olema teada:

- tunnuse hajumist iseloomustav valimi standardhälve,
- aritmeetilise keskmise lubatav hälve, edasises – mõõtemääramatus,
- lubatava hälbe ületamise tõenäosus, teisisõnu – aritmeetilise keskmise mõõtemääramatuse usaldatavus ja
- lisaks viimasele – kas keskväärtus peab olema ette antud rajades (antakse ette kahepoolseid usaldusrajad) või ei tohi ta ületada ette antud rajaväärtust, s.t ei tohi olla väiksem või suurem ette antust (antakse ette ühepoolne usaldusraja).

Valimi suurus määratakse valemiga

$$n = (t s_p / p \rho)^2$$

kus: t – *Studenti* kordaja (Tabel 5), vastavalt usaldustasemele, s_p – valimi standardhälve, p – mõõdetava tunnuse keskväärtus, ρ - ette antud suhteline viga.

Esindusliku valimi suuruse määramise meetodika oleks lihtne, kui poleks tegemist "surnud ringiga". Esiteks, et kavandada mõõtmiste arvu, et saada esinduslik valim, peaks teadma mõõtmistulemuste keskväärtust ja standardhälvet. Need aga saame alles pärast mõõtmist. Ja teiseks – isegi kui mõõdetava tunnuse hajuvus oleks teada, kasvõi varasemate uuringute (otsingu) või muu teabe alusel ja saame aluseks võtta uuritava tunnuse variatsioonikordaja $v = s_p / p$, ei annaks see võimalust üheseks lahendamiseks, sest ka *Studenti* kordaja (t) sõltub valimi suurusest, mida me just tahame määrata.

Kuidas leida väljapääs, räägime maavara uuringu projekteerimist käsitlevas osas (p 2.5.2). Tavaliselt käitatakse lihtsate soovitude alusel:

- esinduslik valim on suurem kui kolmkümmend mõõtmist ($n > 30$),
- kahepoolne usaldusraja valitakse kas 90, 95 või 99 %,
- *Studenti* kordaja võetakse umbkaudselt, $t \cong 2$.

Need reeglid on käibel ka ühtse "rusikareeglina": kui mõõtmiste arv on piisavalt suur, on valimi keskväärtus tõenäosusega 95 % usaldatav vahemikus ± 2 aritmeetilise keskmise standardhälvet. Kuid vastutusrikkas töös ei saa piirduda ligikaudsete andmetega ega reeglitega.

⁶ Maavara geoloogilisel uuringul peaks selle määrama tellija

Tabel 5 *Studenti* kordaja *t*

Vabadusastmete arv	Ühepoolne usaldusraja					
$f = n - 1$	0,85	0,90	0,95	0,98	0,98	0,99
3	1,25	1,64	2,35	3,18	3,45	4,54
4	1,19	1,53	2,13	2,78	3,02	3,75
5	1,16	1,48	2,01	2,57	2,74	3,36
6	1,13	1,44	1,94	2,45	2,63	3,14
7	1,12	1,41	1,90	2,37	2,54	3,00
8	1,11	1,40	1,86	2,31	2,49	2,90
9	1,10	1,38	1,83	2,26	2,44	2,82
10	1,10	1,37	1,81	2,23	2,40	2,76
11	1,09	1,36	1,80	2,20	2,36	2,72
12	1,08	1,36	1,78	2,18	2,33	2,68
13	1,08	1,35	1,77	2,16	2,30	2,65
14	1,08	1,34	1,76	2,15	2,28	2,62
15	1,07	1,34	1,75	2,13	2,27	2,60
16	1,07	1,34	1,75	2,12	2,26	2,58
17	1,07	1,33	1,74	2,11	2,25	2,57
18	1,07	1,33	1,73	2,10	2,24	2,55
19	1,07	1,33	1,73	2,09	2,23	2,54
20	1,06	1,32	1,72	2,09	2,22	2,53
25	1,06	1,32	1,71	2,06	2,19	2,49
30	1,05	1,31	1,70	2,04	2,17	2,46
40	1,05	1,30	1,68	2,02	2,14	2,42
60	1,05	1,30	1,67	2,00	2,12	2,39
Kahepoolne usaldusraja \Rightarrow	0,70	0,80	0,90	0,95	0,96	0,98

1.1.3. Looduslike objektide oluline ja mitteoluline erinevus

Pildil 1.1 nägime kive, mis erinesid suuruse ja kuju poolest. Arutlegem edasi teemal – kas nende kivide, samuti pildil kujutatud kogumite (valimite) A ja B suuruse ning kuju erinevus on üldse oluline?

Esmalt tuleb lahti seletada olulisuse mõiste. Antud juhul mõeldakse olulisuse all seda, kui tähtis on kivi suuruse ja kuju erinevus. Pildil olevad kivid on silmnähtavalt erikujulised ja erimõõtmelised, kuid betooni sees ei oma see erilist tähtsust. Erimõõtmelised on ka teraskuulid (Pilt 1.2). Kui nende seast silma järgi valida välja ühemõõtmelised kuulid, ei sobiks nad mitte kuidagi kvaliteetse kuullaagri tegemiseks, sest laagris peab kuulide mõõtmete erinevus nii omavahel kui ka sfäärilisele olema väga väikene. Nii väikene erinevus ei ole silmaga nähtav ega tavamõõdikuga mõõdetav. Seega sõltub olulisuse määr ülesande püstitusest – betoonis ja kuullaagrites on elementide suurusel ja kujul oluliselt erinev tähtsus.

Üritagem Pilt 1.1 Kaks kivikogumit) pildistatud kive mõõta. Nende pikkust, laiust ja kõrgust peaks määrama mõõtkastis, mis tagaks mõõdete ortogonaalsuse. Välitööl tavaliselt mõõtkasti ei ole ja kive mõõdetakse abil pihus. Seejuures tekib mitut laadi vigu:

- joonlaud on silmale lähemal kui kivi, seepärast paistab kivi tegelikust veidi väiksem
- väliolukorras ja eriti pihus pole võimalik tagada mõõdete ortogonaalsust
- veeriste puhul tekib tihti küsimus, milline mõõde on laius ja milline kõrgus?

Nii võibki küsida - kui objekti (antud juhul kivi) suurus ja kuju pole olulised, kas siis täpsus ongi oluline?

Tegelikult saab kõike mõõta, ka väite olulisuse määra

Alustagem mõõtmistulemuste analüüsi.

Näide 2. Valimite erinevuse hindamine

Käsiplade A-kogumi mõõtmise tulemused on Tabel 6. On mõõdetud ka kogum B (Tabel 7).

Tabel 6 Kümne kivi mõõtmed ja nende esma-analüüs. Kogum A

Seeria	1	Kivide numbrid:										Mõõtmete		
Mõõde	Tähis, valem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Keskmine	Dispersioon	Standardhälve
Pikkus, mm	L	128	112	111	95	95	86	82	86	80	81	96	265	16
Laius, mm	B	60	50	59	50	55	60	62	75	64	52	59	58	8
Kõrgus, mm	H	40	30	35	40	40	45	34	42	50	44	40	34	6
Keskmine, mm	$(L+B+H)/3$	76	64	68	62	63	64	59	68	65	59	65	356	19
Kivide														
Nominaaal	$(B^2 + H^2)^{0.5}$	72	58	69	64	68	75	71	86	81	68	71	64	8
Dispersioon		2128	1828	1509	858	808	430	581	524	225	379	9272		
Standardhälve		46	43	39	29	28	21	24	23	15	19	96		
Kujutegur	$L/(B \times H)^{0.5}$	2.6	2.9	2.4	2.1	2.0	1.7	1.8	1.5	1.4	1.7	2.0		

Tabel 7 Kümne kivi mõõtmed ja nende esma-analüüs. Kogum B

Seeria	2	Kivide numbrid:										Mõõtmete		
Mõõde	Tähis, valem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Keskmine	Dispersioon	Standardhälve
Pikkus, mm	L	75	60	57	69	58	105	84	90	92	78	77	261	16
Laius, mm	B	49	54	56	44	38	58	68	49	48	35	50	95	10
Kõrgus, mm	H	49	38	40	37	35	38	20	11	5	9	28	240	15
Keskmine, mm	$(L+B+H)/3$	58	51	51	50	44	67	57	50	48	41	52	595	24
Kivide														
Nominaaal	$(B^2 + H^2)^{0.5}$	69	66	69	57	52	69	71	50	48	36	59	141	12
Dispersioon		225	129	91	283	156	1183	1109	1561	1892	1214	7845		
Standardhälve		15	11	10	17	13	34	33	40	44	35	89		
Kujutegur	$L/(B \times H)^{0.5}$	1.5	1.3	1.2	1.7	1.6	2.2	2.3	3.9	5.9	4.4	2.6		

Peale mõõtmistulemuste on tabelites eraldi veeruna kivide keskmised pikkused, laiused ja kõrgused ning eraldi reana iga kivi kolme mõõtme keskmine. Lisaks keskmistele on tabelis omaette veeru ning reana mõõtmete varieeruvuse tunnused – dispersioon ja selle ruutjuur ehk standardhälve. Kuna kivide mõõtmed tabelis on millimeetrites, siis dispersiooni mõõtühikuks on mm^2 , mis siiski ei ole pindala.

Vaadake – enamasti on arvud dispersioonide reas suuremad kui arvud dispersioonide veerus. See tähendab, et üksiku kivi mõõtmete omavaheline erinevus on suurem kui mõõdetud kivide pikkuste, laiuste ja kõrguste omavaheline erinevus. Lähemalt vaadates võib märgata, et kõige väiksem dispersioon ehk mõõtmete erinevus on A-kogumi (Tabel 6, dispersioonide rida) üheksandal kivil ja B-kogumi (Tabel 7, dispersioonide rida) kolmandal kivil mis tähendab, et nad on üsna ümarad. Seda kinnitab nende kujutegur. Kõige enam erineb mõõdetud kivide pikkus, mis on loogiline, sest pikkus on käsiplata suurim mõõde.

Nii saab dispersiooni abil üsna lihtsalt hinnata, mis varieerub rohkem, mis vähem. Kuid väita, mis on oluline, kas kivide suurus, valimite erinevus või kive mõõtnud isikute oskus täpselt mõõta veel ei saa. Enne tuleb määrata väite usaldusväärsus ja hinnata mõõtmisviga. Võimalusi selleks pakub dispersioonanalüüs.

1.1.4. Erinevuse hindamine dispersioonianalüüsi abil

Meetodi põhimõte – mõõtmistulemuste üldine hajuvus (dispersioon) jaotatakse erinevatest põhjustest tulenevateks (osa)dispersioonideks. Kivide näite puhul on mõõtmistulemuste hajumise põhjusi kolm: kivide suurus, kivide kuju ja mõõtmise täpsus.

Näide 3. Valimite erinevuse hindamine dispersioonianalüüsi (ANOVA ⁷) abil

Mõlema kivikogumi puhul tehti 30 mõõtmist (10 kivi, igal kolm mõõdet) ja saadi 30 erinevat arvu. Arvude varieeruvust mõõdab nende üldine ehk totaalne dispersioon, mis on iga üksiku mõõtetulemuse ja kõikide tulemuste aritmeetilise keskmise vahede ruutude summa ning vabadusastmete arvu jagatis. Peaksime teadma, et dispersioonid on liidetavad. Tänu sellele saab totaalse dispersiooni lahutada kolmeks osaks, millest üks mõõdab kivide suuruse hajuvust ja teine kivide mõõtmete hajuvust. Jääb veel kolmas osa,

⁷ ANOVA – Analyse of Variance

mida ei saa seletada kummagagi. See on jääkdispersioon, millest suure osa tekitab mõõtjate (operaatorite = tudengite, isikute) töö ebatäpsus.

Arvutusprotseduur, mida tänu piisavale erialakirjandusele pole mõtet lahti kirjutada ega valemitega kirjeldada, lõpeb, kui saadakse kolm dispersiooni:

D_v - dispersioon tabeli veergude vahel, antud juhul kivide erinevuse tunnus

D_r - dispersioon tabeli ridade vahel, antud juhul kivi mõõtmete erinevuse tunnus ja

D_o - jääkdispersioon, mis pole seletatav kummagagi eelmistest.

Edasi arvutatakse *Fisher* kriteeriumid

$$F_v = D_v / D_o \text{ ja } F_r = D_r / D_o,$$

millest esimene (F_v) mõõdab veergude kaupa esitatud arvude variatsiooni ehk iga kivi mõõtmete omavahelist erinevuse olulisust hajuvuse tekkes ja teine (F_r) ridamisi paiknevate arvude (kivide pikkuste, laiuste ning kõrguste) omavahelise erinevuse olulisust. Mida suurem on *Fisher* kriteeriumi väärtus, seda tõenäolisem on, et vastav varieeruvus on oluline. Olulisust iseloomustava arv väärtuse ehk väite usaldusväärsuse (kindluse, tõenäosuse) kohta on käsiraamatutes leida tabelaid. Tavaliselt laiatarbeline (*Excel*) arvutiprogramm väljastab arvutuste tulemuste juures ka vastavad usaldusväärsuse väärtused. Ning vastupidi - andes ette usaldusväärsuse taseme (vastandhüpoteesi usaldatavusena 0,05 ehk 5%), väljastab programm *Fisher* kriteeriumi minimaalväärtuse, millest suurema puhul võib muutlikkust oluliseks pidada.

Kivide esimese kogumi mõõtmistulemuste töötlemise tulemused on järgmised:

Tabel 8 Dispersioonianalüüsi esmased tulemused

Meetod {*Anova Two-Factor without replication*}

Muutlikkuse põhjus	Dispersioon ja jääkstandardhälve	<i>Fisher</i> kriteerium	Usaldusväärsus, %	<i>Fisher</i> kriteeriumi kriitiline raja usaldusväärsusel 95 %
Mõõtmete erinevus	$D_r = 8004$	$F_r = 57.8$	~100	3.55
Kivide erinevus	$D_v = 75$	$F_v = 0.53$	17	2.46
Jääkdispersioon, mm ²	$D_o = 141$			
Jääkstandardhälve, mm	$s_o = 12$			

Analüüsil tuvastasime, et peamine ja oluline on kivi oma mõõtmete erinevus ehk kivide erikujulisus. Seda saab väita peaaegu sajaprotsendilise kindlusega. Käsipalade erinev suurus valimis pole üldse oluline, sest nende mõõtmiste alusel oleks vastava väite (et kivid on erimõõtmelised) tõenäosus vaid 17 %. Et 95 % kindlusega väita, et kivid on eri suurusega, peaks *Fisher* kriteerium olema vähemalt 2,46, kuid on vaid 0,53. Seega kuuluvad kõik kümme kivi ühte suurusklassi. Tabelis toodud jääkstandardhälve (mm) on ruutjuur jääkdispersioonist ja iseloomustab mõõtmise ebatäpsust, mõõtemääramatust.

Kes arvab, et need arvutused on varblaste tulistamine kahuriga, teadku, et tegu on alles ettevalmistava tulelöögiaga.

Järgmises tabelis on analüüsitud mõlema kivikogumi mõõtmise tulemusi koos. Sisuliselt on see kordusmõõdistus, kusjuures kivid nii esimeses kui teises kogumis ei ole järjestatud mingi tunnuse alusel. Neid mõõdeti ja tulemused pandi tabelisse suvaliselt, nagu kivi kätte sattus.

Tabel 9 Kahe kivikogumi mõõtmise dispersioonianalüüsi tulemused.

Meetod {*Anova Two-Factor with replication*}

Muutlikkuse põhjus	Dispersioon ja jääkstandardhälve	<i>Fisher</i> kriteerium	Usaldusväärsus, %	<i>Fisher</i> kriteeriumi kriitiline raja usaldusväärsusel 95 %
Kogumite erinevus	$D_r = 2587$	$F_v = 3.02$	91	4.08
Kivide erinevus	$D_v = 153$	$F_r = 0.18$	0.5	2.12
Koosmõju, seos	$D_k = 90$	$F_k = 0.11$	~0	2.12
Jääkdispersioon, mm ²	$D_o = 856$			
Jääkstandardhälve, mm	29			

Uus arvutus näitab, et kordusmõõdistus annab sama tulemuse: valimid erinevad, kuid kivid mitte. Muidugi võis seda näha juba lähteandmeid vaadates, kuid ainult näha, mitte arvudega kinnitada⁸. Kogumite erinevuse tõttu osutus uue mõõtmise ebatäpsus suuremaks kui eelmisel korral. Väärtuslik lisateave, mida annab kordusmõõtmise analüüs, on kahe faktori koosmõju tuvastamine. Teisisõnu, võime vastata küsimusele (kui see kedagi huvitab), kas suuremate kivide mõõtmisel on suurem erinevus. Vastav *Fisheri* kriteerium näitab, et ei ole. Isegi kui prooviks teha dispersioonianalüüsi nii, et järjestaks enne arvutusi mõlema kogumi kivid mõne mõõtme alusel, oleks tulemus absoluutselt sama.

Dispersioonianalüüsi meeldiv omadus on, et lähteandmeid ei pea järjestama

Kordusmõõtmise saab korraldada ka nii, et sama kogumit mõõdab mitu isikut. Esimese kivi kogumi (A-valimi) kolme isiku poolt tehtud mõõtmise tulemused on järgmises tabelis ja töötlemisandmed ülejäärgmises.

Tabel 10 Esimese kivi kogumi mõõtmine kolme isiku poolt

Mõõtja	Mõõde	Kivid:										Keskmine
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
D	L	128	112	111	95	95	86	82	86	80	81	96
C		130	102	106	98	92	84	82	83	82	78	94
A		121	111	106	95	88	82	83	80	79	80	93
D	B	60	50	59	50	55	60	62	75	64	52	59
C		58	48	59	54	52	58	63	72	59	50	57
A		52	50	60	56	53	58	60	71	59	50	57
D	H	40	30	35	40	40	45	34	42	50	44	40
C		39	38	36	43	39	43	30	43	48	46	41
A		44	33	39	46	36	44	32	44	49	45	41

Tabel 11 Kordusmõõtmiste dispersioonianalüüs.

Meetod {*Anova Two-Factor with replication*}

Muutlikkuse põhjus	Dispersioon ja jääkstandardhälve	<i>Fisheri</i> kriteerium	Usaldusväarsus, %	<i>Fisheri</i> kriteeriumi kriitiline raja usaldusväarsusel 95 %
Mõõtmete erinevus	$D_r = 22285$	$F_v = 3488$	~100	3.15
Kivide erinevus	$D_v = 205$	$F_r = 32.11$	~100	2.04
Koosmõju, seos	$D_k = 375$	$F_k = 58.63$	~100	1.78
Jääkdispersioon, mm ²	$D_o = 6.39$			
Jääkstandardhälve, mm	2.53			

Need arvutustulemused näitavad ootuspäraselt, et kivid on igati erinevad, kuid kõige suurem on ikkagi mõõtmete erinevus – kivid ei ole ümarad. Olulisuse poolest järgmisel kohal on koosmõju – suurtel kividel on mõõtmete erinevus suurem kui väikestel, mis tundub ka loogiline olevat. Kõige väiksem osa on kivide suuruse erinevusel, kuid antud juhul on ka see oluline. Mõõtmisviga, kui selleks võtta kahekordne standardhälve, on praegusel juhul umbes ± 5 mm.

Mõõtmisviga koosneb teatavasti väga mitmest osast, millest olulisema moodustavad mõõtja (operaatori) eksimused. Ka seda on võimalik hinnata dispersioonianalüüsi abil. Järgnevas tabelis on toodud esimese kogumi kivide pikkused, mis on saadud kaheteistkümne isiku tehtud mõõtmise alusel.

⁸ Nägemise alusel kirjeldamine kuulub klassikalise loodusteaduse valdkonda, arvudega kinnitamine on inseneriteadus

Tabel 12 Kogumi A kivide pikkuse mõõtmine tosina isiku poolt

Mõõtjad	Kivide pikkusmõõde										Kivide varieeruvus			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Keskmine	Dispersioon	Standardhälve	Variatsioonitegur
A	121	111	106	95	88	82	83	80	79	80	93	229	15.1	0.16
B	125	111	109	95	92	83	83	81	79	82	94	251	15.8	0.17
C	130	102	106	98	92	84	82	83	82	78	94	254	15.9	0.17
D	128	112	111	95	95	86	82	86	80	81	96	265	16.3	0.17
E	126	109	102	92	93	85	80	77	72	82	92	274	16.5	0.18
F	129	113	107	97	92	84	82	83	82	79	95	277	16.7	0.18
G	125	112	108	93	93	83	83	79	77	77	93	280	16.7	0.18
H	127	113	117	95	92	89	82	84	80	83	96	280	16.7	0.17
I	122	115	95	110	107	82	85	70	82	84	95	298	17.3	0.18
J	124	113	115	94	90	84	80	78	77	79	93	309	17.6	0.19
K	123	113	114	92	89	81	77	80	79	75	92	316	17.8	0.19
L	125	115	110	100	96	68	86	82	80	85	95	317	17.8	0.19
											94	264	16.2	0.17
Mõõtjatest tingitud tulemise hälbimine:														
Keskmine	125	112	108	96	93	83	82	80	79	80	94			
Dispersioon	7.5	11.9	35.7	24.1	23.8	25.5	5.5	17.1	7.9	8.8	168			
Standardhälve	2.7	3.4	6.0	4.9	4.9	5.1	2.4	4.1	2.8	3.0	13.0			
Variatsioonitegur	0.02	0.03	0.06	0.05	0.05	0.06	0.03	0.05	0.04	0.04	0.14			

Mõõtjad (operaatorid) on tabelis järjestatud tulemuste dispersiooni järgi: esimestel on mõõtmistulemuste hajumine väiksem kui viimastel. See aga ei anna alust operaatori vea hindamiseks, sest mõõdetav suurus (*L*) on ise väga varieeruv. Tabeli alumises osas on hinnatud operaatorite töö täpsust kivide kaupa. Seal toodud standardhälve näitab, et ühe ja sama kivi mõõtmistulemused on vägagi erinevad, ilmselt seetõttu, et operaatorid mõõdavad kivi pikkust väga mitut moodi. Nii on ilmselt tähe "I" all esinev mõõtja ajanud segi kivid nr 3 ja 5. Ka arvud ei anna täpsemat pilti, kui suur on antud operaatorite kogumi (12 isikut) keskmine, üldistatud mõõtmisviga, sest totaalne variatsioonikordaja 0,14 sisaldab nii kivi mõõdete variatsiooni kui ka operaatorite poolt tekitatud hälbeid. Selgust toob dispersioonialüüs, mille tulemused on järgnevas tabelis.

Tabel 13 Dispersioonialüüs, mille eesmärgiks on operaatori vea hindamine.

Meetod {*Anova, Single Factor*}

Muutlikkuse põhjus	Dispersioon ja jääkstandardhälve	Fisheri kriteerium	Usaldusväärsus, %	Fisheri kriteeriumi kriitiline raja usaldusväärsusel 95 %
Kivide pikkuse erinevus	$D_v = 3168$	$F_r = 189$	~100	1,97
Jääkdispersioon, mm ²	$D_o = 16.79$			
Jääkstandardhälve, mm	4.1 mm			

Need tulemused näitavad, et antud juhul see osa mõõtmistulemuste hajuvusest, mis ei ole tingitud kivide pikkuse erinevusest (jääkdispersioon) vaid erinevate isikute täpsusest ja mida üldjuhul nimetame operaatori veaks, on iseloomustatav standardhällbega 4,1 mm. Kuna mõõdetud kivide keskmine pikkus oli 94 mm ja kahekordne standardhälve on 8,2 mm, siis operaatori viga antud juhul on peaaegu 10 %⁹.

Kokkuvõte mõõtmistulemuste hindamisest

Kuigi kogu eelnev dispersioonialüüsi kirjeldus käsitles lihtsaid kive, on see meetodika kasutatav enamiku maavara uuringu raames tehtavatel mõõtmistel. Ei ole vahet, kas mõõdetakse veerise või puursüdamiku pikkust¹⁰. Erinevus on vaid selles, et mõõdetav veeris on tavaliselt käes, puursüdamik aga kassis, mistõttu südamikulõigu pikkuse mõõtetulemus peaks olema täpsem. Ka südamikulõigu pikkust mõjutavad paljud tegurid, näiteks puurmasina operaatori täpsus, kivimi tugevus jne ning nende mõju olulisus peaks saama hinnatud samuti kui siin toodud veeriste näitel.

Toodud näide pidi lugejat veenma, et mõõdetud erikujulised kivid olid küll erinevad, kuid kuulusid siiski ühte suurusklassi, sest mõõtmete hajuvus ja mõõtmise täpsus ei luba teha muud järeldust. Peale selle selgus, et käsitsi mõõtmistel on operaatori viga üsna suur, kuid lõpptulemuse seisukohalt vähe oluline.

⁹ Sama andmestik võimaldas hinnata, kuivõrd erines selles katses nais- ja meessoost operaatorite mõõtmistäpsus. Teades soolise võrdõiguslikkuse järelevalveorganite suhtumist mistahes objektiivsetesse hinnangutesse jäi see siit välja.

¹⁰ Puursüdamiku lõigu pikkus on tunnus, mis iseloomustab kivimi tugevust, sitkust

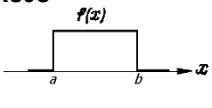
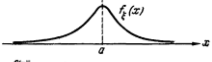
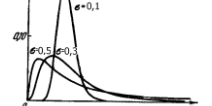
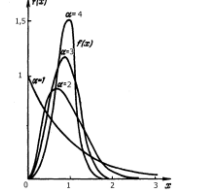
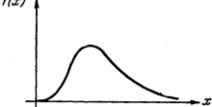
Kuid peamine, mida tahtsime rõhutada – iga väidet, mis tekib mõõtmise tulemusel, tuleb kinnitada arvuga, mis näitab väite usaldatavust. Üks võimalus seda teha on kasutada dispersioonianalüüsi.

1.2. Jaotuste analüüsimisest

1.2.1. Jaotusseadused

Käsitleme geoloogilise tunnuste väärtusi või geoloogilise uuringu käigus ilmnevaid sündmusi juhuslike suurustena. Kui statistilise käsitlusviisi põhioled ja matemaatiline aparaat peaks olema lugejale tuttav, kordame siiski üht-teist sellest edasises lihtsustatud kujul ja piiratud mahus.

Mittediskreetset juhuslikku suurust x iseloomustavad jaotusfunktsioon $F(x)$ (jaotus) ja tihedusfunktsioon $f(x) = dF(x) / dx$ (tihedus). Jaotuse kirjeldamiseks on kasutusel mitmeid funktsioone. Populaarsemad, aga ka teoreetiliselt põhjendatud ning enamasti ka hõlpsalt käideldavad on ühtlane jaotus, normaalne ehk normaaljaotus (ka *Gaussi* jaotus), logaritmiline normaaljaotus (lognormaaljaotus), gamma- ja viimasel ajal ka *Rosini-Rammleri* ehk *Weibulli* jaotus¹¹. Nende kujud ja valemid vt Pilt 1.7. Lisaks neile on analüüsid kasutuses ka normaaljaotusele väga lähedane *Studenti* jaotus, mida eelnenus kaudselt juba puudutasime.

KUJU	JAOTUS	RAJAD	TIHEDUSFUNKTSIOON	KESKVÄÄRTUS	DISPERSIOON
	ÜHTLANE	(a, b)	$\frac{1}{b-a}$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{(b-a)^2}{12}$
	NORMAAL-	$(-\infty, \infty)$	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$	a	σ^2
	LOGNORMAAL-	$(0, \infty)$	$\frac{1}{x\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\log x - a)^2}{2\sigma^2}}$	$e^{a + \frac{\sigma^2}{2}}$	$e^{2\sigma^2 + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$
	ROSINI- RAMMLERI e. WEIBULLI	$(0, \infty)$	$\alpha c x^{\alpha-1} e^{-cx^\alpha}$	$\frac{\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha})}{c^{\frac{1}{\alpha}}}$	$\frac{\Gamma(1 + \frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{\alpha})}{c^{\frac{2}{\alpha}}}$
	GAMMA-	$(0, \infty)$	$\frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}$	$\frac{\alpha}{\beta}$	$\frac{\alpha}{\beta^2}$

Pilt 1.7. Levinumad rakendusgeoloogias kasutatust leidvad jaotusseadused ja nende valemid.

Jaotusseaduste teadmine ja kasutamine geoloogias on kasulik selleks, et anda juhuslikele väärtustele ja nähtustele konkreetseid ning põhjendatud hinnanguid. Seda saab teha, kui ollakse kindel, kuidas jaotuvad geoloogilise objekti mõõtmistulemused. Vaatleme mõningaid lihtsamaid maavarade geoloogilisele uuringule isaloomulikke näiteid.

Näide 4. Metallisisaldus varuplokis

Uuringu tellija nõuab, et arvele võetava varu keskmine metallisisaldus (aritmeetiline keskmine) varuplokis oleks suurem kui 10%. Kõik teavad, et metallisisaldus maagis varieerub. Järelikult varieeruvad ka mõõtmistulemused, mille alusel keskmine määratakse ja ka keskmine ise, mis varieeruvate mõõtetulemuste alusel arvutatakse. Seega on uuringul saadud arväärtused üsna suvalised. Samas, nii tellija kui uurija soovivad, et keskmine oleks usaldatav. Tellija seepärast, et sellest sõltuvad kaevandamiskulud. Uurija seepärast, et teda usaldataks, ja et ka hiljem tema teeneid kasutataks. Nii tulebki uurijal määrata ja tellijale teada anda, kui suur on tõenäosus, et metallisisaldus

¹¹ Huvi korral *Rosini-Rammleri*, *Weibulli* (venekeelses kirjanduses ka *Gnedenko*) jaotusseaduste vastu võib lugeda autori artiklit Heal lapsel mitu nime ehk jalgratta leiutamine, mis ilmus kogumikus 60 aastat mäeinseneride õpetamist Eestis. TTÜ mäeinsituut, 1998, lk 31...32.

plokis ületab lubatud raja. Antud juhul, kui näiteks uurija moodustas ploki, milles maagi keskmine metallisisaldus on tema andmeil 12 %, siis peab ka ütleva, kui suure tõenäosusega võib kaevandamise ajal selguda või ette tulla, et keskmine on alla minimaalselt lubatava 10 %. Neid arvutusi tehakse eeldusel, et mõõtmistulemuste hajuvus on kirjeldatav normaaljaotuse või ja *Studenti* jaotuse abil.

Näide 5. Karstivööndid

On teada, et nii põlevkivi- kui ka fosforiidimaardlas esineb karstivööndeid, kus maavara on rikutud, alaväärtuslik või puudub. On tähele pandud, et vööndid esinevad mitte just väga juhuslikult vaid märgatava perioodilisusega ehk sammuga. Kui näiteks võib oletada, et leiupaigas on karstivööndite samm (vahemaa) 300 ± 30 m ja kui kaevanduskäigus kohati karsti, siis on võimalik arvutada, kui kaugel on jälle suurem tõenäosus, et karst ette tuleb. Lähtuvalt sellest on võimalik arvutada, kui palju peaks oodatavale karstivööndile lähenedes puurimisvõrku tihendama, et karsti leidmine oleks kindlam. Samas, kui uuringuvõrk on projekteeritud jäigalt, s.t puurimiskohta ei tohi muuta, siis on karstivööndile sattumine täiesti juhuslik. Kuna karstivööndi laius, võrreldes nende sammuga on väikene, siis on üsna tõenäoline, et jäiga puurimisvõrgu abil karsti üldse ei avastata ja arvele võetakse kogu puurimisega üle käidud maavara. Sel juhul on kasulik teada *Erlangi* jaotust, mida siin pole veel mainitud, kuid mida käsitleme punktis 1.5.2.

Näide 6. Kullaotsing

Kullaotsingule pühendunud maavarauurija otsib puistemaardlat, milles kulla sisaldus oleks vähemalt 1 g/t ehk 0,00001 % ehk 10^{-6} osa. Ta arvutab välja, mitu labidatäit liiva tuleb uhta, et ühte kullaterakest leida. Nii leitud labidatäite arv on proovi keskmine maht, ehk üsna higinähtav kogus. Proovi maht on leitud keskmisena, s.t pooltel juhtudest ei pruugi proovis olla mitte ühtegi kullaterakest, pooltel juhtudel on aga vähemalt üks. Ehk, kui näiteks võtta 10 proovi, siis suure tõenäosusega viies proovis kulda ei ole (või ei märgatud, mis on omaette küsimus). Seejuures mitte just suure, kuid mitte ka tühise tõenäosusega tuleb ette, et kuld puudub just esimeses viies proovis. Kui nüüd uurija käega lööb ja loobub selles kohas edasisest proovimast, võib maardla tema poolt avastamata jääda. Kui aga juhtub vastupidine lugu, et esimeses neljas proovis on kullaterakene sees, ja geoloog rõõmsalt avastuse kirja paneb ning edasisest proovimisest loobub et uutele avastustele vastu tõtata, siis võib ta endale petise sildi külge saada ¹².

Näidetena toodud juhtumitel tõenäosuslike arvutuste tegemiseks on kasulik teada mitmeid erinevaid jaotusseadusi, sh ka diskreetsete juhuslike arvude jaotusi. Nii saab arvutuste teel vägagi usaldusväärseid tulemusi, kuid eelduseks on, et valitakse parim, täpsem juhusliku suuruse (metallisisalduse) või sündmuse (karstivööndile sattumise, kullaterakese leidmise) jaotusfunktsioon.

1.2.2. Jaotuse analüüsi eesmärk

ei ole mitte ainult tõepäraste, usaldusväärsete arväärtuste ja seoste määramine, millest eelpool oli näiteid. Väga kasulik on ka juhuslike arvude jaotuste uurimine selleks, et otsida ja leida ebanormaalsusi, milleks võivad olla:

- mõõtmisel, üleskirjutamisel ja arvutamisel tehtud vead, mida edasises tuleks vältida, arvestada, parandada või siluda
- anomaalsed mõõtmistulemused, mis viitavad millelegi erilisele, mis võib hiljem osutuda vägagi kasulikuks või ohtlikuks.

Matemaatilise statistika tavakäsitluse kohaselt on mõõtmistulemused looduslikust muutlikkusest ning mõõtmisvigadest tulenevalt juhuslikud suurused, mis paiknevad keskväärtuse (keskmise) läheduses. Loetakse normaalseks, et mõõtmistulemused (lugemid) hälbivad mõlemas suunas – on keskmisest väiksemaid ja suuremaid. Sellest tulenevalt nimetaksegi kõige kasutatavamad jaotusseadused normaaljaotuseks.

Teooriasse süvenemata ja oma praktikale toetudes kinnitan, et enamik praktilisi ülesandeid on lahendatavad normaal- ja lognormaaljaotust kasutades. Kõige lihtsam on, nagu pahatihti ka tehakse, ignoreerida kõiki jaotusseadusi peale normaalse ja kasutada ainult sellele baseeruvat matemaatilise statistika tavameetodeid. Sellest tuleks aga hoiduda, kasvõi seepärast, et normaaljaotus on pidev vahemikus miinus-lõpmatuseni kuni pluss-lõpmatuseni, geoloogilised tunnused on aga valdavalt positiivsed suurused. Teiseks, normaaljaotus on sümmeetriline, mis tähendab, et tunnus hälbib mõlemale poole keskväärtust võrdse tõenäosusega. Praktikas tuleb aga tihti ette, et tunnuse hälbimine ei ole keskmise suhtes mitte sümmeetriline vaid pigem asümmeetriline. Need kaks, praktikas üsna sageli

¹² On teada juhtum, et selline geoloog "kukkus" džungli kohal helikopterist välja.

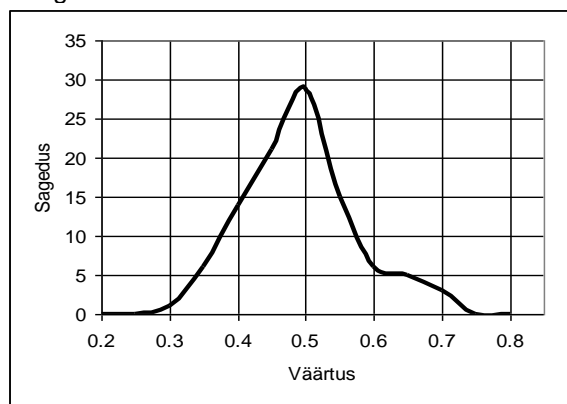
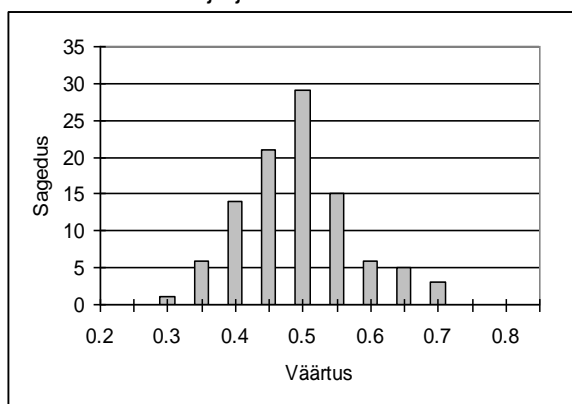
esinevat nähtust annavad eelise just “mittenormaalsetele” jaotusseadustele ja uurijatele, kes oskavad neid kasutada. Kõige lihtsam on ilmse ebasümmeetria ja eriti just väikeste positiivsete (nullilähedaste) arvude käitlemiseks kasutada lognormaalset jaotust. Selle jaotusseaduse eriline võlu on selles, et kui mitte pöörata tähelepanu logaritmisest tulenevatele moonutustele, saab uuritava tunnuse logaritmi suhtes rakendada peaaegu kogu normaaljaotuse arsenalit. Mõnevõrra raskemaks läheb, kui üsna jäik lognormaaljaotus ei kirjelda piisavalt hästi uuritava suuruse hajuvust. Siis on võimalik leida tunnuse jaotust hästi kirjeldav funktsioon juba gamma- või *Rosini-Rammleri* jaotuste seast. Kahjuks kaasneb sellele jaotusparameetrite rakendamise keerukus, tihti isegi võimatus. Seega kujuneb juhuslike suuruste jaotuse kirjeldamine, nagu kõik siin elus, optimaalse tee otsimiseks piiratud aja ja võimaluste ruumis, mille juures kriteeriumiks on tulemise lähedus seatud lõppeesmärgile.

1.2.3. Jaotuse analüüsi lihtsamad meetodid

Alustada tuleks mõõtmistulemite statistiliste parameetrite määramisest. Esimese järelduse võib teha juba eelpool toodud tulemeid vaadates (Tabel 4). Teadaolevalt langevad normaaljaotuse kolm keskvärtust – aritmeetiline keskmine, mood¹³ ja mediaan kokku. Viidatud tabelis on kõik keskmised ligilähedased, mis esmapilgul lubab eeldada normaalset jaotust. On aga teada, et normaaljaotuse püstakus¹⁴ ning asümmeetria võrduvad nulliga. Viidatud tabelis on püstakus negatiivne, mis tähendab, et jaotus on lamedapoolne, seega mitte eriti normaalne. Jaotusel on ka märgatav positiivne asümmeetria, mis viitab keskmisest suuremate väärtuse suuremale sagedusele. Piisava vilumuse puhul võib sellest teha mõningaid järeldusi B-kihi paksuse suhtes Eesti põlevkivimaardla Puhatu uuringuväljal. Näiteks:

- jaotuse lamedus võib viidata kihi anomaalsele paksusel välja mõnes osas,
- samas võib see olla sellest, et valim pärineb mitmest allikast – erineva kutsetaseme, tavade, oskuste ja vilumusega geoloogide töödest,
- esimest järeldust toetab ka positiivne asümmeetria.

Tulpdiaagramm e. histogramm visualiseerib statistilisi parameetreid. Pilt 1.8 on ühe arvukogumi kaks iseloomulikku joonist – tulp- ja joongraafik. Valim, mida graafikud kirjeldavad, koosneb sajast arvust. Arvud on tekitatud juhuslike arvude generaatoriga, järelikult peaks nende jaotus olema ligilähedaselt normaalne. Valimi ja jaotuse statistilised arv tunnused on graafikute all.



Asümmeetria	0.37
Hajuvusvahemik	0.42
Vähim	0.28
Suurim	0.70
Summa	46.81
Valimi suurus	100

Aritmeetiline keskmine	0.47
Keskmise standardhälve	0.0082
Mediaan	0.46
Mood	#N/A
Valimi standardhälve	0.082
Valimi dispersioon	0.0068
Püstakus	0.31

Pilt 1.8. Üsna normaalselt jaotuvate arvude jaotus.

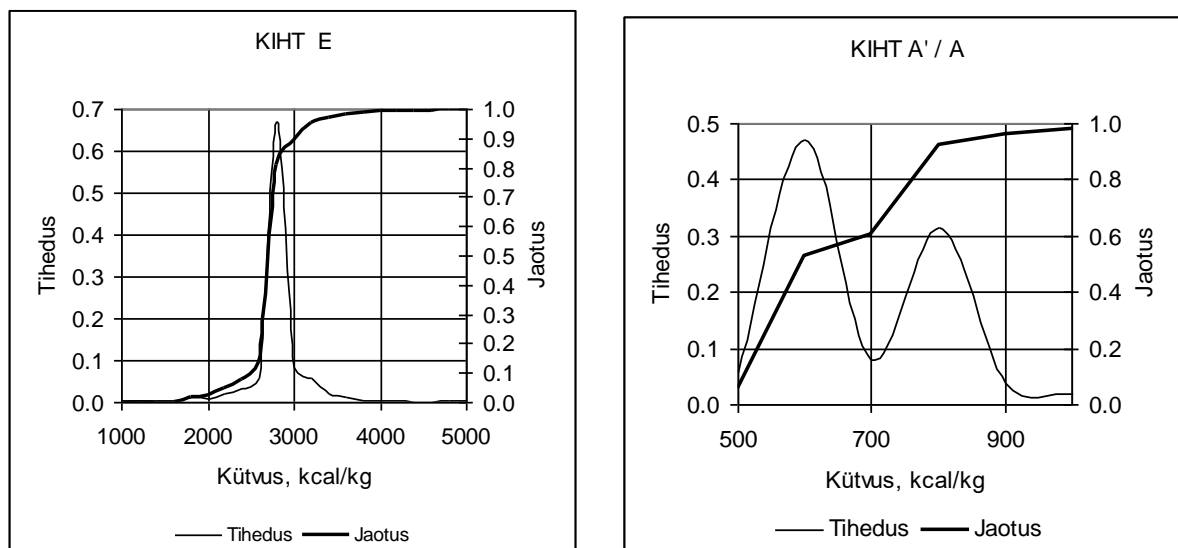
Vasakul tulpdiaagramm ehk histogramm, paremal joongraafik. Nagu näha, ei ole jaotusegraafikud sümmeetrilised, sujuvad ega siledad. Joongraafik viitab paarile “liigsele” arvule vahemikus 0.6...0.7. Kuid täpsem kontroll meetoditega, mida pakub matemaatilise statistika arsenal näitaks, et nende erinevus normaaljaotusest ei ole oluline vaid juhuslik.

¹³ Määratlemata täpsusega lugemite puhul ei pruugi *Exceli* programm modaalväärtust (moodi) määrata.

¹⁴ *Exceli* programm kasutab valemit, mille kohaselt normaaljaotuse püstakus võrdub nulliga.

Normaaljaotus on mugav kuid igav – temast ei järeldu mitte midagi peale selle, et kui ta kehtib, siis võib kasutada statistika tavameetodeid.

Palju huvitavamad on ebanormaalsed jaotused, mille näiteid esitab Pilt 1.9. Vasakpoolne graafik on väga suure püstakusega. Sellel on põlevkivi kütvuse (=kütteväärtus¹⁵) jaotus (ekstsess 22). Põhjus on ka teada – ekstreemalse püstakuse tekitavad mittejuhuslikud arvud siinses valimis. Need on sinna pandud, sest mõnest uuringupuuraugus määrati küll kihi paksus, kuid ei saadud materjali kihi kvaliteedi analüüsiks. Siis võeti ja omistati kihile kas naaberaugu proovi või uuringuploki keskmine kütvus. Nii käitatakse ka, kui kasutatakse geoloogilist andmestikku ajast, mil kütvuse proov oli tehtud aegunud meetodika järgi. Seega viitab tiheduse graafiku suur püstakus ja järsult tõusev jaotusfunktsioon andmete kohendamisele, millest levinum on puuduvate arvude asendamine teadaoleva keskvärtusega



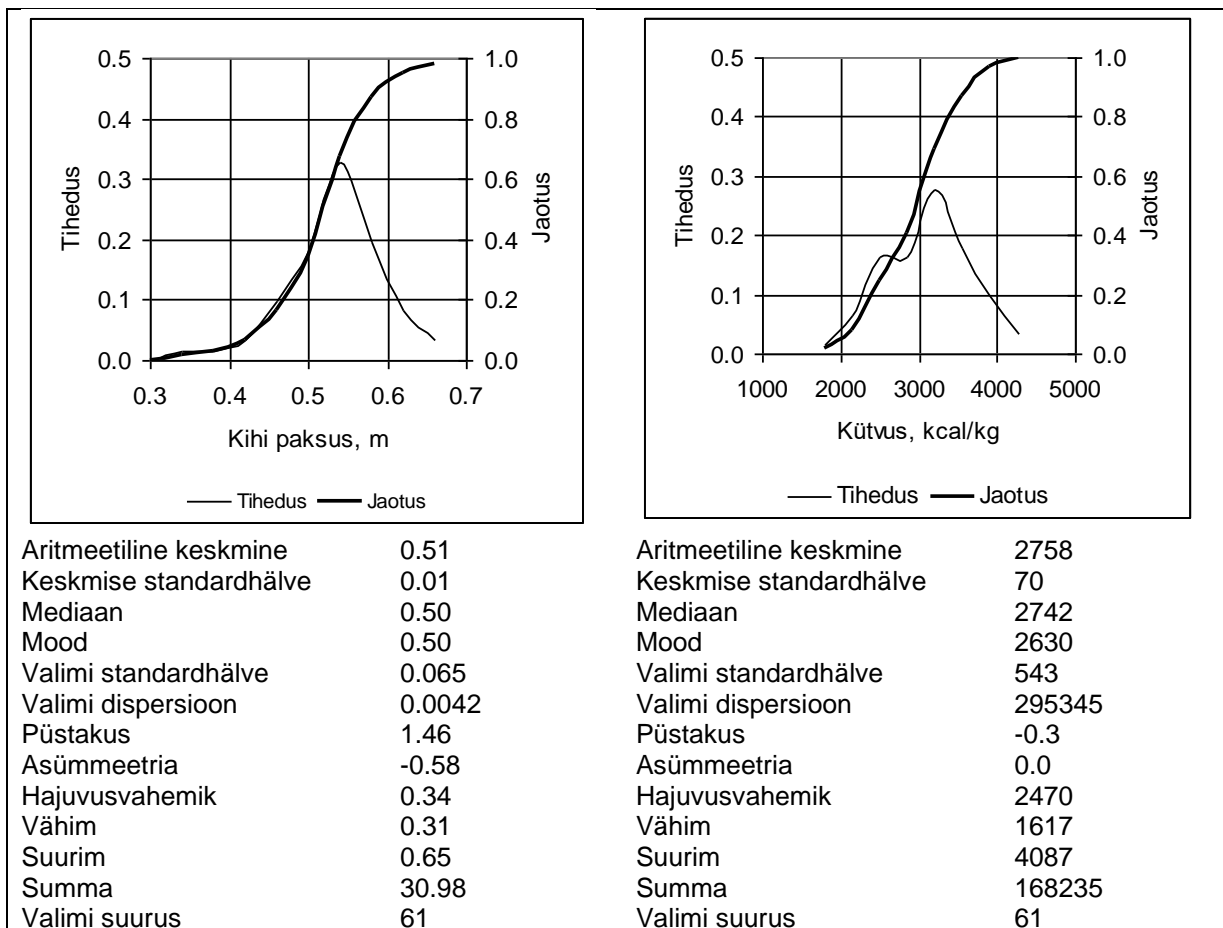
Pilt 1.9. Ebanormaalsed kütvuse jaotused Puhatu uuringuväljal.

Vasakul E-kihi ja paremal A'/A-kihi kütvus

Parempoolsel graafikul on ilmikas kahemodaalne jaotus, millest saab aru nii tiheduse graafiku kahe kühuru kui ka jaotusgraafiku aeglase ebasujuva tõusu kaudu. Selline jaotus iseloomustab juhuslikke arvusid, kui nende allikas on inimene, antud juhul uuringugeoloog. Jaotuse ebanormaalsust võime seletada mitme asjaoluga. Teame, et põlevkivi geoloogilisel uuringul hoitakse kokku paevahekihi proovimise arvelt. Kas seepärast, et kiht on esindusliku proovi jaoks liiga õhukene, või sagedamini, teades, et pae kütvus on nullilähedane – milleks seda mõõta. Teame ka, et varem oli levinud õhukese kihi kütvuse määramine mitmest südamikust võetud koondproovi alusel ja laboratoorse analüüsi tulem omistatakse kõigile puuraukudele, kust proov pärit. Nii näebki analüütik parempoolselt graafikult, et kord arvati, et põlevkivikihtide A ja A' vahelise õhkese paekihi (Pilt 2.20) kütvus on 600 kcal/kg, teine kord arvati, et on 800 kcal/kg ja mõnikord määrati kütvus ka laboris ja saadi tegelik arv.

Nii on jaotuste analüüsiga võimalik leida ning vältida vigu, kuid jaotuse analüüs on ka geoloogiliste "ebanormaalsuste", anomaalsete kohtade leidmise väga tõhus tööriist. Järgnevas on toodud Eesti põlevkivimaardla Narva karjääriväljal tehtud geoloogilise uuringu aruandest pärinevad E-kihi paksuste ja kütvuste jaotusgraafikud ning statistilised tunnused.

¹⁵ Selles õpikus kasutatav sõna 'kütvus' on 'kütteväärtuse' soovituslik lühem vorm. Analoogiline lühenemine leiab aset ka teistel erialadel, näiteks 'toitvus' = toiteväärtus. Siinsesse teksti kleebitud joonistes ja tabelites võib esineda ka vanamoodne 'kütteväärtus' ja selle vana ühik kcal/kg, mis on tavaline vanas geoloogilises andmestikus.



Pilt 1.10. E-kihi paksus (graafik A) ja kütvus (graafik B) Eesti põlevkivimaardla Narva karjääris

Siin toodud graafikud kõnelevad palju enam kui nende all toodud statistilised tunnused. Joonistelt, eriti kütvuse jaotusest on märksa paremini näha, et tegu pole mitte normaalse vaid pigem kahemodaalse jaotusega.

Tegemist võib olla sageli esineva uuringuveaga. Maavaralasuundi jaotamine kihtideks on üsna tinglik. Väga suurt kogemust nõudis geoloogidelt fosforiidikihi jaotamine. Aga probleeme võib tekkida ka põlevkivikihtidega milles kaks kihti, E ja F moodustavad ühtse paki (Pilt 2.20). Struktuuri poolest jaotub pakk viieks kihiks, kusjuures tavaliselt loetakse kaks alumist E-kihiks, kaks keskmist alumiseks F-kihiks indeksiga F_a või F_1 ja kõige ülemist osa ülemiseks F-kihiks indeksiga F_u või F_2 ¹⁶. Kihtide kütvus väheneb alt ülespoole – ülemised kihid on järjest madalama orgaanilise aine sisaldusega. Kuna vahekihid pakis puuduvad, on geoloogilisel uuringul kerge eksida E ja F eralduspinna määramisel. Nii võib lugeda E-kihiks kord kahte, kord kolme alumist kihti. Mõnikord võib selline eksimine olla taotluslik.

Kui E-kihiks on loetud kaks alumist kihti, siis on selle kihindi osa paksus väiksem ja kütvus kõrgem. Ja vastupidi, kui E-kihi koostisse on võetud kolm alumist kihti, saab paksema kuid vaesema kihi. Kui see juhtub või kui seda tehakse kord nii kord naa, tekib kahest arvukogumist koosnev kahemodaalne valim. Millelegi sellisele vihjavad ka siin esitatud joonised ning piltide all esitatud statistilised tunnused, eriti negatiivne püstakus.

Samas ei pruugi sugugi tegemist olla vea, eksimuse või mõõtmisraskusega. Täiesti võib olla, et sellel uuringualal, mille suurus on veerandsada ruutkilomeetrit, võib esineda anomaalseid kohti, kus E-kiht on normaalsest erineva paksuse ja kütteväärtusega. Eesti põlevkivimaardla geoloogilise uuringu ajaloost on teada juhtum, kui põlevkivikihtide keskel lasuva C/D paekihi anomaalne suidumine ja koostise muutumine Kohtla-Sompa-Ojamaa kaeveväljade piirkonnas ning sellele kaasnev põlevkivikihtide suurem paksus arvati uuringuveaks. Alles siis, kui mäetööd lähenesid anomaalsele alale ning hakkas ilmema midagi kahtlast, asus geoloog Vello Kattai asja uurima ning piiritles varasemate

¹⁶ Eesti geoloogide (Gorry Jürgenfeld) algatusel jaotati möödunud sajandi kuuekümnendatel F-kiht kaheks, indeksitega F_a ja F_u , sest tootsa kihindi peal, F ning G-kihtide vahel oli Eesti Põlevkivi kauaaegne geoloog Maksim Gazizov juba varem määratlenud viis põlevkivikihti indeksitega $F_1...F_5$. Põlevkivist vähe teavad Giprošanti insenerid aga indekseerisid omamoodi – F_1 ja F_2 .

uuringuaruannete kriitilise analüüsi tulemusel laialdase, kombainkaevandamiseks äärmiselt soodsa lasumusrikke. Seepärast, jaotuse ebanormaalsust märgates tuleb alati kaaluda, mis on mõistlikum, kas:

- lugeda ebanormaalne juhtum veaks ja ära siluda, või
- arvata, et see võib olla viide millegi uue avastamiseks.

Esimesel juhul võib maha magada avastuse¹⁷, teisel juhul võib saada naerualuseks. Tavaliselt eeldatakse, et tegu on esimese juhtumiga, sest vigu tehakse palju sagedamini kui avastusi.

1.3. Andmestiku eelanalüüsist

Eelpool märgitud geoloogiliste andmete käitlemise võtte – puuduvate arvude asendamine keskmisega ei tarvitse alati olla viga või pettus vaid pigem vajadus. Loodusobjekti uurimisel ei õnnestu kunagi hankida piisavalt palju teavet. Enamasti on andmed puudulikud, tihti lünklikud. Lünklikkuse tõttu võib ilmned, et ühe mõõtetulemi puudumise tõttu tuleb kõrvale heita kogu valim. Siis tekibki küsimus – mis on otstarbekam, kas täita lünk tõenäolise arvuga, milleks võib olla teiste sama objekti mõõtmistulemite keskväärtus või siis loobuda lünklikust valmist. Andmete hankimiseks aga oli tehtud palju tööd. Ilmekaid näiteid selliste otsuste kohta leiab põlevkivi uuringu aruannetest.

Näide 7. Põlevkivi varuplokkide usaldatavuse analüüs

Eesti maardla põlevkivi tootsa kihindi tavapäraseks koosluseks loetakse seitset põlevkivikihti ja viite pae vahekihti. Aja jooksul välja kujunenud uuringu meetodika näeb ette kõigi kaheteistkümneme kihi mõõtmist ja proovimist. Tulemuste alusel arvutatakse kihindi tööstuslikud tunnused, millest peamine on kihindi tootlus. Kui puuraugu proovimisel ei õnnestu saada ühte kaheteistkümnest proovist, on ülejäänud üksteist kasutatud. Samas on teada, et põlevkivi, ja veelgi enam, pae omadused on vähemuutlikud. Mis tähendab, et lünkade täitmine lähedaste andmetega ei peaks tekitama olulist viga.

Niisiis, tuleb otsustada, mis on oluline ja mis mitte. Järgnevas tabelis on näide Eesti põlevkivimaardla Seli uuringuvälja plokk nr 2 välitöö ja laboratoorse määrangute tulemustest ning andmete esmatöötlustest. Nagu näha, on kihtide paksuste maatriks täielik – lünki ei ole. Kütvuste maatriksis on aga kuus tühja kohta. Siinkohal tuleb rõhutada andmetöötluste alustöde – null ei ole tühik ega vastupidi. Kütvus "0" tähendab, et kiht on mõõdetud, kuid proovimise tulemusel või proovija arvates sellel kihil ei ole kütvust. Tühik tähendab, et mõõtmistulemust ei ole ja me ei tea objekti seda tunnust. Töötlemise huvides ei tule tühja lahtrisse panna ei kriipsu "-" ega muud märki, tühiku koht peab olema tühi. Meie näites on seda reeglit rikutud ja pandud tühikute asemele küsimärk – et mida tühikuga teha?

Maatriksid koosnevad valimitest, milleks on kihtide mõõtmistulemused. Esmatöötluste käigus on arvutatud valimite aritmeetilised keskmised (x_{AVG}), standardhälbed (s), dispersioonid (D) ning näidatud valimi suurus (n). Kõik need tehted on sooritatavad andmetöötlusprogrammide abil. Andmete esinduslikkuse arvutusliku kontrolli esmaseks toiminguks on valimi usaldusrajade määramine. Lähtutakse eeldusest, et usaldusväärsed andmed peaksid mahtuma mingitesse mõistlikesse rajadesse. Kui ei mahu, siis on tegu kas (jämeda) veaga või anomaalse hälbega. Mõõnduse hinnaga loetakse mõõtmistulemi (x) usaldatavaks, kui ta on vahemikus

$$x_{AVG} \pm t s$$

või

$$x_{min} = x_{AVG} - t s \dots x_{max} = x_{AVG} + t s$$

kus: x_{AVG} on valimi aritmeetiline keskmine, s – valimi standardhälve ja t – *Studenti* kordaja ning x_{min} ja x_{max} valimi alumine ja ülemine tõenäoline raja. *Studenti* kordaja määramise aluseks on valimi vabadusastmete arv $f = n - 1$ ja usaldatavuse tase P . Kuna usaldusrajad on mõlemal pool keskväärtust, siis on tegemist kahepoolse usaldusvahemikuga (-rajadega). P väärtuse valimine on uurija teha. Vaikimise võetakse $0,95 = 95\%$. Nii eeldatakse, et tõenäosusega 95% peaksid mõõtmistulemused olema usaldusvahemikus. Vastavad arvutustulemused on järgneva tabeli viimastes veergudes.

¹⁷ Sellist juhtumit fosforiidi uuringul kirjeldab Arvo Valton (mäeinsener Arvo Vallikivi) ühes oma jutustuses geoloogidest.

Tabel 14 Põlevkivi geoloogilise uuringu mõõtmistulemuste näide

Puuraukude numbrid											Esmase töötlemise tulemused							
	7722	6048	6099	6095	7739	6031	6046	6254	6033	6032	Keskm	Stand	Disp	n	t	Min	Max	
Kihid	Kihtide paksus, m																	
E	0.38	0.45	0.59	0.55	0.52	0.55	0.50	0.40	0.40	0.50	0.48	0.073	0.0053	10	2.26	0.32	0.65	
E/D	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.08	0.06	0.09	0.05	0.06	0.06	0.016	0.0002	10	2.26	0.03	0.10	
D	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05	0.08	0.06	0.010	0.0001	10	2.26	0.04	0.09	
D/C	0.17	0.25	0.32	0.29	0.28	0.31	0.31	0.17	0.26	0.29	0.27	0.055	0.0030	10	2.26	0.14	0.39	
C	0.40	0.45	0.30	0.32	0.42	0.32	0.30	0.55	0.35	0.28	0.37	0.085	0.0073	10	2.26	0.18	0.56	
C/B	0.19	0.11	0.21	0.27	0.05	0.22	0.22	0.15	0.18	0.26	0.19	0.068	0.0046	10	2.26	0.03	0.34	
B	0.41	0.45	0.34	0.30	0.34	0.36	0.34	0.32	0.42	0.29	0.36	0.053	0.0028	10	2.26	0.24	0.48	
B/A'	0.20	0.19	0.16	0.22	0.19	0.20	0.20	0.19	0.18	0.20	0.19	0.016	0.0002	10	2.26	0.16	0.23	
A'	0.07	0.05	0.08	0.07	0.09	0.08	0.10	0.06	0.08	0.07	0.08	0.014	0.0002	10	2.26	0.04	0.11	
A'/A	0.03	0.04	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04	0.009	0.0001	10	2.26	0.02	0.06	
A	0.10	0.10	0.11	0.11	0.10	0.09	0.10	0.12	0.10	0.10	0.10	0.008	0.0001	10	2.26	0.08	0.12	
Kihind	2.09	2.22	2.27	2.3	2.14	2.31	2.23	2.13	2.12	2.18	2.20	0.079	0.0239					

Kihid	Kihide kütteväärtus, kcal/kg										Keskm	Stand	Disp	n	t	Min	Max
E	2580	?	2660	2080	1990	2190	2580	2140	2310	2120	2294	250	62603	9	2.31	1716	2872
E/D	400	640	610	620	990	640	400	470	630	470	587	173	29868	10	2.26	196	978
D	1860	?	1690	1930	?	?	1830	1860	1880	1530	1797	139	19390	7	2.46	1455	2140
D/C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	2.26	0	0
C	2950	3020	3780	2830	2340	2540	2720	300	3120	3130	2673	920	846423	10	2.26	594	4752
C/B	570	540	0	810	790	920	1240	670	1340	900	778	377	142484	10	2.26	-75	1631
B	3730	3580	4550	4110	4460	0	4420	4020	4360	4140	3737	1350	1823312	10	2.26	685	6789
B/A'	0	310	290	0	0	0	0	0	320	0	92	148	21996	10	2.26	-243	427
A'	1610	2070	1920	1900	1700	1610	1840	1720	1690	1850	1791	150	22366	10	2.26	1453	2129
A'/A	940	630	598	540	520	730	440	530	520	530	598	143	20573	10	2.26	274	922
A	?	3500	3260	3310	3150	3180	?	3060	3380	3090	3241	151	22727	8	2.37	2884	3599

Mõõtmistulemuste võrdlemisel usaldusrajadega paistab, et kihtide paksuste mõõtmisel suuri kõrvalekaldumisi kihtide keskmistest ei esine. Seega pole kohendamine vajalik. Kui aga mõnes puuraugus oleks mõõdetud mõne kihi oluliselt suurem või väiksem paksus, tulnuks vaadata, kas naaberkiht samas puuraugus pole mitte samavõrra õhem või paksem. Antud juhul me sellist hälvet ei märganud, mis aga ei välista, et südamikute mõõtmistulemused olid juba välitöö ajal tasandatud.

Andmete kohendamise vajadus tekib kütvuste maatriksis. Peale mitme tühiku, mis ei takistanud statistiliste parameetrite arvutamist, selgub et kaks pae vahekihi kütvuse määrangut (tabelis poolpaksus kirjas) on suuremad kui vastav ülemine raja. Lähemalt vaadates on näha, et ületamised on tühised, eriti kui arvestada, et kütvuse mõõtmise veaks kalorimeetriselises pommis loetakse ± 30 kcal/kg. Pealegi, mitmel paekihil näikse alumine raja olevat negatiivne, mis viitab sellele, et sümmeetriline *Studenti* jaotus ei ole nähtuse kirjeldamiseks parim¹⁸. Pigem on tegu positiivselt asümmeetrilise jaotusega, mille puhul sümmeetrilise jaotuse ülemise raja väikene ületamine on tavaline. Seega järeldus – mõõtmistulemused on kõik lubatavates vahemikes. Sellest omakorda tuleneb märksa tõsisem järeldus – põlevkivi kütvuse mõõtemääramatus on väga suur, üksikmõõtmise variatsioonikordaja

$$V = S / X_{AVG} < 0.4 = 40 \%$$

Agas mida teha tühikutega tabelis? Vaadates veel kord näitena toodud maatrikseid, näeme, et puuraukudes mõõdetud kihtide paksused on kokku liidetud ja nii on saadud tootsa kihindi paksus igas mõõtmiskohas. Teise maatriksiga seda tehtud ei ole, sest kihtide kütvused on kvalitatiivsed tunnused ja neid summeerida ei tohi¹⁹. Seepärast ei tohi ka arvutada kütvuste keskväärtusi puuraukude kaupa, sest keskmise valem sisaldab liitmistehet. Tootsa kihindi keskmine kütvus (proovimiskohas, puuraugus) leitakse energiatootluse ja massitootluse jagatisena. Tootluste arvutamiseks on vaja teada kõigi tootsas kihindis osalevate kihtide mahumassi. Mahumass on funktsioon kütvusest – mida rohkem on põlevkivis orgaanilist ainet, seda kergem ta on. Järelikult, et arvutada keskmist kütvust igas puuraugus, on vaja teada selles kõigi kihtide kütvust. Toodud näites on viies puuraugus kütvus lünklik. Loobudes lünklikest veergudest (puuraukudest), jääksime ilma poolest andmestikust, sest ploki kohta on andmeid vaid kümnest puuraugust. Tundub, et see on kaalukas põhjus lünkade täitmiseks vastava kihi kütvuse aritmeetilise keskmisega.

¹⁸ Paekivi kütvuse tunnuseks võib küll olla negatiivne arv. Sel juhul tähendab see lubimineraalide lagundamisele kuluvat soojushulka, millega tuleb arvestada põlevkivi ja pae koospõletamisel. Geoloogilise uuringu käigus selliste, tarbimisviisist sõltuvate peensusetega ei arvestata.

¹⁹ Lisateadmist – ka standardhälve on kvalitatiivne tunnus ehk mittesummeeritav. Küll on aga liidetavad dispersioonid, millede summa ruutjuur on kogumi standardhälve. Peamiselt selle tehte sooritamiseks ongi maatriksites dispersioonide veerg.

Ükskõik, milliseid kohendusi, asendusi, parandusi ja andmestikusi ka ei tehtaks, tuleb need ära märkida, selgitada ning põhjendada

Kui on otsustatud lüngad täita keskväärtustega, selgub, et standardhälbed ja dispersioonid muutusid väiksemaks. See on näiv, tuleneb asjaolust, et tavaprogramm loeb kõiki arvusi, juhuslikeks. Arvukogumisse (valimisse) lisatud keskväärtus ei ole juhuslik ega suurenda vabadusastmete arvu. Tegelikult ju valimi hajumisvahemik ei vähenenud. Seepärast ei tohi unustada, et andmestiku õiged statistilised tunnused on need, mis saadi enne kohendamist, ega tule ka pärast lünkade täitmist asuda uuesti kontrollima mõõtmistulemuste vastavust lubatavatele kõrvalekaldumistele.

Siin üsna pealiskaudselt käsitletud meetodika on põhjalikult ja põhjendatult toodud TTÜ geotehnoloogia bakalaureuseõppe tööjuhendis Infotöötlus mäenduses lk 25...30²⁰. Selle meetodika järgi on arvatud põlevkivi aktiivse varu plakkide suurus ja usaldatavus.

1.4. Purdmaterjali jaotuse analüüs

1.4.1. Purdmaterjalid

Purdmaterjalina käsitleme looduslikke setteid – tolmu, liiva, kruusa, veeriseid aga ka tehismaterjale – kaevist, killustikku, sõelmeid. Tavakeeles iseloomustatakse purdmaterjali enamasti osiste suuruse järgi: liiv on peen, kruus on jäme, lõhatud paas on panklik. Võib iseloomustada ka osiste jaotuse järgi, näiteks paekillustik on sõmer, peenliiv tihe. Purdmaterjali uuritaksegi terasuuruse alusel, tehes seda sõeludes. Kuna üksikuid osiseid ei mõõdetata, siis käsitletakse neid kui juhuslikke objekte ja osiste mõõtmeid kui juhuslikke suurusi. Sellest tulenevalt on purdmaterjali hindamise meetodikal palju ühisjooni matemaatilise statistika võtetega.

Purdmaterjali jaotuse uurimine algab materjali klassifitseerimisest, mida võib teha mitmel moel, kuid enamasti on selleks sõelumine. Klassifitseerimise väljundiks on tabelid ja (jaotus)graafikud. Paljude uurimis- ja projekteerimisülesannete lahendamisel ei ole tabelid piisavalt informatiivsed. Näiteks, kui projekteeritakse kaevise töötlemisõlme. Tekib raskusi, kui tuleb hinnata mõne sellise klassi (purdmaterjali osa) kogust, mida klassifitseerimisel ei määratud – ei kasutatud selliseid sõelu. Sel juhul kasutatakse empiirilist jaotusgraafikut. See pole aga piisavalt täpne, sest nii võetakse arvesse vaid osa klassifitseerimisel saadud teabest. Samal põhjusel ei saa väga täpset tulemust ka siis, kui soovitakse purdmaterjali jämeduse hindamiseks kasutada osise keskmist suurust. Ületamatud raskused tekivad, kui on vaja hinnata purdmaterjali eripinda, gaasiläbivust jne. Sel juhul on paratamatu purdmaterjali jaotuse matemaatiline kirjeldamine.

Nende meetodiliste küsimuste paremaks mõistmiseks on kättesaadavad õpik Mäemajandus²¹ (p 2.5.1) ja juba mainitud tööjuhend Infotöötlus mäenduses (lk 14).

Üheks purdmaterjali tunnuseks on osiste suuruse keskväärtus, keskmine tera- või tüki suurus. Erinevalt matemaatilisest statistikast, kus enamasti opereeritakse aritmeetilise keskmisega, kasutatakse purdmaterjali puhul keskväärtusena mahukeskmist, mediaani, mis on märksa esinduslikum ja mida tehniliselt lihtsam määrata kui aritmeetilist keskmist²². Pole ju võimalik materjali osakesi üksikhaaval mõõta ja kokku lugeda, neid saab ainult sõelumise teel jaotada, klassifitseerida. Nii ongi purdmaterjali keskmine terasuurus defineeritud kui sõela selline ava, mida läbib pool sõelutud materjalist.

Erijuhul on purdmaterjali jaotuse iseloomustamiseks kasutatud ka teisi statistilisi parameetreid. Näiteks suuri rändrahnusi (Pilt 1.11), mis tegelikult on ju purdmaterjali osised, jaotas professor Enn Pirrus ümbermõõdu moodi²³ alusel.

²⁰ Reinsalu, E. Infotöötlus mäenduses, 2007, <http://digi.lib.ttu.ee/i/?154>

²¹ Reinsalu, E. Mäemajandus, 2008, <http://digi.lib.ttu.ee/i/?164>

²² Aastal 2007, kui ilmus käesoleva õpiku digiversioon, tuli mulle täieliku üllatusena, et "keskmine palk" Eestis on aritmeetiline keskmine, mitte mediaan. Pean oma kohuseks vabandada kõigi nende üliõpilaste ees, kellele ma olin mediaani näitena esitanud Eesti Statistikaameti avaldatud keskmist palka.

²³ mood, moodi – juhusliku suuruse tõenäosim väärtus



Pilt 1.11 Muuga Kabelikivi ja tema satelliitide maast välja ulatuvad osad



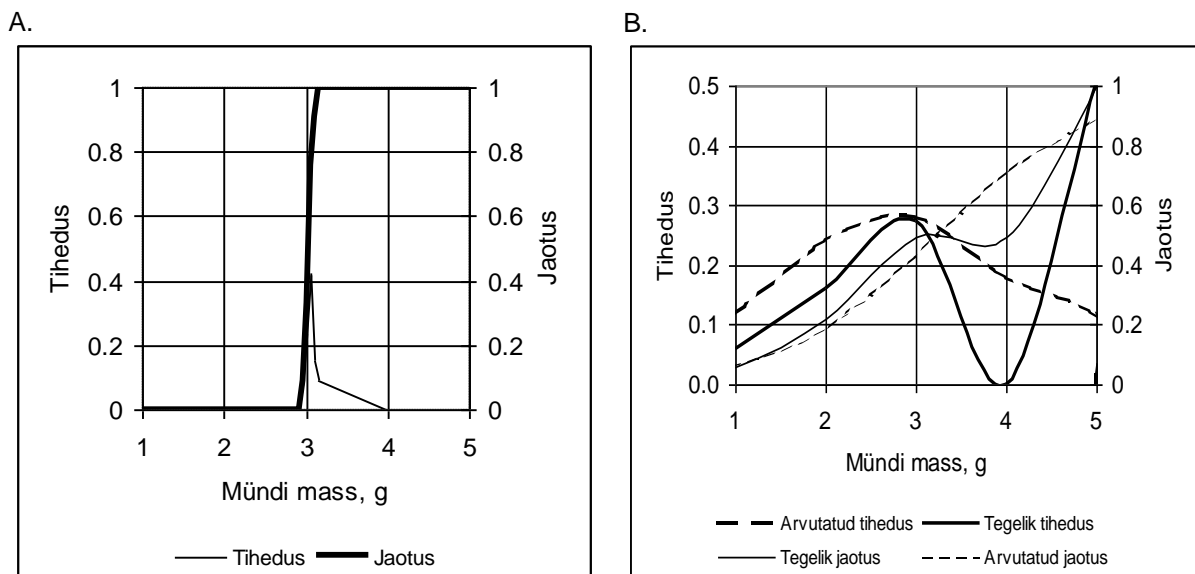
Pilt 1.12. Kaks 99-grammist komplekti nõukogude vene münte ja nende jaotumine

Ent, nii nagu mistahes juhusliku suuruse puhul, ei saa ka purdmaterjali iseloomustamisel piirduda ainult osiste keskmise suurusega. Vaadake pilte, kus purdmaterjaliks on nõukogude vene pronksmündid. Valitud müntide iseloomulik omadus ja sisuliselt ka nende ainuke püsiväärtus on see, et number nende reversil (nominaalväärtus) võrdub münti massiga grammides.

Pildil on kaks massi ja väärtuse poolest võrdset müntidekogumit ehk valimit kogumassiga 99 g, mõlemas valimis 33 münti. Järelikult on mõlema kogumi keskvärtus võrdne = 3 g (=kopikat). Kuid pildi ülalpoolel on ainult kolmegrammised müntid, alumine valim koosneb müntidest nominaaliga 1, 2, 3 ja 5 kop (vastavalt 6, 8, 9 ja 10 tk).

Seega – valimid ei ole võrdsed, sest nende jaotus ei ole identne.

Ülemine müntidekogum on näide sorteeritud valimist, alumine kujutab endast juhuslikku valikut. Vaatleme nende kogumite jaotusgraafikuid (Pilt 1.13)



Pilt 1.13 Eelmisel pildil olnud müntide jaotusgraafikud.

Ühesuguse nominaaliga kulunud müntide jaotust (A) iseloomustaval graafikul on näha, et sorteeritud osiste tihedus on väga püstak, keskmise ümber koondunud. Jaotuse graafik tõuseb keskvärtuse kohal järsult üles. Mida uuemad on müntid, seda väiksem on jaotusvahemik. Tihedus ja jaotusfunktsiooni

arvutatud väärtused on leitud *Solver*-meetodil (p 1.4.3). Erineva nominaaliga, sorteerimata müntide jaotus (B) on teistsugune – kogum kujutab endast juhuslikku valimit²⁴. Jaotuse muudab kahemodaalseks 3 ja 5-grammiste müntide suurem esinemissagedus valimis. Tihedus ja jaotusfunktsiooni arvutatud väärtused on samuti leitud *Solver*-meetodil.

Müntide varal üritasin näidata, et hästi sorteeritud kogumeid saab iseloomustada ühe tunnusega, juhusliku jaotuse iseloomustamiseks ühest ei piisa. Just samuti ei piisa ka loodusliku purdmaterjali iseloomustamiseks ühest tunnusest. Neid peab olema vähemalt kaks – üks iseloomustamaks materjali üldist (keskmist) terasuurst, teine – osiste jaotumist.

Ühe tunnusega saab iseloomustada vaid mittejuhusliku jaotusega, s.t sorteeritud, klassifitseeritud materjali ja sedagi vaid tinglikult. Näiteks mineraalse purdmaterjali kaubastamisel ning kasutamisel sõelutakse kaevis klassidesse, mille tunnuseks on klassi rajad. Mõnel juhul asenduvad klassi rajad ühe mõõtmega: veerised üle 150 mm, paepeenes alla 5 mm, peenpõlevkivi alla 25 mm. See on juhul, kui osiste klassisisene jaotus ega mõõtmete rajad ei oma tähtsust. Kui nad siiski omavad, siis iseloomustatakse klassi rajade kaudu, näiteks killustik 10...20 mm, mis aga siiski on sisuliselt üks, keskmisele taandatav mõõde²⁵.

Tihti kasutatakse loodusliku purdmaterjali puhul ka leppelisi tunnuseid, näiteks ehitusliiva puhul nn peensusmoodulit.

1.4.2. Purdmaterjali tavalised jaotused

Astmajaotus

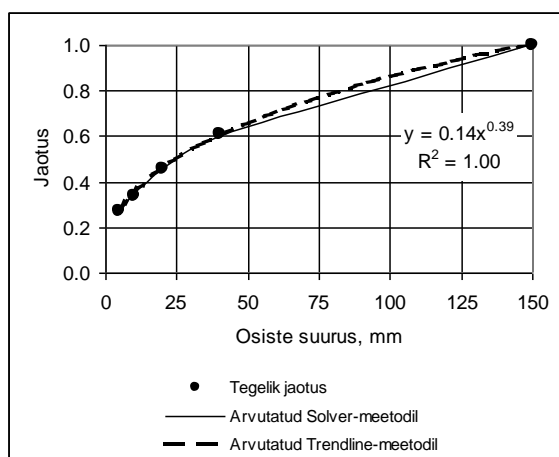
Astmajaotust²⁶ (Pilt 1.14) kirjeldab valem

$$y = A x^n, \text{ mis kehtib vahemikus } 0 < y < 1$$

Valemis: x – sõela ava läbimõõt, mm, y – purdmaterjali vastavat ava läbiv (sõelalune) osa; kui sõelumisel arvutatakse saagiseid protsentides, siis 100 % = 1 osa, 50 % = 0,5 osa jne; A – tolmus, jaotustunnus, mis iseloomustab materjali peensust, sisuliselt see osa materjalist, mis läbib ava läbimõõduga 1 mm; n – sõredus, jaotustunnus, mis iseloomustab osakeste jaotuse ühtlust.

Astmajaotuse puhul on keskväärtus (*mediaan*) arvutatav valemiga

$$Me = (0,5 / A)^{1/n}$$



Pilt 1.14. Kruusa osiste jaotus

Astmajaotuse näiteks sobib kõrval olev graafik. Tegemist on tüüpilise kruusaga, milles on esindatud kõik osised savist konglomeraatideni. Sellest proovist on konglomeraadid välja jäänud. Õigemini, neid oli nii vähe, et nad proovi ei sattunud. Jaotus on astmefunktsiooniga väga hästi kirjeldatav ($R^2 \cong 1$), kusjuures eri meetoditega (p 1.4.3) saadud tulemused langevad kokku. Jaotustunnused on leitud kahel moel:

Trendline-meetodil

$$A = 0,1418, n = 0,3911, Me = 25,09 \text{ mm}, R^2 \cong 1$$

ja *Solver*-meetodil

$$A = 0,1431, n = 0,3886, Me = 25,02 \text{ mm}, \text{ ja dispersioon } D^2 = 8,5 \cdot 10^{-5}$$

²⁴ Rangelt võttes muidugi alumine mündikogum ei ole juhuslik valim. Et kokku saada just sellist kogumit, tuli kasutada Exceli *Solver*-meetodit, optimeerimismenetlust, millest edasises korduvalt juttu tuleb.

²⁵ Siiski oleks ekslik arvata, et klassi keskmine terasuurus on rajade keskmine, näiteks 10...20 mm puhul $(10 + 20) / 2 = 15$ mm. Osakesed ei jaotu klassis kunagi ühtlaselt, seepärast on ka antud näite puhul keskmine terasuurus alla 15 mm. Seda tuleb kindlasti arvestada purustus-sorteerimisseadmete valimisel ja projekteerimisel.

²⁶ Venekeelses kirjanduses Andrejevi, läänemaades *Gates-Gaudin-Schuhmanni* jaotus, mis viitab paljudele autonoomsetele esmakasutajatele.

Astmejaotus kirjeldab laialdase terasuurusega, sorteerimata purdmaterjali.

Rosini-Rammleri jaotus

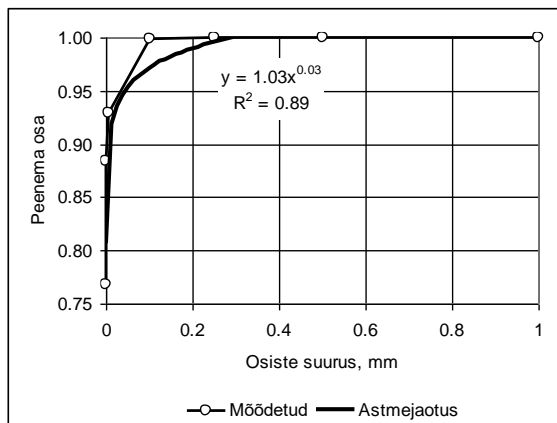
Rosini-Rammleri jaotust (tuntud ka kui Weibulli jaotus) kirjeldab valem

$$R = \exp -(x / x_{0,63})^n$$

kus: $R = 1 - y$ on sõelapealne osa ehk täisjääk, $x_{0,63}$ - jaotustunnus, mis iseloomustab materjali jämedust, sisuliselt sõela ava, millest läheb läbi 0,63 osa materjalist ²⁷, n - jaotustunnus, mis iseloomustab materjali sõredust: Kuigi siinne n on sisult sama, erineb ta astmejaotuse vastavast parameetrist.

Keskmine terasuurus arvutatakse

$$Me = 0,693^{1/n} x_{0,63}$$



Pilt 1.15. Kontinentaalse peeneteraline aleurolitse savi osiste jaotus.

Kõrval pildil on ülipeene materjali jaotus ²⁸. Peene peliidi ($x < 0,0001 = 10^{-3}$ mm) osalus proovis on 76,8 %, seega osakeste mõõtmete keskvärtus on alla 0,0001 mm, väiksem, kui pisima osakese määramise täpsus. Kui suur see siiski võiks olla? Üks selle materjali osiste suuruse keskvärtuse hindamiseks on jaotuse analüüs. Pildil on näidatud, kuidas see võiks olla tehtud materjali kirjeldamisel astmejaotusega. Kasutatud on lihtsaimat, *Trendline*-meetodit ja saadud:

$$A = 1,03, n = 0,027, R^2 = 0,89, Me = 1,9 \cdot 10^{-12} \text{ mm}$$

Kuivõrd tulemus tegelikult kirjeldab, jääb selle õpiku käsitusvaldkonnast välja.

Logistiline funktsioon

on tuntud ka kui logistiline funktsioon

$$y = B / (1 + \exp (b - ax)) + A$$

või

$$y = B / (1 + b \exp - ax) + A$$

kus A , B ning a ja b on empiirilised tunnused ²⁹.

Funktsiooni nimetus tuleneb sellest, et temaga saab kirjeldada selliste protsesside kulgu, kus funktsioon y siirdub argumenti x mingis vahemikus tasandilt A tasandile B . Funktsiooni esimene tuletis kirjeldab siirde kiirust. Kui funktsioon kirjeldab objekti olekut mõõtvat tunnust, võib nende valemitega kirjeldada objekti elu kulgu. Objekt sünnib olekus (tasandil) A . Edasi toimub areng kasvava kiirusega, kuni kasvuressurss hakkab vähenema. Seetõttu kasvu kiirus aeglustub kuni areng muutub taandarenguks. Jõudnud tasandile B , igasugused muutused objekti olekus lakkavad, objekt sureb. Logistilist funktsiooni on edukalt kasutatud mitmesuguste isearenevate koosluste nagu bakterikolooniate, impeeriumite jne eluea kujutamiseks. Ka maardla ammendamise kirjeldamiseks logistilise funktsiooniga, kusjuures $B - A$ on maavara kaevandamisväärne kogus maardlas ja funktsiooni esimene tuletis aja järgi kirjeldab aastatoodangut.

Logistilise funktsiooni erimit, milles $A = 0$ ja $B = 1$ saab kasutada jaotusfunktsioonina

$$y = 1 / (1 + \exp (b - ax))$$

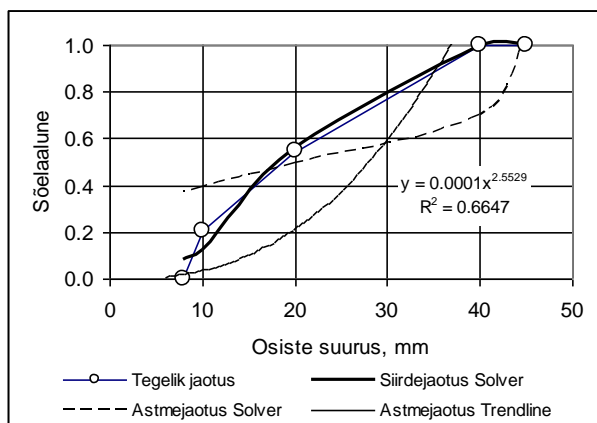
²⁷ Huvilistele: $0,63 = 1 - 1 / \exp 1$, tingimusest $x_{0,63} = x$

²⁸ Savide petrograafilis-mineraloogilise uurimise meetodiline juhend, *Gosgeoltehzdat*, Moskva, 1957, tabel 3, lk 42 (vene k)

²⁹ Siinne A ei ole sama, mis astmejaotuse tunnused

mille keskvärtus on

$$Me = b / a$$



Pilt 1.16. Varem (Pilt 1.14) kirjeldatud kruusast välja sõelutud klassi 5...40 mm jaotus

Kõrval pildil on näide logistilise funktsiooni kasutamisest sõelumisega sorteeritud kruusa jaotuse kirjeldamiseks. Astmejaotus, mis suurepäraselt kirjeldas sõelumata kruusa (Pilt 1.14) sorteeritud materjalile enam ei sobi. Vaadake tulemusi:

Astmejaotus *Trendline*-meetodil:

$$A = 0,0001, n = 2,55, R^2 = 0,66, Me = 22,0 \text{ mm}$$

ja *Solver*-meetodil

$$A = 0,043, n = 0,84, D^2 = 0,19, Me = 18,4 \text{ mm}$$

Samas logistilise funktsiooni kasutamisel saame tulemuseks:

$$a = 0,219, b = 4,15, D^2 = 0,048; Me = 18,9 \text{ mm}$$

Kuigi mõlema jaotuse puhul saime *Solver*-meetodit kasutades ligilähedase keskvärtuse, näeb graafikuid silmitsedes, et osakeste jaotust klassi sees kirjeldab parimal moel ikkagi logistiline funktsioon. Selle kasuks räägib ka neli korda väiksem dispersioon (D^2), mis tähendab kaks korda täpsemat arvutustulemust. Toodud näide peaks selgitama ka, et klassi 5...40 mm keskmine terasuurus ei ole mitte $(5 + 45) / 2 = 25$ mm vaid 18...19 mm, sest klassi sees, nii nagu ka sõelumata kruusas valdab peenemate terade osalus. Seega

logistilist funktsiooni saab kasutada sorteeritud materjali kirjeldamiseks.

Purdmaterjali jaotuse kirjeldamise täpsus on oluline mitmesuguses projekteerimistöös. Siin kirjeldatud jaotusseadusi on kasutatud põlevkivikaevise sõelumise ja purustamise modelleerimisel Estonia, Uus-Kiviõli ja Ojamaa kaevanduste rikastusvabrikute projekteerimisel ja nende töö optimeerimisel.

1.4.3. Purdmaterjali jaotuse hindamise meetodid

Teeme nüüd selgemaks, mis on need jaotuse hindamise *Trendline*- ja *Solver*-meetodid, mida eelnevad korduvalt mainisin. Mõlemad meetodid on kasutatavad *Excel*-keskkonnas.

Trendline-meetod

on lihtne, kui purdmaterjali jaotust kirjeldada astmejaotusega. Koostatakse sõelumistulemuste tabel, mille ühes veerus on sõelte avad ja teises sõelu läbivate osade (sõelaaluse osa) saagiseid. Nende alusel koostatakse graafik ja sooritatakse protseduurid: *Add Trendline* \Rightarrow *Power* \Rightarrow *Options* \Rightarrow *Display equation on chart* \Rightarrow *Display R-squared value on chart*. Joonisele kuvatakse valem, mille kordajad on sisuliselt jaotustunnused A ja n . Korrelatsioonikordaja ruut R^2 näitab, kui hästi valitud funktsioon materjali jaotust kirjeldab.

Rosini-Rammleri jaotuse kontroll on veidi keerukam. Tuleb arvutada täisjääk

$$R = 1 - y,$$

et luua uus muutuja

$$z = - \ln R = - \ln (1 - y)$$

mille tulemusel tekib astmejaotusega sarnane astmefunktsioon

$$z = B x^n$$

Andmestiku töötlemiseks lisatakse arvutustabelisse z-veerg, millega toimitakse samuti kui astmejaotuse puhul y-veeruga. Jaotustunnus n loetakse samuti graafikult, kus ta on ilmutatud kujul. Teine jaotustunnus tuleb arvutada:

$$x_{0,63} = 1 / B^{1/n}$$

kus B on graafikult loetav võrrandi kordaja³⁰.

Logistilise funktsiooni puhul on andmestiku töötlemine veidi lihtsam. Tuleb teha samuti uus muutuja

$$z = \ln(1 / y - 1)$$

ja leida lineaarfunktsiooni

$$z = b - ax$$

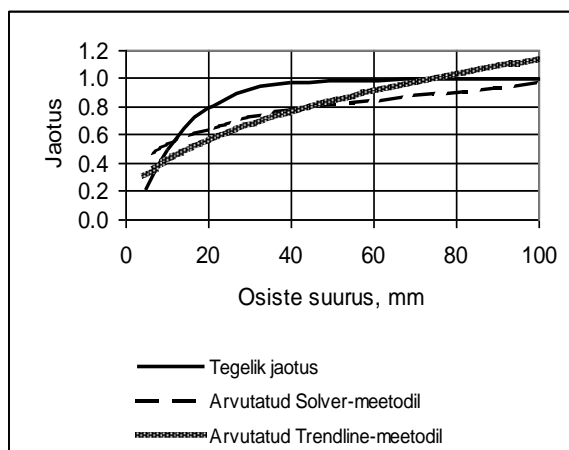
tunnused protseduuridega *Add Trendline* \Rightarrow *Linear* \Rightarrow *Options* \Rightarrow *Display equation on chart* \Rightarrow *Display R-squared value on chart*.

Üldiselt *Trendline*-meetod ei anna piisavalt head tulemust, sest arvutused toimuvad logaritmisega, mis kallutab jaotustunnused peenema materjali kasuks.

Solver-meetod

võib anda märksa paremaid tulemusi, kuid nõuab kogemust, sest eelnevalt peab teada, millises vahemikus võivad jaotustunnused olla. Vaatame näidet.

A.



Pildil (A) on kirjeldatud looduslikku sorteeritud materjali, veeriselist rannakruusa. Proov on võetud otse lainepiirilt. Sõelumise alusel on teada, et kruusa keskmine terasuurus $Me = 10 \dots 11$ mm. Kasutades rannakruusa jaotuskõvera kirjeldamiseks astmefunktsiooni saame:

Trendline-meetodil:

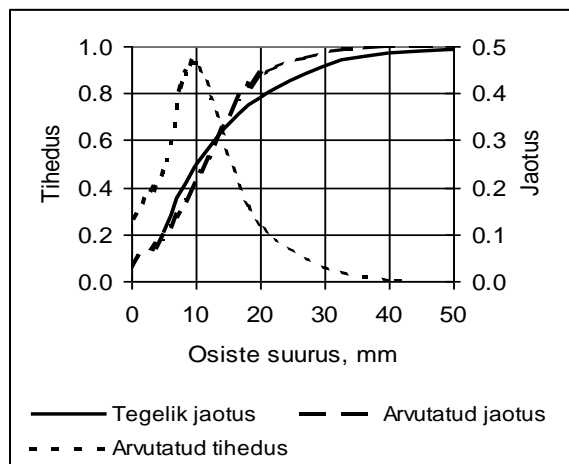
$$A = 0,16; n = 0,43; Me = 15,0 \text{ mm}$$

ja *Solver*-meetodil:

$$A = 0,28; n = 0,28; Me = 8,3 \text{ mm},$$

mis näitab, et tulemus sõltub meetodist.

B.



Pildil B on sama rannakruusa jaotus- ja tihedusfunktsiooni arvutamisel kasutatud logistilist funktsiooni, mis, nagu mainitud, sobib sorteeritud materjalile. Tulemus on saadud *Solver*-meetodil. Tulemused:

$$a = 0,23; b = 2,65; Me = 11,5 \text{ mm}$$

Pilt 1.17. Merelainete poolt sorteeritud rannaveeriste jaotuse kirjeldamine eri jaotuste ja eri erinevate meetoditega.

³⁰ Siin B ei ole logistilise funktsiooni parameeter

1.5. Trendi analüüs

1.5.1. Muutlikkus, variatsioon

on meie käsitluses geoloogilise objekti omadus, mida saab iseloomustada mõõdetavate tunnuste statistiliste tunnustega. Geoloogiliste objektide mõõtmete muutlikkus sai ära mainitud juba selle õpiku esimestes punktides. Lisaks vt varem viidatud õpikud Mäemajandus ja Infotöötlus mäenduses.

Muutlikkus võib olla nii juhuslik kui ka ootuspärane (=süsteemiline). Antud juhul tähendab ootuspärasus seda, et vaatlused ja kogemus lubavad nähtust, selle sagedust, esinemise kohta või aega mingil määral ennustada, prognoosida. Seonduvalt maavara uuringuga lavamaardlates on kasulik teada, et lõhed ja karstivõõndid esinevad ilmse perioodilisusega, mis võimaldab nende esinemist ka ennustada. Järgnevatel fotodel on näide tüüpilisest loodusnähtusest, lõhedest Lasnamäe alvaril.



Pilt 1.18. Tüüpilised süstemaatilised nähtused on lõhed kivimis

Vasakul - pealtnäha juhuslikult, paremal – silmnähtavalt regulaarselt ilmnevad lõhed Lasnamäe paes. Piisava entusiasmiga puhul võib vasakpoolsel fotol nähtavat lõhede kontsentrisust pidada ka meteoriidi kukkumise kohaks.

Kogemuse ja mõõtmise alusel on enamasti teada ka lasundi tunnuste muutumine mingis suunas. Tunnuste muutumist, millel on märgatav suund ja intensiivsus, nimetame **trendiks** (vt varem viidatud Infotöötlus mäenduses). Seevastu juhusliku muutlikkuse kohta teame vaid seda, et ta on olemas.

1.5.2. Juhuslikud, süstemaatilised ja regulaarsed nähtused

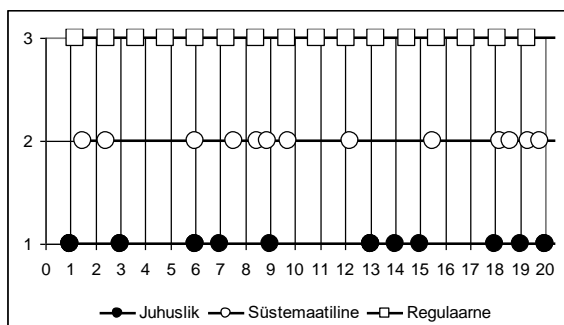
Ajalised ja ruumilised nähtused võivad esineda:

- täiesti juhuslikult,
- enamvähem juhuslikult ehk ootuspäraselt või
- regulaarselt.

Juhusliku sündmuse hea näide on maavärin. Seismoloogide sajandeid väldanud uuringute alusel on maavärinate toimumises küll märgatud mingit süstemaatilisust, kuid ikkagi ei suudeta neid piisava täpsusega prognoosida. Sestap võime maavärinaid pidada enamvähem juhuslikuks nähtuseks. Regulaarse nähtuse näide oleks liinibussi saabumine peatusse. Seda muidugi eeldusel, et jälgime ühe liini bussi liikumist ajavahemikul, mil nende ajaintervall sõiduplaanis on konstantne. Ent reaalses elus pole ka bussi tulek kunagi regulaarne, pigem ikka ootuspärane.

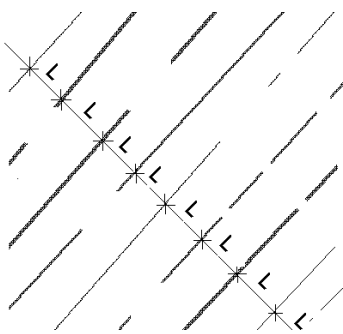
Looduslike objektide uurimisel tekib tihti küsimus, kuidas mõõtmiste alusel hinnata, kas nähtus on:

- juhuslik ehk mitteennustatav,
- süstemaatiline ehk ootuspärane ja tänu sellele mõningase tõenäosusega ennustatav, või
- regulaarne, mille taasilmumist mõne aja pärast või pärast mingit vahemaad võime kindlalt ennustada.



Pilt 1.19 Juhuslikud, süstemaatilised ja regulaarsed ilmingud trassil punktidega (pikettidega, ajahetkedel) 1...20

Nendele küsimustele pole sugugi lihtne vastata. Vaadake kõrval olevat pilti, kus on kolm horisontaalset trassi (ajatelge, marsruuti) millel on fikseeritud mingeid nähtusi. Trassil 1 ilmub nähtus täiesti juhuslikult (*Poissoni* voog, $\lambda = 1,1$), trassil 2 ilmub nähtus süstemaatiliselt (intervall jaotub lognormaalselt) ja trassil 3 tulevad nähtused ette kindla vahemikuga ehk regulaarselt. Kõigil trassidel on nähtuste omavaheline vahe ligilähedaselt sama ³¹. Trassil 1 ja 2 on ligilähedane ka nähtuste vahe muutlikkuse peamine tunnus, dispersioon. Kuid regulaarsust märkame vaid kolmandal trassil. Esimese ja teise trassi ilmingute esinemissageduses silmnähtavat vahet ei ole.



Pilt 1.20 Karstirikete vahekauguste mõõtmise skeem

On tähele pandud, et paljud geoloogilised nähtused ilmnevad ruumis süstemaatiliselt. Näiteks karstiriked ja lõhed Eesti maapöues (Pilt 1.20). Sestap, kui läbida maapöues käiku mingis suunas, näiteks risti teada oleva karstirikkega, siis on väga oluline teada, kui kaugel ja kui suure tõenäosusega võib jälle karstile sattuda. Selleks tulebki hinnata, kuivõrd juhuslik või süstemaatiline on karsti samm.

Kõrval pildil on skemaatiliselt ja peaaegu regulaarselt kujutatud kirdesuunalisi karstivööndeid, mille vahekaugust (L) on mõõdetud karstivöönditega risti kulgeval trassil. Kui rikke leidmine trassil on sündmus, siis on tegemist sündmuste vooga, mille kirjeldamiseks saab kasutada gammajaotuse erimit, *Erlangi* jaotust.

Erlangi jaotusel on suurepärane omadus kirjeldada nii täiesti juhuslike sündmuste kui ka perioodiliste (kindla vahemikuga ilmnevate) nähtuste voogu. Tunnuseks on seejuures jaotusfunktsiooni valemis esinev astmenäitaja k . Sündmuste täiesti juhuslike, nn *Poissoni* voo puhul $k = 0$, perioodiliste sündmuste voo puhul $k = \infty$. Nii võib k sobida jaotamiseks nähtusi juhuslikuks, süstemaatiliseks ja regulaarseks. Selleks arvutame

$$k = (L_{AVG}^2 / D_L) - 1$$

kus L_{AVG} on rikkevööndite keskmine vahekaugus marsruudil ja D_L on vahekauguse dispersioon.

Tabel 15 Pilt 1.19 kujutatud näidetele vastavad statistilised tunnused

Tunnus	Tähis	Nähtus trassil		
		1. Juhuslik	2. Süstemaatiline	3. Regulaarne
<i>Erlangi</i> jaotuse astendaja	k	0,2	0,6	18266
Keskmine vahemik	L_{AVG}	1,14	1,174	1,20
Vahemiku dispersioon	D_L	1,06	0,879	0,000
Vahemiku standardhälve	s_L	1,03	0,938	0,009

Tabelis toodud arvutustulemused eristavad selgelt regulaarse ilmingu trassil 3.

Selle meetodika abil on tudengid harjutustööde raames üritanud hinnata karstisoonide paiknemise süstemaatilisust, kasutades kaevväljade elektroprofileerimisel märgatud anomaalseid tsoone. Kaardil märgiti loode-kagu suunalised trassid ja millel mõõdeti anomaalsete tsoonide vahelised kaugused. Uus-Kiviõli väljal osutus kirde-edela suunaliste vööndite esinemine märksa ootuspärasemaks ($k = 7$) kui Estonia kaevanduse väljal ($k = 1$).

³¹ Poissoni voog sisaldab intervale pikkusega 0

Lineaarne trend

on kõige lihtsam süstemaatilise muutlikkuse kirjeldamise mudel ³². Lineaarne trend kirjeldab tunnuse muutumist ruumis, mille puhul muutusel on kindel suund ja intensiivsus. Seda võiks võrrelda vaikse tuulega. Näiteks mahe lõunatuul on õhu liikumise põhjasuunaline trend, kiirusega 1 m/s. Lineaarne trend sobib kasutamiseks vaid maardla väikese osa kirjeldamiseks. Suurtes lavamaardlates võib selliseks osaks olla mitmekümne ruutkilomeetri suurune uuringu- või kaeveväli. Lineaarse trendi võrrand on

$$p = a + bx + cy$$

kus: p – tunnus, mille süstemaatilist muutlikkust kirjeldatakse; a , b ja c - konstandid, x ja y – geograafilised ristkoordinaadid.

Seejuures b ja c kirjeldavad tunnuse p muutumise intensiivsust vastavalt x ja y suunas.

Muutumise tegelikku suunda ja suurimat intensiivsust iseloomustab gradient

$$\Delta F = (b^2 + c^2)^{0,5}$$

mis mõõdab tunnuse muutumise suurust koordinaatide mõõtkava ühiku piires, tavaliselt kilomeetris. Suurim on muutus suunas, mille asimuut, direktsiooninurk (nurk põhjasuuna suhtes) on

$$\phi = \arctg (b/c)$$

Lineaarse trendiga saab kirjeldada vaid ühtlast ja ühesuunalist muutust. Seepärast saabki mäenduses seda kasutada vaid rahulike lasumistingimustega maavarade, nagu kambriumi sinisavi ja ordoviitsiumi lubja- ja dolokivide aga ka kvaternaari savi ja turba suurte maardlate üksikute osade kirjeldamiseks. Kõige rohkem on lineaarset trendi kasutatud põlevkivimaardla varu hindamisel, eriti maardla keskosas. Seda on tehtud selgitamaks varukasutust kontrollivatele ametkondadele, miks on varuplokkide äärealadel väljatud varu kogused oodatust väiksemad. Teisisõnu – et pole tegu mäetöösturite sooviga näidata väljatud varu kogust väiksemana, vähem maksta kaevandmisõiguse tasu.

Põlevkivimaardla lääne- ja idapoolsetes otstes ei kirjelda lineaarne mudel paksuse ja kütvuse muutlikkust enam nii hästi. Põhjus on lihtne – lasundi perifeerses osas hakkab selgemalt avalduma kihtide läätjsjas kuju.

Läätsekujuliste maardlate, nagu kruusa ja liiva ning siluri karbonaatkivimite ja devoni savi maardlate, eriti kui uuritakse kogu maardlat, lineaarne trend ei sobi. Ka fosforiidi ja Tapa põlevkivileiukoha kirjeldamisel osutub lineaarne mudel liiga lihtsaks. Sellistel juhtudel on kasulik teada, et on olemas

mittelineaarne trend

Kui lineaarset trendi sai võrreldud vaikse tuulega, siis mittelineaarne kuvand sobib keeristormile – õhu liikumise kiirusel on igas punktis oma gradient – oma liikumise suund ja kiirus, kuid üldiselt toimub see mingi keskme ümber. Kui maavara geoloogilisel uuringul otsitakse kohta, kus kasuliku komponendi sisaldus on suurim, on hea teada, kus on tulevase maardla kese.

Mäenduses võib kasutada kõige lihtsamat mittelineaarse, eksponentsiaal-elliptilise trendi mudelit, mille võrrand on

$$p = \exp (a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy)$$

kus peamised tähised on samad, mis lineaarse trendi võrrandis. Juurde tulid on konstandid d , e ja f .

Kuigi eksponentsiaal-elliptilise trendi mudel võib mõnelgi juhul olla kasulik, on kaasaegsem, lihtsam ja ka kiirem tee kasutada vastavaid arvutiprogramme ja vaadata kasuliku komponendi või lasundi paksuse isojooni geoloogilise uuringu kaardil.

1.5.3. Trendi analüüsi lihtsamad võtted

Kasutatakse *Excel*'i varamut, milles on olemas matemaatilise statistika meetod nimega **regressioonianalüüs**.

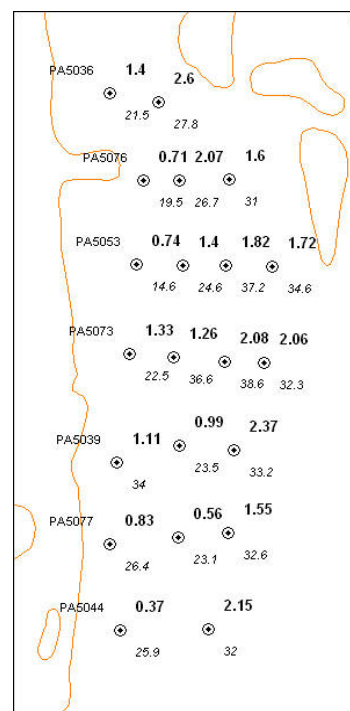
³² Lihtsad mudelid ei kehti kunagi, kuid neid kasutatakse alati

Näide 8. Ehitusliiva peensusmooduli muutumise uurimine (trendi analüüs)

Tabel 16 Liiva peensusmoodul Pannjärve liivamaardlas

Puurauk	Pulkovo 1942. a koordinaadid, m		Adapteeritud koordinaadid, m		Peensusmoodul
	X	Y	x		y
PA5036	6504655	5500070	70	4655	1.40
PA5104	6504630	5500205	205	4630	2.60
PA5076	6504406	5500162	162	4406	0.71
PA5105	6504408	5500262	262	4408	2.07
PA5075	6504410	5500397	397	4410	1.60
PA5053	6504168	5500144	144	4168	0.74
PA5108	6504166	5500270	270	4166	1.40
PA5067	6504166	5500388	388	4166	1.82
PA5107	6504164	5500515	515	4164	1.72
PA5073	6503914	5500124	124	3914	1.33
PA5109	6503905	5500246	246	3905	1.26
PA5072	6503894	5500385	385	3894	2.08
PA5110	6503891	5500495	495	3891	2.06
PA5039	6503607	5500090	90	3607	1.11
PA5112	6503653	5500263	263	3653	0.99
PA5064	6503641	5500410	410	3641	2.37
PA5077	6503375	5500070	70	3375	0.83
PA5113	6503394	5500258	258	3394	0.56
PA5063	6503406	5500395	395	3406	1.55
PA5044	6503130	5500100	100	3130	0.37
PA5079	6503132	5500340	340	3132	2.15

Puuraukude paiknemine



Pilt 1.21. Pannjärve liivamaardla uuringupuuraugud

Pilt 1.21 on puuraukude paigutus. Kõigi aukude juures ülal paremal on liiva peensusmooduli väärtus. Ridade esimeste puuraukude juures (ülal vasakul) on puuraukude numbrid ja enamiku puuraukude juures (all paremal) on ka lasundi paksus meetrites. Trendi analüüsi eesmärk on hinnata liiva peensusmooduli süstemaatilist muutust uuritud ala piires, sest pildile peale vaadates võib teha küll mingeid oletusi, kuid arviliselt väljendatava usaldusväärsusega.

Tabel 17 Peensusmooduli trendi analüüs Pannjärve liivamaardlas. Lineaarne trend

Regression Statistics			Selgituseks
Multiple R	0,66		Korrelatsioonikordaja
R Square	0,44		Eelmise ruut
Adjusted R Square	0,38		Eelmise, kohaldatud väärtus
Standard Error	0,49		(Jääk)standardhälve
Observations	21		Valimi suurus
	Coefficients	Standard Error	
Intercept	-0,81105	0,95500	Sõltumatu kordaja a
X Variable 1	0,00265	0,00079	x-koordinaadi kordaja b
X Variable 2	0,00040	0,00024	y-koordinaadi kordaja c

Arvutuste tulemusel leitud koordinaatide kordajad b ja c lubavad lineaarset trendi käsitletud lõigus toodud valemite abil arvutada peensusmooduli gradiendi pikkuseks 0,00268 1/km ja suunaks 81°. See tähendab, et uuritud alal peensusmoodul kasvab mingil määral ida suunas. Kuna maavara geoloogilisel uuringul orienteeritakse mõõtmiskohad trendsuunaliste ridadena, ja nagu andmetabelile lisatud pildil näha, oli nii oli ka tehtud. Nii võib üsna kindlalt oletada, et meie arvutuste alusel leitud trend oli geoloogidel uuringut tehes juba teada lasumistingimuste ja maavara otsingul tehtud tähelepanekute alusel.

Pannjärve liivamaardla peensusmooduli mittelineaarse trendi analüüs on järgmises tabelis. Ootuspäraselt, sest tegu ei ole suure lavamaardlaga, kirjeldab see mudel maardlat paremini. Seda saab väita mitmese korrelatsioonikordaja (*Multiple R* = 0,74) alusel, mis on suurem kui ülemises, lineaarset mudelit iseloomustavas tabelis, kus see oli 0,66.

Tabel 18 Peensusmooduli trendi analüüs Pannjärve liivamaardlas. Mittelineaarne trend

Regression Statistics			Selgituseks
<i>Multiple R</i>	0,74		Korrelatsioonikordaja
<i>R Square</i>	0,55		Eelmise ruut
<i>Adjusted R Square</i>	0,39		Eelmine, kohaldatud
<i>Standard Error</i>	0,40		(Jääk)standardhälve
<i>Observations</i>	21		Valimi suurus
	Coefficients	Standard Error	
<i>Intercept</i>	-2,85	7,52	Sõltumatu kordaja <i>a</i>
<i>X Variable 1</i>	0,01103	0,00634	x-koordinaadi kordaja <i>b</i>
<i>X Variable 2</i>	0,00040	0,00382	y-koordinaadi kordaja <i>c</i>
<i>X Variable 3</i>	3,51E-07	5,3E-06	x^2 kordaja <i>d</i>
<i>X Variable 4</i>	6,44E-08	4,78E-07	y^2 kordaja <i>e</i>
<i>X Variable 5</i>	-2,31E-06	1,65E-06	xy kordaja <i>f</i>

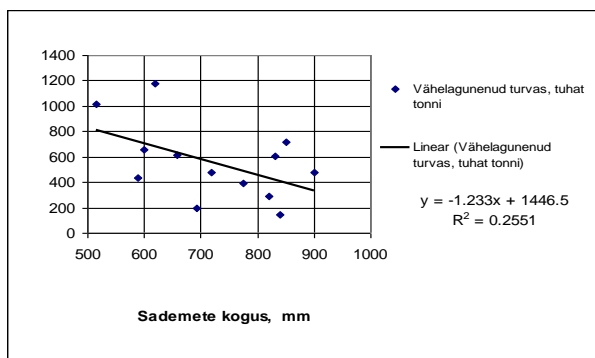
1.6. Korrelatsioonianalüüs

1.6.1. Seos kahe tunnuse vahel

Kõige üldisem ja käepärasem kahe tunnuse vahelise sideme tugevuse mõõdik on korrelatsioonikordaja. Korrelatsiooni otsimine on esimene samm tunnustevaheliste seoste uurimisel analüüsi algusjärgus, kui ei ole tehtud veel mingeid olulisi oletusi ega püstitatud hüpoteese. Tänu laitarbe arvutusprogrammide (*Excel*) levimisele on korrelatsioonikordaja arvutamine, nii nagu ka kahe tunnuse vahelise seose kuju (valemi) leidmine hõlbus. Kuid olen tähele pannud, et see soodustab pealiskaudsust ja võib matemaatilise statistika puuduliku tundmise puhul viia üsnagi valedele järeldustele.

Korrelatsiooni leidmine on lihtne graafikuks kujundatud andmete joonise abil, kasutades protseduure *Add Trendline* ⇒ *Linear* ⇒ *Options* ⇒ *Display equation on chart* ⇒ *Display R-squared value on chart*. Viimane, korrelatsioonikordaja ruut on loomulikult positiivne, mistõttu tavalise korrelatsioonikordaja $r = (R^2)^{0.5}$ ette kuuluv "+" või "-" tuleb leida graafikult.

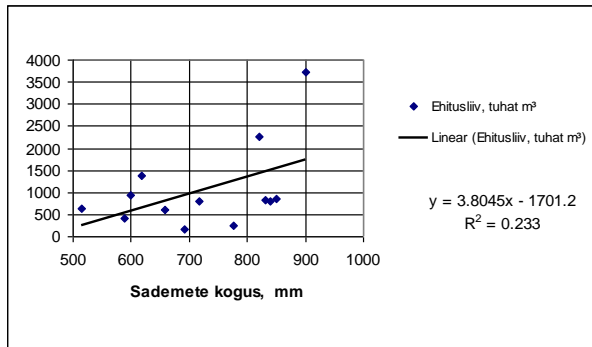
A.



Vaadakem kõrval olevaid graafikuid, millega analüüsiti turba ja liiva kaevandamise edukust Eestis 1992...2004. a. Küsiti, kuivõrd turba toodang sõltus sademetest.

Esmalt turba kaevandamise maht graafikul A. Kuigi korrelatsiooni tugevus on keskpärane ($R^2 = 0,25$), arvati, et sellega saab põhjendada sademete ebasoodsat mõju kaevandamisele. Ootuspärase järeldusega – mida rohkem sademeid, seda väiksem toodang, jäädi rahule.

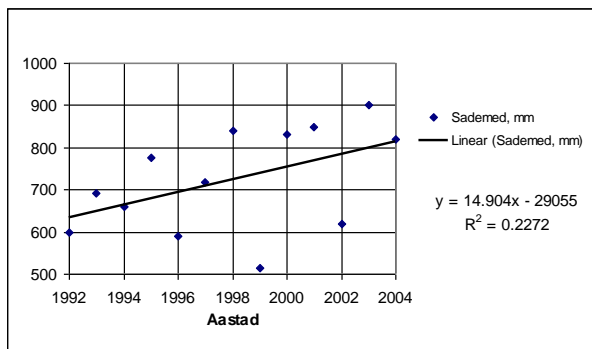
B.



Ent vaadake graafikut B, millel on ehitusliiva kaevandamise maht samal ajal, samuti sõltuvalt sademetest. Selle pildi järgi võib teha vastupidise järelduse – sademed mõjuvad liiva kaevandamisele soodsalt. On ju tõusev korrelatsioon liiva kaevandamise mahu ja sademete hulga vahel ($R^2 = 0,23$) peaaegu sama suur kui turbatoodangu languse korrelatsioon graafikul A.

See viga esineb tihti, kui töödeldakse aegridasid. Irooniaga serveerivad matemaatilise statistika lektorid positiivset korrelatsiooni toonekurgede ja beebide arvukuse vahel mis oli väga tugev juba eelmise sajandi esimesel poolel.

C.



Ilmselt mõjutab graafikutel A ja B mõlemat tunnust (toodangut ja sademeid) sama faktor, mis toonekurgede ja beebide arvukust. See faktor on aeg, mille jooksul muutusid nii kaevandamise maht kui ka sademete kogus ja vähenesid toonekurgede arvukus ja sündide arv.

Vaadates graafikut C näeme, kuidas aastail 1992...2004 kasvas sademete hulk, mis teadaolevalt mõjutab turba kaevandamist, kuid mitte kuidagi ei piira liiva müüki.

Pilt 1.22. Kolm korrelatsiooniseost tunnuste vahel

Selguse saamiseks tuleb aja mõju kõrvaldada ja arvutada toodangu ning sademete vaheline **osakorrelatsioonikordaja**,

mille valem on:

$$r(xy_z) = (r(xy) - r(xz) * r(yz)) / (((1 - r(xz)^2)^{0,5}) * ((1 - r(yz)^2)^{0,5}))$$

Kus: $r(xy_z)$ on kahe juhusliku tunnuse x ja y vaheline korrelatsioon, millest on kõrvaldatud kolmanda tunnuse, z mõju. Valemis: $r(xy)$, $r(xz)$ ja $r(yz)$ on x , y ja z omavahelised paariskorrelatsioonikordajad.

Sooritades arvutusi, näeme, et aja kui faktori kõrvaldamisel on turba kaevandamise mahu ja sademete vaheline korrelatsioon esmasest tugevam ($R^2 = 0,52 > 0,25$). Sama loogiliselt selgub, et ehitusliiva kaevandamise maht ei sõltu sademetest ($R^2 = 0,08 << 0,23$).

1.6.2. Korrelatsioonimaatriks

on objekti kõigi tunnuste omavaheliste korrelatsioonikordajate kogum. Alustame näitega.

Näide 9. Savikivi mikroelementide korrelatsiooni analüüs

Savikivi, mida üldsus tunneb diktüoneemaargilliidi või -kilda nime all ja mille teaduslik nimetus on graptoliitargilliit, äratub huvi sellega, et sisaldab mitmeid raskeid ja haruldasi metalle. Huvi teaduslik aspekt on – kuidas need metallid on omavahel seotud? Järgnevas tabelis, lähteandmete maatriksis, on hulk mõõtmistulemusi, mille seostest esialgu on esialgu vähe teada. Üritame leida ja mõõta seoseid korrelatsioonianalüüsi abil. Vastavad protseduurid on: *Tools* ⇒ *Data Analysis* ⇒ *Correlation* jne.

Tabel 19 Mikroelemendid savikivis. Lähteandmed

Puur- auk	Q	C _{org}	FeS ₂	U	V	Mo	Re	Ag	Ti	Ge	Cu	Zn	Ga	Sb	As	Au	Pb	TR	Y	Fe	Se	Arv
F295	1060	9.9	4.5	43	440	120	0.06	1.3	7.3	2.1	130	130	59	73		0.03	120	243	54	3.7	1.52	20
M18	1075	11.4	4.4	36	520	88	0.07	1.2	10	1.7			60	48	50	0.01	130	253	44	4.1	1.94	19
F299	1120	10.5	5.0	56	600	110	0.09	1.1	17		100		69	110	50	0.17	110	230	30	4.3	2.54	19
F292	1207	10.1	8.7	80	940	240	0.12	1.8	30	2.4	100		65	130	90	0.03	160	293	47	6.2		19
F287	1130	9.6	4.7	90	840	180	0.10	1.9	20		190		70	130	70	0.03	160	276	44	4.5	2.62	19
F302	1166	8.7	4.0	110	840	130	0.12	1.8	18		210		43	170	100	0.01	170	274	54	5.9		18
F306	1114	10.8		61	410	85	0.08	1.9	21	1.2	170		39	87	100	0.04	160	427	100	5.2		18
A	712	1.6		64	640	130	0.10	1.6	17	1.8	140		74	98	140	0.01	120	216	35	3.1		18
B	1262	10.0		120	1200	280	0.18	2.4	25	1.8	200		54	180		0.03	210	274	44	4.9		17
M77	1190		2.6	56	560	280	0.11	1.6	12.0	2.2	200	150	60	80	50	0.01	130	204	33	3.4	2.3	20
M34	1217	12.1	4.2	53	640	250	0.16	1.9	14	1.8	230	350	70	99	60	0.04	150	226	43	3.4		20
F278	1040	12.5	2.8	51	600	140	0.06	1.2	10		150	250	70	130	50	0.01	200	238	44	3.6	1.8	20
F281	815	6.1	2.6	56	470	60	0.05	1.0	9		100	380	65	56	30	0.023	80	286	40	2.9		19
M56				33	330	48	0.03	0.6	6		180		58	25		0.01	110	191	26	3.5		14
F274	1125	10.7		50	740	200	0.09	2.0	16		170	170	77	87	60	0.01	150	204	26	4.3		18
M62				56			0.10							73								3
F135	549	5.5	2.4	27	288	28	0.05	0.7	5.4		130	420	68	28	40	0.02	90	258	46	3.1	2.4	20
M64	1035	9.2	3.5	170	740	350	0.16	2.3	13		200	50	39	110	40	0.037	130	354	58	3.6		19
F131	569	6.8	0.6	53	290	85	0.05	0.54	3		90	70	68	19	50	0.02	70	216.5	22	2.5		19
C	1041	14.8		76	600	190	0.065	1.30	11		60	60	75	65	50	0.02	120	195.5	25	2.7		18
F164	998	11.0	2.0	59	520	200	0.085	1.40	15		100	50	63	95	70	0.02	140	172	25	3.5	2	20
F258	958	14.5		44	88	5	0.12	1.2			18	30			15		45	247	17			13
Arv	20	19	14	22	21	21	22	21	20	8	20	12	20	21	18	20	21	21	21	20	8	
Keskm	1019	9.779	3.706	65.64	585.5	152.3	0.093	1.465	14	1.875	143.4	175.8	62.3	90.14	61.94	0.029	131.2	251.3	40.81	3.92	2.14	

Kahjuks ei tohi korrelatsioonianalüüsi lähteandmete tabelis olla lünki. Siin aga on. Et andmestikku siiski töödelda, viskame sellest välja väheinformatiivsed read (puuraugud M56, M62 ja F258). Samuti oleme sunnitud loobuma ka nende mikroelementide käsitlemisest, mille kohta on vähe mõõtmistulemusi (FeS₂, Ge, Zn, ja Se). Pärast napi informatsiooniga ridade ja veergude kõrvaldamist jäid veel üksikud tühikud, kuhu sisestame vastavate veergude keskmised.

Tuletan meelde, et kuna selline tegevus moonutab lähteandmeid, tuleb see tingimata andmetöötlusprotokollis märkida. Allpool näitena toodud parandatud lähteandmete maatriksis on keskvaartustega täidetud pesades olevad arvud kaldkirjas. Andmestiku kohendamisest, eelanalüüsist vt ka p 1.3.

Tabel 20 Mikroelemendid savikivis. Puhastatud ja kohendatud lähteandmed

Puur- auk	Q	C _{org}	U	V	Mo	Re	Ag	Ti	Cu	Ga	Sb	As	Au	Pb	TR	Y	Fe	Arv	
F295	1060	9.9	43	440	120	0.06	1.3	7.3	130	59	73	64.7	0.03	120	243	54	3.7	17	
M18	1075	11.4	36	520	88	0.07	1.2	10	148	60	48	50	0.01	130	253	44	4.1	17	
F299	1120	10.5	56	600	110	0.09	1.1	17	100	69	110	50	0.17	110	230	30	4.3	17	
F292	1207	10.1	80	940	240	0.12	1.8	30	100	65	130	90	0.03	160	293	47	6.2	17	
F287	1130	9.6	90	840	180	0.10	1.9	20	190	70	130	70	0.03	160	276	44	4.5	17	
F302	1166	8.7	110	840	130	0.12	1.8	18	210	43	170	100	0.01	170	274	54	5.9	17	
F306	1114	10.8	61	410	85	0.08	1.9	21	170	39	87	100	0.04	160	427	100	5.2	17	
A	712	1.6	64	640	130	0.10	1.6	17	140	74	98	140	0.01	120	216	35	3.1	17	
B	1262	10.0	120	1200	280	0.18	2.4	25	200	54	180	64.7	0.03	210	274	44	4.9	17	
M77	1190	9.52	56	560	280	0.11	1.6	12.0	200	60	80	50	0.01	130	204	33	3.4	17	
M34	1217	12.1	53	640	250	0.16	1.9	14	230	70	99	60	0.04	150	226	43	3.4	17	
F278	1040	12.5	51	600	140	0.06	1.2	10	150	70	130	50	0.01	200	238	44	3.6	17	
F281	815	6.1	56	470	60	0.05	1.0	9	100	65	56	30	0.023	80	286	40	2.9	17	
F274	1125	10.7	50	740	200	0.09	2.0	16	170	77	87	60	0.01	150	204	26	4.3	17	
F135	549	5.5	27	288	28	0.05	0.7	5.4	130	68	28	40	0.02	90	258	46	3.1	17	
M64	1035	9.2	170	740	350	0.16	2.3	13	200	39	110	40	0.037	130	354	58	3.6	17	
F131	569	6.8	53	290	85	0.05	0.54	3	90	68	19	50	0.02	70	216.5	22	2.5	17	
C	1041	14.8	76	600	190	0.065	1.30	11	60	75	65	50	0.02	120	195.5	25	2.7	17	
F164	998	11.0	59	520	200	0.085	1.40	15	100	63	95	70	0.02	140	172	25	3.5	17	
Arv	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	
Keskm	1022	9.517	69	625.2	165.6	0.094	1.523	14	148.3	63	94	64.71	0.03	136.8	254.7	43	3.9		

Analüüsiks ette valmistatud andmed allutame korrelatsioonianalüüsi protseduuridele ja saame korrelatsioonimaatriksi.

Tabel 21 Mikroelemendid savikivis. Korrelatsioonimaatriks

	Q	C _{org}	U	V	Mo	Re	Ag	Ti	Cu	Ga	Sb	As	Au	Pb	TR	Y	Fe
Q	1.00																
C _{org}	0.68	1.00															
U	0.34	0.04	1.00														
V	0.66	0.19	0.65	1.00													
Mo	0.60	0.34	0.66	0.65	1.00												
Re	0.59	0.11	0.71	0.77	0.80	1.00											
Ag	0.72	0.22	0.68	0.78	0.75	0.84	1.00										
Ti	0.64	0.14	0.43	0.79	0.43	0.62	0.72	1.00									
Cu	0.48	0.03	0.39	0.42	0.46	0.68	0.69	0.26	1.00								
Ga	-0.28	-0.03	-0.57	-0.13	-0.19	-0.37	-0.42	-0.21	-0.44	1.00							
Sb	0.68	0.20	0.62	0.87	0.51	0.70	0.73	0.76	0.50	-0.31	1.00						
As	0.09	-0.34	0.10	0.27	-0.03	0.21	0.35	0.55	0.15	-0.13	0.40	1.00					
Au	0.18	0.14	0.01	0.01	-0.07	0.09	-0.08	0.18	-0.18	0.02	0.12	-0.14	1.00				
Pb	0.73	0.45	0.37	0.73	0.46	0.56	0.71	0.66	0.55	-0.25	0.84	0.32	-0.14	1.00			
TR	0.15	-0.05	0.42	0.10	-0.02	0.21	0.37	0.34	0.30	-0.74	0.19	0.14	0.08	0.20	1.00		
Y	0.23	0.04	0.21	-0.01	-0.10	0.15	0.36	0.29	0.39	-0.74	0.20	0.29	-0.01	0.32	0.90	1.00	
Fe	0.64	0.20	0.33	0.62	0.17	0.42	0.56	0.81	0.34	-0.45	0.69	0.44	0.13	0.64	0.47	0.49	1.00

Tabel 22 Korrelatsioonikordaja absoluutväärtuse usaldusrajad

f	Ühepoolse raja usaldatavus					
	5%	2.50%	1%	0.50%	0.25%	0.05%
	Kahepoolse raja usaldatavus					
	10%	5%	2%	1%	0.50%	0.10%
1	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.90	0.95	0.98	0.99	1.00	1.00
3	0.81	0.88	0.93	0.96	0.97	0.99
4	0.73	0.81	0.88	0.92	0.94	0.97
5	0.67	0.75	0.83	0.88	0.91	0.95
6	0.62	0.71	0.79	0.83	0.87	0.92
7	0.58	0.67	0.75	0.80	0.84	0.90
8	0.55	0.63	0.72	0.77	0.81	0.87
9	0.52	0.60	0.69	0.74	0.78	0.85
10	0.50	0.58	0.66	0.71	0.75	0.82
11	0.48	0.55	0.63	0.68	0.73	0.80
12	0.46	0.53	0.61	0.66	0.70	0.78
13	0.44	0.51	0.59	0.64	0.68	0.76
14	0.43	0.50	0.57	0.62	0.66	0.74
15	0.41	0.48	0.56	0.61	0.65	0.73
16	0.40	0.47	0.54	0.59	0.63	0.71
17	0.39	0.46	0.53	0.58	0.62	0.69
18	0.38	0.44	0.52	0.56	0.60	0.68
19	0.37	0.43	0.50	0.55	0.59	0.67
20	0.36	0.42	0.49	0.54	0.58	0.65
25	0.32	0.38	0.45	0.49	0.52	0.60
30	0.30	0.35	0.41	0.45	0.48	0.55
35	0.28	0.33	0.38	0.42	0.45	0.52
40	0.26	0.30	0.36	0.39	0.43	0.49
45	0.24	0.28	0.34	0.37	0.40	0.47
50	0.23	0.27	0.32	0.35	0.38	0.44
60	0.21	0.25	0.30	0.33	0.35	0.41
70	0.20	0.23	0.27	0.30	0.33	0.38
80	0.18	0.22	0.26	0.28	0.31	0.36
90	0.17	0.21	0.24	0.27	0.29	0.34
100	0.16	0.20	0.23	0.25	0.28	0.32

Kuna korrelatsioonikordaja, nagu teisedki statistilised tunnused on juhuslik suurus, on tal oma usaldusraja, millest väiksemat ei saa pidada enam oluliseks. Raja väärtus sõltub analüüsitud andmete hulgast ja usaldustasemest. Andmete hulk määrab vabadusastmete arvu, mis antud juhul, kuna tegu on kahe juhusliku suurusega, on $f = n - 2$.

Siin näites, kus analüüsime savikivi komponentide vahelist seost, pärinesid andmed 19 mõõtmiskohast. Sellest tulenevalt on igal korrelatsioonikordajal ³³ vabadusastmeid 17. Usaldusväärse korrelatsioonikordaja minimaalväärtused on kõrval tabelis.

Valides ühepoolse usaldusraja, millest väiksema absoluutväärtusega korrelatsioonikordajat enam oluliseks ei pea ja võttes vastandhüpoteesi (et korrelatsiooni ei ole) usalduspiiriks 1 %, saame usaldusväärse seose alampiiriks 0,53.

Korrelatsioonikordajad, mille absoluutväärtus osutus sellest suuremaks, on Tabel 21 paksus kirjas. On näha, et enim usaldusväärseid sidemeid on orgaanilise ainel (Q) ja elementidel reenumil (Re) ning antimonil (Sb). Kuid siin tuleb arvutustulemusesse suhtuda ettevaatlikult. Kui kavatsetakse veel edasi uurida mõningaid komponente, siis tuleb kindlasti analüüsida nende seoseid eraldi. Kõigepealt aga elimineerida mõne ilmselt juhtrolli mängiva, teisi mõjutava elemendi osa.

³³ Välja arvatud neil juhtudel, kui puuduva mõõtmistulemuse asendasime keskmisega, kuid lihtsuse mõttes ignoreerime seda.

Tabel 23 Mõningate komponentide osakorrelatsioonikordajad

x	y	z	r(xy)	r(xz)	r(yz)	r(xy_z)
U	Mo	Q	0.66	0.34	0.60	0.61
U	V	Q	0.65	0.34	0.66	0.60
Pb	Fe	Q	0.64	0.73	0.64	0.33
Pb	U	Q	0.37	0.73	0.34	0.19

Siin näites äratub kahtlust orgaanilise aine sage seos mitme teise komponendiga. Seepärast tuleks üksikute elementide seoste tõepärasemaks hindamiseks kõigepealt kõrvaldada suhetest orgaanilise osa (Q) mõju. Näitame seda kõrval olevas Tabel 23.

Nälgime, et uraani (U) ja molübdeeni (Mo), samuti ka uraani ja vanaadiumi (V) sisalduse vahel oli keskpärane positiivne korrelatsioon. Pärast orgaanilise aine mõju kõrvaldamist see eriti ei nõrgene. Samas plii (Pb) ja raua (Fe) omavaheline keskpärase tugevusega seos ning plii ja uraani nõrk seos osutuvad pärast orgaanilise aine elimineerimist esialgselt palju nõrgemaks.

Korrelatsioonimaatriksi uurimist võib jätkata mitmel moel. Meil on tihti kasutatud eesti teadlaste poolt välja töötatud nn maksimaalse korrelatsiooni teed (puud). Märksa informatiivsem oleks faktoranalüüs, mille kirjeldamine ei mahu siinsetesse raamidesse. Kasvõi seepärast, et laiatarbeprogrammid seda võimalust ei paku.

1.7. Valimite identsuse ja/või erinevuse analüüs

Valimid tekivad juhusliku valiku teel, seepärast ka nende iseloomulikud tunnused, nagu keskvärtus, dispersioon ja muud statistilised tunnused on juhuslikud. Tihti on mõistlik küsida, kas valimid, eriti väikesemahulised, millel on suure hajumisvahemikuga (standardhälvega) keskvärtus, üldse omavahel erinevad.

Valimid loetakse erinevaks, kui nende keskvärtuste vahe on suur, märgatav, teaduskeeles – statistiliselt oluline. Vahe on oluline, kui ta piisava (näiteks >50%) tõenäosusega on olemas. Vahe on olemas kui ta ei võrdu nulliga. Kahe juhusliku arvu vahe (erinevus) on ka juhuslik suurus. Tal on oma keskvärtus, oma dispersioon ja standardhälve. Kui vahe on kord positiivne, kord negatiivne, ei saa me kindlalt väita, et ta on nullist suurem, st, et ta on olemas. Teisisõnu – ei saa kindlalt järeldada, et võrreldavate valimite erinevus on oluline.

Valimite erinevuse hindamise meetodika on teada matemaatilise statistika arsenalist ja maavara varu plokkide ühendamiseks on seda soovitatud ka minu varem viidatud õppematerjalis Infotöötlus mäenduses. Siin aga jätkame arutelu näite varal.

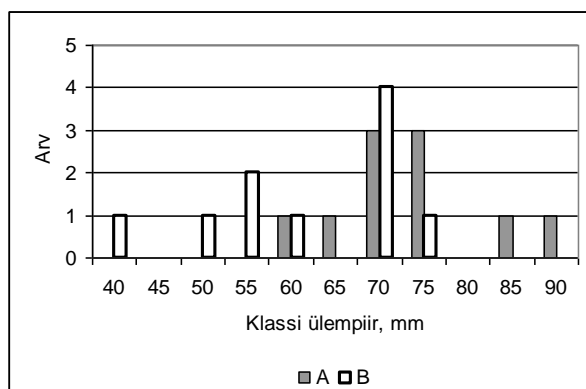
Näide 10. Kahe kivikogumi erinevuse analüüs

Kasutame uuesti kahte kivikogumit A ja B (p 1.1.1, Pilt 1.1). Analüüsime nende kivide nominaali – nominaalmõõdet, mis korreleerub sellise sõela avaga, mida puistematerjali osis läbib. Toome nominaali statistilised tunnused ära tabelis:

Tabel 24 Kahe kivikogumi nominaalide, nende erinevuse ja liidetud kogumi statistilised tunnused

Tunnused	Kogum (valim)		Erinevus (vahe)	Liidetud valimid
	A	B		
Aritmeetiline keskmine, mm	71	59	12	65
Dispersioon, mm ²	64	141	205	205
Valimi suurus	10	10	20	20
Vabadusastmete arv	9	9	16	19
Valimi (vahe) standardhälve, mm	8,0	11,9	14,3	14,3
Variatsioonikordaja, %	11	20	119	22
Valimi (vahe) keskvärtuse standardhälve, mm	2,7	4,0	3,6	3,3
Studenti t, ühepoolne, P = 0,95	1,83	1,83	1,75	1,73
Studenti t, kahepoolne, P = 0,95	2,26	2,26	2,12	2,09
Keskmise usaldusrajad, mm	± 6,0	± 8,9	± 7,6	± 6,9
Tõenäosus, et vahe on suurem kui 0			4E-04	

Tabelist võib välja lugeda ka, miks suure mõõtemääramatusega arvude keskmiste vahe on väheusaldatav – juhuslike arvude vahe dispersioon ei ole mitte lahutatavate arvude dispersioonide vahe vaid hoopis summa.



Tabelis näeme küll, et valimite kivide nominaali keskvärtus on eri valimis erinev, kusjuures vahe on 12 mm ehk umbes 20 %. Nii võiks öelda, et A-kogumis on kivid suuremad kui kogumis B. Ent vaatame kõrval Pilt 1.23 ka kivide jaotumist Märkame, et vähemalt pooled B-kogumi kivid on nominaali poolest suuremad kui pooled kivid kogumist A. Seega – kas kogumid ehk valimid ikka erinevad?

Pilt 1.23. Kahe kümnest kivist koosneva kogumi, A ja B nominaali jaotumine

Kivide mõõtude suurest hajuvusest tuleneb ka keskvärtuste vahe suur määramatus ja vähene usaldatavus. Kui mõõtmistulemuste suhtelist mõõtemääramatust iseloomustav variatsioonikordaja on kogumitel (valimitel) 10...20 % piires, mis loodusobjektidel on üsna tavaline, siis erinevuse variatsioonikordaja (119%) demonstreerib selle (erinevuse) täielikku mitteusaldatavust. Nii võiks juba selle alusel öelda, et kivikogumite nominaalid ei erine (vahet pole) ja nad võib kokku panna. Teemegi seda. Uue, ühendatud, 20-kivilise kogumi statistilised parameetrid on Tabel 24 viimases veerus. Tulemus ei osutunud eriti paremaks, variatsioonikordaja isegi kasvas. Antud juhul viitab see liitvalimi kahemodaalsusele. Nii et tegu on ikkagi kahe erineva valimiga, kuid mõõtmistulemusi on liiga vähe, et nende tunnuseid paremini eristada.

Toodud näide on piltlikkuse huvides üsna robustne. Teaduses ja ka maavara geoloogilises uuringus tuleb kogu aeg ette, et peab otsustama, kas suure mõõtemääramatusega andmed näitavad nähtuse olulisist, objektide erinevust mõõtmistulemuste vahet (efekti ³⁴) või mitte. Selleks on tavaprogrammide kasutajatel käepärast vastavad käepärased protseduurid. *Excelis* on selleks *t-Tests*. Teeme need läbi samade kivikogumite jaoks. Kuna *t*-testi valik sõltub sellest, kas võrreldavate valimite hajuvus (dispersioon) on (väga) erinev või mitte, siis kontrollime esmalt seda ja sooritame protseduurid: *Tools* ⇒ *Data Analysis* ⇒ *F-Test Two-Sample for Variances*

Tabel 25 *F*-test valimite dispersioonide erinevuse / samasuse hindamiseks

Statistilised tunnused		Kogum	
Inglise keeles	Eesti keeles (seletus)	A	B
<i>Mean</i>	Aritmeetiline keskmine, mm	71,2	58,8
<i>Variance</i>	Dispersioon, mm ²	64,2	141
<i>Observations</i>	Valimi suurus (vaatluste arv)	10	10
<i>df</i>	Vabadusastmete arv	9	9
Tulemused:			
<i>F</i>	<i>Fisher</i> kriteerium (dispersioonide jagatis)	0,45	
<i>P(F<=f) one-tail</i>	Usaldatavus, üks raja	0,13	
<i>F Critical one-tail</i>	<i>Fisher</i> kriteerium vastandhüpoteesi usaldusväärtusel 0,05	0,31	

F-test hindab väite „dispersioonid ei erine“ usaldusväärsuseks 0,13 = 13 %, sest $F = 0,45$. Kui dispersioonid oleksid võrdsed, oleks $F = 1$. Kuna dispersioonide mitteerinevust ei saa aluseks võtta, siis läheme edasi eeldusega, et nad erinevad ja sooritame protseduuri: *t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances*.

³⁴ Efekt on nähtus, ilming, kasu, kahju jms, mille olemasolu või puudumist tahetakse tuvastada.

Tabel 26 *t*-test erineva dispersiooniga valimite läheduse hindamiseks

Statistilised tunnused		Kogum	
Inglise keeles	Eesti keeles (seletus)	A	B
Mean	Aritmeetiline keskmine, mm	71,2	58,8
Variance	Dispersioon, mm ²	64,2	141
Observations	Valimi suurus (vaatluste arv)	10	10
Tulemused:			
Hypothesized Mean Difference	Vahe hüpoteetiline väärtus (hüpoteesid: vahe < 0 (üks raja) või vahe = 0 (kaks raja))	0	
df	Vabadusastmete arv	16	
<i>t</i> Stat	Arvutatud <i>t</i>	2,73	
<i>P</i> (<i>T</i> ≤ <i>t</i>) one-tail	Vastandhüpoteesi „vahe on suurem kui null“ usaldatavus	0,007	
<i>t</i> Critical one-tail	Studenti <i>t</i> kriitiline väärtus ette antud usalduspiiril, <i>P</i> = 0,05	1,75	
<i>P</i> (<i>T</i> ≤ <i>t</i>) two-tail	Vastandhüpoteesi „vahe erineb nullist“ usaldatavus	0,015	
<i>t</i> Critical two-tail	Studenti <i>t</i> kriitiline väärtus ette usalduspiiril <i>P</i> = 0,05 (hüpotees kehtiks, kui arvutatud <i>t</i> oleks sellest väiksem)	2,12	

Arvutused näitavad, et ei ole alust väidetel: kivikogumite A ja B nominaalid erinevad = neil on usaldusväärne vahe = kogumi A nominaalid on suuremad kui kogumil B. Need väited, ühe ja sama väite variatsioonid, on väga madala usaldusväärusega, vastavalt:

- väitel „vahe erineb nullist“ usaldatavus on 1,5 % ja
- väitel „vahe on suurem kui null“ vastavalt 0,7 %.

Nii madal usaldatavus lubab isegi öelda, et need väited on valed.

Sellist meetodikat tuleks kasutada geoloogilisel uuringul alati, kui soovitakse kontrollida valimite (proovide või analüüside seeria) erinevust. Näiteks NSVL väetistootuse ministeeriumi poolt koostatud fosforiidi uuringu meetodika, mis Eestis seni (2013) kehtib, ja mis on meil üks nõudlikumatest, näeb ette kontrollproove eri laboratooriumites. Seejuures peetakse lubatuks laboratooriumianalüüside erinevus järgnevas tabelis toodud piires.

Tabel 27 Näide – kontrollproovide lubatav erinevus fosforiidi uuringul

Komponent	Sisaldus (%), mille jaoks on kehtestatud lubatav kõrvalekalle	Lubatud kõrvalekalde absoluutväärtus Δ, %
P ₂ O ₅	alla 15	0,3
P ₂ O ₅	üle 15	0,5
Fe ₂ O ₃	alla 5	0,4
Fe ₂ O ₃	üle 5	0,5
Lahustumatu jääk	alati	2

Vaatamata sellele, et näitena esitatud andmed Eesti maavarade geoloogilise uuringu korraldamise juhendist ei ole üheselt mõistetavad ³⁵, loeme, et võrreldavad tunnused kujutavad endast eri laborites või erinevate meetodikatega tehtud teimide valimite keskmist. Kui keskmiste erinevus ei ületa tabeli viimases veerus toodud lubatava kõrvalekalde väärtust, on lahknevus lubatud rajades. Lubatav kõrvalekalle tuleb võtta vahe hüpoteetiliseks väärtuseks ja proovid loetakse esinduslikeks, kui hüpoteesi – vahe on väiksem kui Δ — usaldatavus on piisavalt suur. Milline usaldusväärtus on piisav, seda juhend ei sätesta.

t-testi on kasutatud ka väljatud põlevkivivarude mõõtmiste usaldusvääruse hindamisel, ekspertiisis, mida peeti vajalikuks, kui oli tekkinud kahtlus, kas polnud tegu mitte mäetöösturite sooviga näidata väljatud varu kogust väiksemana (vt p Lineaarne trend).

³⁵ Rangelt võttes ei sisalda vahemikud „alla 15“ ja „üle 15“ üldse väärtust 15

2. MAAVARA UURINGU ALUSED

2.1.1. Uuringu põhimõisted

Maavara uuringuga tõestatakse tema kaevandamisväärsus. Uuring annab maardlale tarbimisväärtuse. Eesti 2005. a maapõueseaduse kohaselt

maardla on üldgeoloogilise uurimistöö või geoloogilise uuringuga piiritletud ja uuritud ning keskkonnaregistris arvele võetud maavara lasund või lasundi osa,

kusjuures maardlana võetakse arvele kogu lasund või lasundi osa, mis sisaldab maavara koos vahekihtidega. See tähendab, et maardla on küll loodusobjekt, kuid uuring on andnud talle uusi tunnuseid, sest maardlal on:

- geodeetiliselt määratud piirid
- ainuomane nimi
- registrikaart riiklikus (keskkonna)registris
- uuringu teostaja ning uuringutulemuste kontrollija, kes kinnitavad, et maardla on kvaliteetne ning vastab nõuetele.

Maardla kvaliteet ei ole sama mis maavara kvaliteet.

Maavara kvaliteeti

kirjeldavad kivimite, mineraalide ning setete mineraloogilised, füüsikalised, keemilised ja muud, tarbijat rahuldavad tunnused.

Maardla kvaliteedi

tagavad uuringu põhjalikkus, täpsus ja usaldatavus, mis vastavad tarbija nõuetele, kuid peavad rahuldama ka riigi kui maavara omaniku tingimusi

Nii maavara kui ka maardla kvaliteedi tase saavutatakse geoloogilise uuringuga ja nii võib öelda, et

maardla on toode

Toode on tegevuste või protsesside tulemus. Mineraaltoorme hankimise valdkonnas on tegevuseks ja protsessiks geoloogiline uuring. Kuna toode võib esineda kas asjastatud või mitteasjastatud kujul või ka nende kombinatsioonina ³⁶, siis maardla, tema kohta kogutud teave ja seda sisaldav dokumentide kogum vastab igati toote tunnustele. Seepärast peab maardla ja tema geoloogiline uuring vastama nõuetele, mis on kehtestatud toodete ja tootmisprotsessi kvaliteedi, usaldusväärsuse ning ohutuse tagamiseks. Selleks on maailmas välja töötatud hulganisti reegleid ja normatiivdokumente. Meie peaksime järgima eelkõige EÜ vastavaid direktiive ja nende alusel koostatud Eesti seadusi. Näiteks Eesti toote nõuetele vastavuse tõendamise seadus sõnastas juristidele omasel viisil sõnastab: "toode on ... vallasasi, mis on mõeldud tarbijale või mida tarbija võib eeldatavalt mõistlikul viisil kasutada ka juhul, kui see ei ole tarbijale ette nähtud, samuti teenuse osutamise korral tarbijale kättesaadavaks tehtud toode, mida tasu eest või tasuta pakutakse või tehakse kättesaadavaks majandus- või kutsetegevuse käigus, sõltumata sellest, kas toode on uus, kasutatud või parendatud".

Selle loogika kohaselt on mäetööstur tootja ja tema poolt tellitud maavara geoloogilist uuringut tegev isik (geoloog vi firma) on mäetöösturi volitatud esindaja, kes loob maardla. Tootja, s.t mäetööstur peab välja töötama kvaliteedisüsteemi, mis tagaks toote (maardla) vastavuse nõuetele.

Seaduse loogika kohaselt tuleb korraldada veel toote vastavushindamine. See on menetlus, mille eesmärgiks on teha kindlaks, kas toode (maardla) ja kvaliteedisüsteem (geoloogilise uuringu meetodika või juhend) vastavad nõuetele. Vastavushindamise tulemuseks on vastavusdeklaratsioon, -märk või -sertifikaat. Vastavushindamist peab tegema volitatud või tunnustatud asutus.

Neid protseduureegleid järgitakse Eesti nii maardlate uuringul, uuringutulemuste hindamisel kui ka otsuste tegemisel. Vastavushindamist teostav asutuse funktsiooni täidab Eesti maavarade komisjon.

³⁶ EVS-EN ISO 8402:1996. Kvaliteedijuhtimine ja kvaliteeditagamine. Sõnavara. Eesti Standardiamet.

Edasises käsitlemegi, kuidas tagada maardla kui toote kvaliteet³⁷. Kordame lühidalt mõisteid, mis on lahti kirjutatud raamatus „Eesti mäendus“³⁸.

Maardla uurituse täpsust ja usaldatavust, teisisõnu, maardla kvaliteeti iseloomustab varu usaldatavuse tase.

Uuritud maavara võib registris olla tarbe-, reserv- või prognoosvaruna.

Piiritletud ning uuritud tarbe- ja reservvaru kogum on **maardla**.

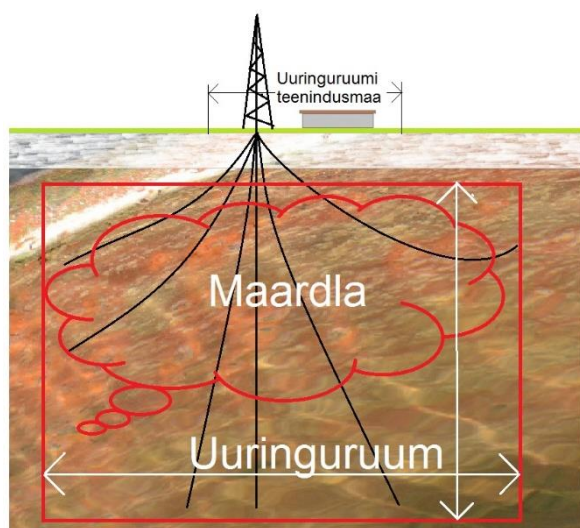
Prognoosvaru on maavara tunnustega kivimi, sette, vedeliku või gaasi lasund või selle osa, mille uurituse põhjalikkus ei vasta maardla kvaliteeti tagavatele nõuetele. Seepärast, kui ei ole tarbe- ega reservvaru, ei räägi me maardlast vaid **leiukohast**.

Maa-ala kohta, kus ei ole maardlat, ütleme **leiuala** või **leiupaik**. Seejuures leiuala on suurem ja leiupaik ahtam.

Maavara laialdane leiuala, kus on maardla või mitu, on **levila**³⁹. Kuna paljud leiupaigad on registreeritud vanade ja ebamääraste kasutamistingimuste alusel, siis ei ole levila jaoks mõistlik kasutada mõistet “perspektiivala” – see võib tekitada ressursist väära, ülemäära heade väljavaadetega mineraalressursi kuvandi.

2.1.2. Uuringuala ja -ruum

Selleks, et saada piisav ettekujutus maavarast, peaksid uuringu puuraugud ja kaevandid läbima kogu lasundi. Alati ei ole see võimalik ega otstarbekas.



Pilt 2.1 Sügavale ulatuva maardla uuringupuuraukude võimalik paigutus

Näiteks aluskorra kivimite puhul võib juhtuda, et mitmeid kilomeetreid maapõue ulatuva kehandi läbi puurimine pole tehniliselt võimalik. Nii oli see Maardu graniidi ja Jõhvi rauamaagi leiupaiga uurimisel.

Lasundi läbimine kõigi puuraukudega või kaevanditega pole otstarbekas ka siis, kui uuringu tellija annab teada, et mäetöödega ei mindagi lamamini. Näiteks, kui väljatakse ainult ülalpool põhjavee püsitasel olev maavara. Sellistel juhtudel projekteeritakse enamik puurauke (kaevandeid) ainult kaevandamisväärse lasundi osa ulatuses, tulevase mäeeraldise põhjani.

Siiski tuleks püüda osa auke teha sügavamad, või hinnata mõnel muul moel lasundi sügavamat osa, et saada andmeid allpool kaevandamispiiri.

Tavaliselt tellib tööstur maavara geoloogilise uuringu ainult ühe maavara hindamiseks. Uuritav maavara ei pruugi olla maapinna lähedal. Näiteks Eesti põlevkivimaardla lõunapoolsetel väljadel lasub kihind 30...90 m sügavusel. Ala, millel asutakse põlevkivi uurima, hõlmab kümneid ruutkilomeetreid ja ikka leidub seal mõne sellise kivimi või/ja sette lasundeid, mida teatakse kui maavara. Enamasti on need kruus, liiv ja turvas, kuid tuleb ette ka viirsavi, järvelupja ja -kriiti. Põlevkivikihi lasumis läbivad uuringupuuraugud paekihte, millest mitmed võivad vastata tehnilise (=tehnooloogilise) lubjakivi või ehituspae nõuetele. Maavaradena tuntud kivimite ja setete esinemine uuringualal võib tekitada otsuseid langetavates isikutes soovi ka neid ettevõtja kulul uurida. Ometi on selge, et ei ole mõistlik sama põhjalikkusega uurida maapõue osiseid, millel puudub tarbimisväärtus. Mõttetu on lasumi erimite põhjalik uuring siis, kui on teada, et sügaval lasuva maavara kaevandamine saab toimuda vaid

³⁷ Eestis sätestab selle keskkonnaministri 26. mai 2005. a määrus nr 44 “Üldgeoloogilise uurimistöo ja maavara geoloogilise uuringu tegemise kord

³⁸ Reinsalu, E. 2011. Eesti mäendus, TTÜ kirjastus, 186 lk.

³⁹ Vene keele mõjul on levilat nimetatud ka bassiniks. Geoloogia valdkonna mõiste 'bassin' on mõeldud andmaks ettekujutust laiapiirilistest settetingimustest. Mäenduses kasutagem seda vaid siis, kui tegu on kinnistunud mõistega nagu Donetsk, Karaganda või Kuznetski (kivisöe)bassin.

allmaamoodusel nii, et peal lasuvate (lamami) kivimite ja setete lasundid ei kahjustu. Seepärast on Eesti maapõueseaduses määratletud selline mõiste nagu

uuringuruum,

mis on geoloogilisteks töödeks määratud maapõue osa (Pilt 2.1 ja Pilt 2.2). Uuringuruumi määratledes peab olema ettevaatlik – sellesse ei tohiks kaasata lasundeid, mille kivim võib vastata maavara üldistele nõuetele, millega avaneks võimalus tekitada nn

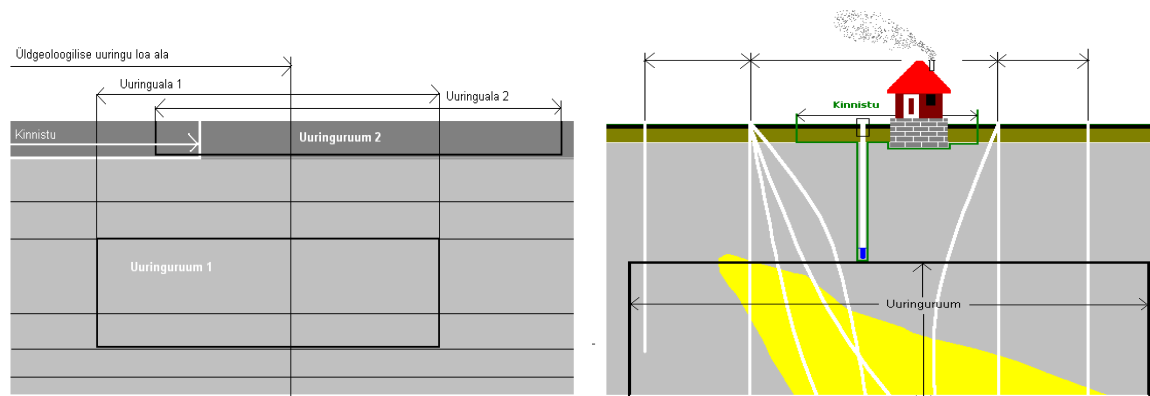
kompleksmaardla.

Kompleksmaardla, nõukogude maapõueõigusest pärinev mõiste, on maapõue osa, kus on koos mitu maavara. Üks neist, suurema majandusliku tähtsusega või suurema varuga, on nn põhimaavara ja teine (teised) vähema kogusega ja/või majanduslikult tähtsusetud on kaasnev(ad) maavara(d). Selline käsitlus oli mõistetav riigikapitalistlikus süsteemis, kus uuringu tellija oli riik, kes oli huvitatud mistahes mineraalressursist, ja kellel oli võimalus sundida oma ettevõtteid kaevandama mida tahes, ka ebamajanduslikke maavarasid. Kompleksmaardlate – kattuvate maardlate ja kaasnevate maarete probleematikat on käsitletud õpikus varem viidatud Mäemajandus, p 1.1.4.

Maapõue geoloogilisel uuringul tegutsetakse väga palju maa peal. Maa-ala, millel toimub geoloogiline välitöö, on

uuringuala,

mis tuleb geodeetiliselt fikseerida, kuid tema suhtes ei rakendata nii rangeid piiranguid ega nõudeid kui mäeeraldise teenindusmaa, eriti pealmaakaevandamiseks taotletava maa suhtes. Näiteks ei pea uuringuala maad ära ostma või rentima, sest enamasti saab tööd korraldada nii, et kõlvikuid ei kahjustata ja asukaid häiritakse vähe. Pilt 2.2 parempoolne skeem näitabki, kuidas puurimise sammu valikuga ja suunatud puurimise abil on võimalik uurida ka ehitiste all paiknevat lasundit. Maavara uuringu korraldaja ja projekterija väärtuslik kutseoskus ongi valida uuringuks sellised puuraukude, kaevandite ja geofüüsikalise mõõdistamise kohti, mis häiriks elanikke ja loodust nii vähe kui võimalik.



Pilt 2.2 Näiteid uuringuala ja uuringuruumi paiknemisest

Pildi vasakpoolsel skeemil on näidatud, kuidas üks uuringuruum on aluspõhja kivimeis ja teine kvaternaarisetteis. Kuigi uuringualad kattuvad, ei sega maavarade uuring teineteist, sest objektid erinevad ja uuringuruumid on lahus. Parempoolsel skeemil on näidatud, kuidas uuringuruum võib paikneda kinnistu all ja kinnistu ise paikneb uuringualal, kuid maa ja ehitised, ka kaev, jäävad uuringust puutumata, sest nad ei ole uuringuruumis sees.

Uuringuruumi täpne ja oskuslik piiritlemine peaks vältima huvide konflikte töösturite ja maaomanike ning uuringut tellivate töösturite vahel. Kui aga uuringuruumi ulatus on üldgeoloogilise uuringu staadiumis, kas teadmatuses või üldistes huvides jäetud määratlemata, võib probleeme tekkida. Seepärast ...

juba üldgeoloogilise uuringu raames tuleks uuringuruum määratleda

2.1.3. Uuringuluba

on mistahes uuringu vältimatu eeltingimus ja uuringu projekteerimise üks alusdokumentidest. Projekteerimise alustamiseks on soovitatav uuringuloa omaja käest saada lähteülesanne. Uuringuloa taotlemise kord ja nõuded on kehtestatud maapõueseadusega ja selle normatiivdokumentidega.

2.2. Maavara uuringu tööd

jaotuvad geoloogilisteks väli- ja sisetöödeks. Omaette töö liigid on maavara tehniline katsetamine ja maavara uuring kaevandamise käigus. Väga hea ülevaade geoloogilistest töödest on olemas professor Enn Pirruse õpikus Maavarade geoloogia⁴⁰.

Välitöö

käigus:

- mõõdetakse maad (need on geodeetilised tööd)
- mõõdetakse ja proovitakse (võetakse proove) paljandeid ning veekogusid
- rajatakse puurauke ja kaevandeid ning proovitakse neid
- tehakse proovikaevamisi ja -pumpamisi
- sondeeritakse maapõue
- ja tehakse muid uuringu tellimuse ning meetodikaga ette nähtud, uuringuloaga lubatud töid



Välitööd ei saa teha keskkonda ja asustust mõjutamata. Maa mõõtmiseks, sh mõõdistuspõhise rajamiseks, samuti maapõue sondeerimiseks rajatakse käike (trasse, marsruute, profiile), mis võib nõuda puude langetamist ja sihtide puhastamist. Puuraukude ja kaevandite rajamiseks projektikohasesse paika võib osutada vajalikuks uute teede ehitamine või vanade remontimine. Puurimise ja kaevamise kohtades muutub maakate isegi siis, kui töökoht korrastatakse.

Kestvamate tööde puhul võib osutada vajalikuks ajutuste hoonete ehitamine või paigaldamine.

Pilt 2.3 TTÜ mäetudengid autori juhendamisel välitööl.

Välitöö võib toimuda ka allmaa-kaeveõõnes. Foto Helena Gailan (Lind)

Sisetöö

on laboratoorne töö, maardla mõõdistamistulemuste analüüsimine ning aruande, sh plaanide ja kaartide koostamine ning vormistamine.

Laboratoorsed tööd kujutavad endast rutiinseid toiminguid, mis tuleb lasta teha nõuetele vastavates (sertifitseeritud) laboratooriumites. Maavara geoloogilist uuringut tellivatel ja teostavatel isikutel peab olema hea ettekujutus laboratoorsete tööde mahust ja protseduuridest. Üldiselt kuuluvad laboratoorsete tööde hulka:

- valmendamise (= proovi ettevalmistamine), millega geoloogi proov viiakse teimimist võimaldavas seisundisse; sisuliselt on see nn laboratoorse või analüütilise proovi (= analüüsitava koguse) tegemine
- analüütilise proovi teimimine, kontrollimine ja tulemuste vormistamine.

Teimimise alla kuuluvad purdmaterjali proovide lõimise laboratoorne määramine (sõelanalüüs), laboratooriumile antud proovimaterjali keemiliste ja füüsikaliste omaduste määramine, veeproovides leiduvate lisandite mõõtmine jne, kõik vastavalt uuringu tellija nõuetele.

Laboratoorsete tööde tellimisel tuleb arvestada, et laboratoorium hindab ja mõõdab ainult seda proovi, mis temale antakse. Kas laboratooriumile antud proov on esinduslik ehk kui hästi laboratoorse proovi tulemused iseloomustavad uuritavat maapõue osist, see sõltub täielikult proovi võtjast, tema kutseoskustest

Mõõdistamise tulemuste töötlemise meetodikat on kirjeldatud käesoleva õpiku punktides 1.1 Looduslike objektide mõõtmisest ja mujal 1. osas.

Plaanide ja kaartide vormistamine kuulub uuringu aruande koostamise alla.

⁴⁰ Pirrus, E., 2000, Maavarade geoloogia, TTÜ kirjastus, 81 lk; digiversioon, 2007, <http://digi.lib.ttu.ee/i/?153> .

2.2.1. Maa mõõdistamine

Maavara uuringu tarbeks ja käigus koostatakse uuringuala kaart või plaan. Selleks rajatakse või arendatakse mõõdistuspõhis ja koostatakse maa-ala plaan. Plaanile kantakse geograafiline ja geoloogiline situatsioon, maavalduste piirid, servituudid ning tehnovõrgud ja -rajatised.

Töö oluline osa on geoloogiliseks uuringuks vajalike mõõtmiskohtade (vt edasises) ja objektide, näiteks juurdepääsuteede, ajutiste ehitiste, veevõtukohtade jne maastikku märkimine.

Maa mõõdistamistöö maht määratakse ja töö metoodika täpsustatakse uuringu projektis. Peamiselt sõltub see uuringu lähteülesande nõuetest ja uuringuala maastiku keerukusest. Maa mõõdistamisel tuleb järgida geodeetilisele süsteemile esitatavaid nõudeid.

2.2.2. Proovimine

Kõigi maavarade uuringu kavandamisel, projekteerimisel ja teostamisel tuleb juhendada järgmistest nõuetest:

- proovid võetakse kivimite ja setete (litoloogiliste) erimite kaupa
- kõigis mõõtmiskohtades (sondeerimiskohtades) määratakse lasundi kogupaksus ja võimalusel kirjeldatakse ka lamam
- kõigis mõõtmiskohtades (sondeerimiskohtades) määratakse põhjavee taseme kõrgus

Kaljuste ja poolkaljuste kivimite mõõtmine ja proovimine

Kaljuseks nimetame kivimeid, mille katsekeha survetugevus (=teimitugevus) on üle 10 MPa (Tabel 28) või RQD₁₀ tugevusklass üle keskmise (Tabel 30)⁴¹. Kaljused maavarad on põlevkivi, kõik paekivi erimid ja aluskorra kivimid. Fosforiit, mõned põlevkivi kihid avamuse lähisel, kambriumi ja devoni savid ning liivakivid, kuigi nad kõik kuuluvad aluspõhja, on nõrgemad. Nimetame neid poolkaljusteks.

Tabel 28 Kivimite klassifikatsioon katsekeha survetugevuse alusel

Tugevusklass	Survetugevus MPa	Näiteks	
		Eestis (sh aluskorras)	Maailmas
Poolkaljused	5...10	Liivakivid, fosforiit, kambriumi savi	Soolad
Kaljused, nõrgad	10...40	Põlevkivi, savikivi, domeriit, mergel	Kivisüsi, porsunud kivimid
keskmised	40...140	Paekivi – lubja- ja dolokivi	Kildad, liiva- ja lubjakivid
tugevad	140...200	Moonde- ja tardkivimid, soonkivimid, marmor	
väga tugevad	> 200	Kvartsiit, basalt, diabaas	

Kivimite omadustest rääkides tuleb eristada mõistepaare tugev / nõrk ja kõva / pehme. Eristamiseks sobib mõttemudel: **teras** on tugev, **klaas** on kõva.

Tabel 29 Maapõue ja kivimite omaduste mõistete lahknevus

Keel	Mõisted:	Iseloomustavad:
eesti inglise inglise saksa vene	tugev – nõrk <i>strong – weak</i> * <i>good – poor</i> * <i>stark – schwach</i> <i>крепкий - слабый</i>	maapõue, massiivi, lasumit, lamamit
eesti inglise saksa vene	kõva – pehme <i>hard – soft</i> <i>hart – weich</i> <i>твёрдый - мягкий</i>	kivimit, mineraali

Inglisekeelsete mõistete lahknevus Tabel 29 tuleneb kasutajast ja keelest. Erinevusi on Ameerika Ühendriikide, Austraalia, Iirimaa, Inglismaa, Lõuna-Aafrika ja teiste mäetööstusriikide terminoloogias, kuigi kõigi nende keele aluseks on inglise keel. Ka eesti keeles esineb mõistestiku olulist lahknevust. Näiteks pinnasemehaanikas nimetatakse kõvaks sellist savi, millel on savide hulgas suurim survetaluvus (>0,4 MPa).

⁴¹ Endistest aegadest on Eesti maavarageoloogide praktikasse jäänud kivimi tugevuse hindamise klassifikatsioon, mille aluseks on 3" (7 cm) pikkuste puursüdamiku lõikude saagis. Peale selle rakendavad meie geoloogid normatiivdokumentides graniidi jaoks veel erilist, 50 cm pikkust südamiku terviklikkuse nõuet (tinglikult RQD₅₀). Vastavalt sellel peame eristama globaalset (RQD₁₀) ja lokaalseid (RQD₇, RQD₅₀) kivimi tugevuse skaalasisid.

Tabel 30 RQD₁₀ kivimi tugevuse klassifikatsioon (Mäemajandus, tabel 1.1.17, parandatud)

Üle 10 cm pikkuste puursüdamiku osade saagis %	Kivimi klass inglise keeles	Klassi eestikeelne vaste
0...25	<i>very poor</i>	väga nõrk
25...50	<i>poor</i>	nõrk
50...75	<i>fair</i>	keskmise tugevusega
75...90	<i>good</i>	tugev
90...100	<i>excellent</i>	väga tugev

Ehituskivi oluline tunnus on tugevus. Soovituslikult peaks settelise ehituskivi RQD₁₀ olema vähemalt keskmises tugevusklassis ja setteline viimistluskivi ning kristalliinne ehituskivi (graniit) peaksid kuuluma tugeva kivimi klassi. Eesti süsteem on kombinatsioon vanast vene hindamissüsteemist (tinglikult RQD₇), kus terve südamiku pikkus pidi olema 3' = 7 cm, mitte 4' = 10 cm nagu RQD₁₀ (järgmine tabel).

Tabel 31 RQD₇ ja RQD₅₀ näide Eesti normatiivdokumentidest

Kivim	RQD ₇ vähemalt, %	RQD ₅₀ vähemalt, %
Graniit	25	
Graniit viimistluskiviks		25
Paekivi	25	
Paekivi viimistluskiviks	50	

Kaljuste kivimite peamine uurimismeetod on **südamikpuurimine**, millega saadakse lasundit iseloomustav puursüdamik (

Pilt 2.4, Pilt 2.5 ja Pilt 2.7).



Kõrval pildil on südamikukasti pikkus üks meeter, seepärast on näha, et kogu proovi ulatuses on tingimus „üle 7 cm pikkuseid lõike > 25 %“ kindlalt täidetud. Kõige alumises jaos moodustavad kolm >10 cm pikkust lõiku lahtris üle 50 %, mis tähendab, et südamiku selles osas tegu on keskmise tugevusega kaljuse kivimiga.

Pilt 2.4 Lihvitud pealispinnaga lõhestatud puursüdamiku näidis Harku lubjakivimaardlast

Kaljuste kivimite proove võib saada ka paljandisse raiutud vaost. See on **vaguproovimine**. Kaljuse kivimi lasundi seina raiutakse piisava ristlõikega vagu, millest irrutatud materjal moodustab proovi. Vao ristlõike mõõtmed ehk pindala, mis sõltub proovitava kivimi homogeensusest, tuleb määrata eelneva uuringu alusel. Üldiselt on vaguproovimine vähem esinduslik, sest proov iseloomustab kihi struktuuri vähem täpselt kui puursüdamik. Kivimi irrutamisel vaost või paljandist toimuv materjali valikuline purunemine⁴² on tahes-tahtmata suurem kui puurimisel. Samuti on paljand või koht, kuhu vagu raiutakse, olnud ilmastiku või tehnogeense (lõhkamise, reostamise jm) mõju all. Seepärast võiks vaguproovimine, jääda geoloogilise kaardistamise ja maavara otsingu staadiumi, kui uuringala on suur ja suurema keskkonnamõjuga ning kallid südamikpuurimine ei õigusta end.

⁴² Valikuline purunemine tähendab, et proovivao raiumisel ja südamiku moodustumisel puruneb nõrk kivim rohkem kui tugev. Selle tulemusel võib puurimisel osa pehmest materjalist kaotsi minna ja vaguproovimisel osa kõvast kivimist jääda irrutamata.



Pilt 2.5 Südamikpuurimine Jordaania põlevkivimaardlas

OÜ Steiger fotokogu



Pilt 2.6 Vaguproovi irrutamine fosforiidikaevanduses

Kivimi valikulise purunemise tõttu ei ole isegi nõrgemate ja rabenenud kivimite südamikproovid esinduslikud, s.t terved, täiemahulised (Pilt 2.7). Seepärast tuleb poolkaljuste maavarade uurimisel lisaks südamikproovimisele ette näha veel vähemalt üks täiendavat kontrolli võimaldav meetod. Näiteks puuraugu üle mõõtmise mõne geofüüsikalise meetodiga. Kõne alla tulevad ka kaudsed meetodid, näiteks mehhaaniliste omaduste määramine puurimise kiiruse ja energiamahukuse abil, samuti kvaliteeditunnuste ekstrapoleerimine trendi analüüsi ja/või arvutimodelleerimise alusel.



Pilt 2.7 Puursüdamik Ubja uuringuväljalt.

Kalle Suuroja foto.

Pildistatud puursüdamiku kasti lahtrites, paremalt vasemale: muld (1), moreenmaterjal (1...3), rabenenud paekivi (3...5), nõrk paekivi (5...8), keskmise tugevusega paekivi (9), nõrk paekivi (10...11), keskmise tugevusega paekivi (12...13), põlevkivi (14...16), keskmise tugevusega paekivi (17).

Erinõuded põlevkivi mõõtmisel ja proovimisel

Kui uuring näeb ette õli saagise määramise, siis selle võib arvutada kütvuse alusel. Kui aga uuring näeb ette põlevkivi tehnilist proovimist, siis proov, mis kujutab endast ühe või mitme kihi koondmaterjali, tehakse ja proovitakse vastavalt lähteülesande tingimustele. Koondproovi töödeldakse Eesti põlevkivitööstuse ametkondliku proovimismetoodika kohaselt.

Puistesetete mõõtmine ja proovimine

Tüüpilised puistesetted on liiv ja kruus. Kõigil proovidel määratakse lõimis ning fraktsioonid ⁴³, milleks on kasuliku ja/või kasutu (vajadusel ka kahjuliku) aine sisaldus kõikides klassides. Lõimise määramise metoodika ja määratavad tunnused (fraktsioonid, komponentide sisaldused jm) määrab uuringu tellija.

Puistesetete proovimisel, nagu ka südamik- ja vaguproovimisel on oluline proovi esinduslikkus. Mida jämedam on purdmaterjal, seda suurem proov tuleb võtta. Purustatud põlevkivi proovimise kogemuse ja nõuete põhjal võib soovitada puiste proovi massi määramiseks valemit

$$M = 1,65 \chi_{\max}^{1,6}$$

kus χ_{\max} on proovitava materjali suurima osise (tera, veerise, munaka, killu, tüki jne) nominaalmõõde, mm. Nominaalmõõde määratakse kas rõngaga, millest saab osise läbi panna, või silma järgi. Nominaalmõõdest vt eelpool – punkt 1.1 Looduslike objektide mõõtmisest.



Pilt 2.8 Kruusaproovi käsitsi jaotamine neljaks osaprooviks

Kogu proovi, eriti kui selle mass ulatub sadadesse kilogrammidesse, ei pea peenimate osakeste koguse ja jaotuse määramiseks tervenisti läbi sõeluma. Suur proov kahandatakse järkjärgulise jaotamise teel osaproovideks. Kõigepealt jaotatakse proov jämedamaks ja peenemaks osaks. Seejärel peenem osa jaotatakse, tavaliselt neljaks osaprooviks, millest ühte jaotatakse edasi – jällegi eraldatakse peenem osa ja see jaotatakse. Jaotamiseks on olemas ka sobivad jaoturid.

Nii saab proovi esinduslikkust vähendamata sobiva massiga laboratoorseid proove.

Proovi kahandamisel tuleb jälgida, et iga järgneva astme osaproovi mass poleks väiksem ülal toodud valemiga määratud proovi massist.

Sage viga, mida puistematerjali proovimisel tehakse, on proovi võtmine puistangu, paljandi või karjääri tööastangu jalamile varisenud materjalist, mõtlemata, et hunniku servas on purdmaterjal alati mingil määral sorteeritud – sinna on veerenud suuremad osised.

Erinõuded turba ja veerikaste setete uurimisel

Turba oluline kvaliteeditunnus on kännusus, mille mõõtmiseks rajatakse uuringualal vähemalt kaks mõõtmisväljakut. Väljaku piisavad mõõtmed määratakse eelneva teabe alusel.

Turba varu mass, mis on määratud tingliku niiskusesisaldusega 40 %, arvutatakse mahu alusel. Arvutuses vajalik mahumass leitakse turba niiskusesisalduse kaudu. Vett sisaldava materjali mahumassi valem on

$$d_w = W / 100 + (1 - W / 100) d_t$$

kus: W on materjali veesisaldus, % ja d_t on tahke osise, antud juhul turba tihedus (ka mahumass), t/m^3 , kg/dm^3 või g/cm^3 .

Näiteks kui turba tihedus on $900 kg/m^3 = 0,9 t/m^3$, siis

⁴³ Ehitusmaterjalide mõistestikus tähistab 'fraktsioon' killustiku tükisuurust, mis mäenduses on 'klass'. Mäenduses, eriti rikastamisel tähendab 'fraktsioon' klassi eri omadustega komponente, näiteks põlevkivi, paas, liited (=kämpud). Erinevuse aluseks on asjaolu, et ehituses on 'klass' kasutusel kvaliteedi (sordi) tunnuseks: esimese, teise ja kolmanda klassi killustik.

$$d_{40} = 40 / 100 + (1 - 40 / 100) 0,9 = 0,4 + 0,6 \times 0,9 = 0,94 \text{ t/m}^3$$

Järvelubja ja teiste veerikaste setete varu mass, tingliku niiskusesisaldusega 60 %, arvutatakse mahu alusel. Arvutuses vajalik mahumass leitakse sama valemi abil sette niiskusesisalduse kaudu.

Kiirgushinnang

on oluline, sest maapõu võib sisaldada mitmesuguseid ohtlikke kiirgusallikaid. Siiski, kui on teada, et uuritav maavara ja maapõu ei sisalda radioaktiivseid elemente, võib kiirgushinnangu ära jätta. Kindlasti tuleb aga kiirgushinnang uuringu projekti võtta:

- aluskorra uuringul, sest tard- ja moondekivimites on kõrgendatud radiatsiooniga mineraalide ja elementide, sh kaaliumi radioaktiivse isotoobi esinemise tõenäosus suur,
- fosforiidi ja eriti tema lasumis oleva, uraani sisaldava savikivi (graptoliitargilliidi) uuringul,
- turba uuringul.

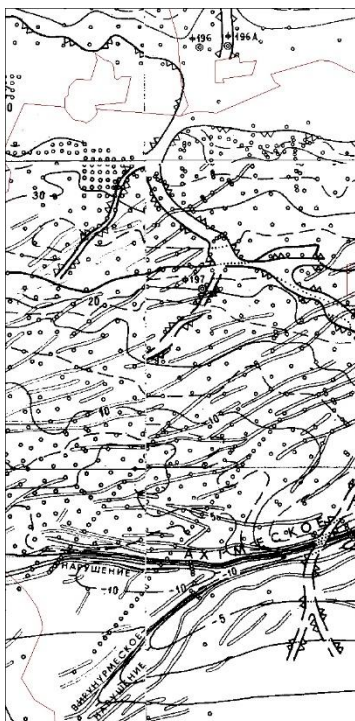
Aluskorra ja savikivi lähiskivimite, eelkõige fosforiidi uuringul tuleb silmas pidada võimalust, et maapõuest imbuv radioaktiivne radoon võib koguneda poorsetesse kivimitesse ja nende kavarnidesse (tühemikkudesse), nn kollektoritesse. Radooni emissiooni võimalusega tuleb igal juhul arvestada, kui maavara geoloogiline uuring toimub süvakaevandamise suunitlusega.

Turba puhul tuleneb kiirgushinnangu vajadus kolmest aspektist:

- Lõuna-Eestis, nn devoni kivimite alal on turbas avastatud lokaalseid, geoloogilise tekkega kõrgeenenud radioaktiivsete elementide sisaldusi,
- meie tingimustes ja üldse kaasajal ei ole välistatud rabade tehnogeenne, eelkõige militaarset päritolu radioaktiivne reostamine,
- turvas on potentsiaalne eksporditav, seepärast tuleb tema puhul igal juhul arvestada tarbijate kõrgendatud huvi radiatsiooniohu vastu.

2.2.3. Maapõue häirituse uurimine

Maapõue häiritus on mäendustingimuste oluline osa. Suuremate vigade vältimiseks on otstarbekas enne südamikproovimise kohtade mahamärkimist hinnata maapõue häiritust, näiteks elektrometrilise või/ja gravimeetrilise mõõdistamise abil.



Pilt 2.9 Maapõuehäired põlevkivimaardlas ⁴⁴

Mõõdistatakse nn käikude meetodil, kusjuures käigud orienteeritakse risti maapõue valdava rikutuse suunaga. Teatavasti on peamised ja mäenduslikult olulisemad rikke- ehk karstivööndid kirde-edelasuunalised, mistõttu geofüüsikalise mõõdistamise käikude direktsiooninurk võiks olla 300...330°. Põlevkivimaardlate uuringu praktika alusel peetakse maapõue elektrometrilisel mõõdistamisel käikude optimaalseks vahekauguseks 0,25...0,5 km ja punktide vahekauguseks käigul 10...25 m. Elektrometriline mõõdistamine on rahuldava usaldatavusega näidanud karstivööndite olemasolu kuni 30 m sügavusel. Suurema kindluse huvides tuleks elektrometrilise mõõdistamisega leitud nn anomaalseid vööndeid veel vertikaalselt sondeerida, mis tähendab, et mõlemale poole kahtlustatavat ala puuritakse auk ja kivimeid nende vahel sondeeritakse mingi geofüüsikalise meetodiga.

Gravimeetriline mõõdistamine on otstarbekas mattunud ürgorgude nõlvade lähistel, käikudega, mis on suunatud risti oru eeldatava suunaga. Otstarbekaks gravimeetrilise mõõdistamise vaatluspunktide vahekauguseks käigul peetakse 10...50 m.

Kui tekib kahtlus, et maapõues võib peituda mõni suurem häiritud ala, eriti kui see paikneb kavandatava mäeeraldise olulisel osal, on soovitatav see tiheda võrguga või puurimiskäikudega lahti puurida. Kindlasti suurendab see oluliselt uuringu maksumust, kuid avastamata hälve võib kaevandamisel põhjustada palju suuremat kulu kui uuringusse paigutatud raha.

⁴⁴ Vaher, R. 1982. Kirde-Eesti struktuurkaart mõõtkavas 1:100 000; kandidaaditöö; Kirde-Eesti fosforiidi ja põlevkivi levila tektoonika (vene k).

Pilt 2.9 näitab, kuidas geofüüsikaliste mõõtmistega avastatud anomaalsed alad paiknevad kirde-loodesuunaliste vöönditena. Pildi ülaosas on näha mitu hargnevat mattunud ürgorgu. Pildi allaosas on näha, kuidas Ahtme rikkevöönd hargneb kaheks. Punktid tähistavad uuringupuuraue ja punktide jadaid on maapõue häirituse uurimiseks rajatud puurimiskäigud.

2.2.4. Hüdroteoloogiliste ja hüdrololoogiliste tingimuste uurimine – veeuuring

Maavara kaevandamine muudab igal juhul piirkonna vee seisundit. Sellest tingituna on veeuuring maavara geoloogilise uuringu oluline osa.



Pilt 2.10 Põhjavee taseme mõõtmine Harku ehituslubjakivi maardla vaatluskaevus

Veeuuring – hüdroteoloogilise ja hüdrololoogilise situatsiooni hindamine, tuleb teha kogu maardlal ja seda ümbritseval alal ehk levilal. See tähendab, mitte ainult uuringualal, vaid laiemalt. Veeuuringu objektideks on põhjaveekihi, pinnavesi ja veekogud, sood, veerohkete kivimite looduslikud ja tehispaljandid, puuraugud ning kaeveõõned, veehaarded, drenaaži- ja hüdrotehnilised süsteemid, pinna- ja põhjavee teadaolevad ja võimalikud reostusallikad, töötavad mäeettevõtted.

Kui on teada, et kaevandamine hakkab mõjutama põhjaveekihte ehk kui maavaralaseund on kasvõi osaliselt allpool põhjavee taset, tuleb veeuuring teha täisprogrammi kohaselt. Täisprogrammi kuulub:

- veetaseme mõõtmine ja proovide võtmine uuringu käigus puuritavatest puuraukudes, varem rajatud (vaatlus)kaevudes ja looduslikes ning tehnoogeensetes veekogudes
- uuringu käigus puuritud ja võimalusel ka olemasolevate hüdroteoloogiliste puuraukude (kaevude) katse- ja proovipumpamised ning nende vooluhulga hindamine
- hüdromeetrilised tööd, sh veemõõtmispunktide ehitamine vooluvees ja veekogudes.

Kui kaevandamine ei alanda vee taset maapõues s.t kaevandada saab ülalpool põhjavee taset, võib loetletud tööde nimekirja uuringu lähteülesandes lühendada. Kuid veeuuring tuleb teha mistahes maardla puhul, sest pinnase eemaldamine ja reljeefi muutmine, kaevandamine ja selle lõpetamine tekitab igal juhul põhja- ja pinnavee rikkumise ohu.

2.2.5. Tehniline katsetamine

Kui maavara tarbijal puudub uuritava ressursi kasutamise kogemus, tuleb uuringu käigus väljata tehniliseks katsetamiseks piisav kogus uuritavat maaret. Enamasti toimub katsetamine uuringu tellija poolt määratud tehases või seadmel. Uuelaadse maavara töötlemise tehniline protsess võib olla keeruline ja pikaajaline. Tavaliselt peab mineraaltooret töötlev seade uue toormeliigi kasutamisel sisse töötama. Seejärel saab seadet reguleerida optimaalsele režiimile, milles ta peab mõne aja töötama, et anda piisav kogus toodangut. Koguse saab ette näha ja põhjendada vaid maavara uuringu tellinud tööstur. Suurema koguse puhul võtab tehnilise proovi väljamise kaevand kaevanduse mõõtmed.



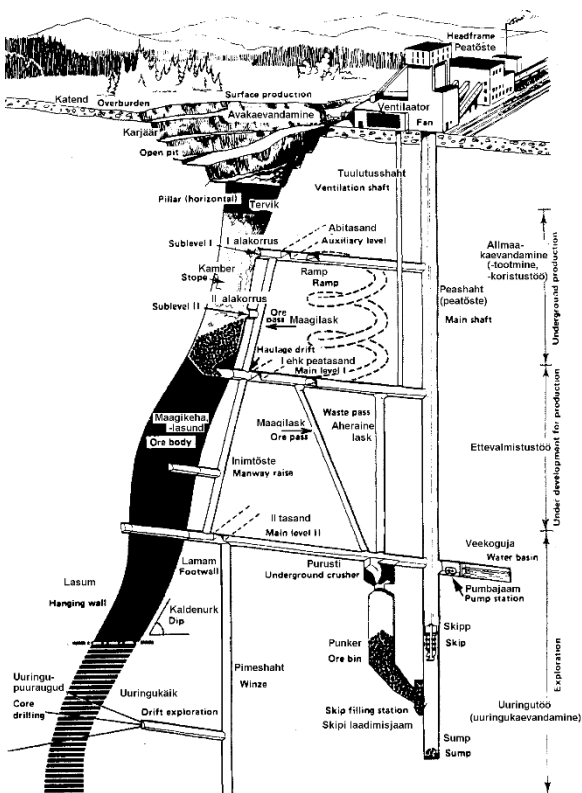
Pilt 2.11 Üks viimase aja suuremaid põlevkivi katseteadmeid – AOSTRA Taciuk Processor (ATP) tehnoloogia katsetamine Austraalias

Pilt firma kodulehelt

Väga mahukate uuringute puhul ehitatakse uude maavara katsetöötlemiseks minitehas ehk pilootseade. Põlevkivi töötlemise pilootseadmeid on kasutatud Austraalias, Jaapanis, Brasiilias ja USA-s. Ka Kiviõlis oli eelmise sajandi kuuekümnendatel aastail põlevkivi utmise katsetamiseks tahke soojuskandjaga pilootseade ja hiljem, kaheksakümnendatel aastatel selle tehnoloogia katseseade.

Maavara uuringu käigus on suuremahulisi tehnilisi proove võetud Toolse fosforiidileiukohas rikastatavuse katsetamiseks, Kurevere dolokivimaardlas, et hinnata selle sobivust tehniliseks kiviks ja Piusa liivamaardlas, proovimaks klaasiliivana tuntud kivimit vormiliivaks.

2.2.6. Maavara uuringu kaevandamise käigus



Pilt 2.12 Geoloogiline uuringu käigud ja puuraugud süvakaevanduses

Maardla geoloogilise uuringuga ei ole võimalik ega ka vajalik saavutada suurimat täpsust. Piisab, kui maavara kvaliteet ja kogus ning maardla piirjooned on kindlaks määratud tootmist lubava usaldusväärsusega. Üldhinnanguliselt jääb ka kõige täpsema uuringu puhul umbes viiendik ehk 20% teabest saamata. Seepärast on täiesti loomulik, et maavara uuring jätkub kaevandamise ajal. Klassikaline, paljudes mäenduse õpikutes korduv süvakaevanduse põhielemente tutvustav skeem kõrval pildil näitabki uuringukaevanduse suurt sügavusel, rajatud selleks, et otsustada, kas minna sinna kaevandama või mitte.

Varasemas keelepruugis kandis kaevandamise käigus tehtav geoloogiline tegevus järel- või eksploatatsioonilise uuringu nimetust.

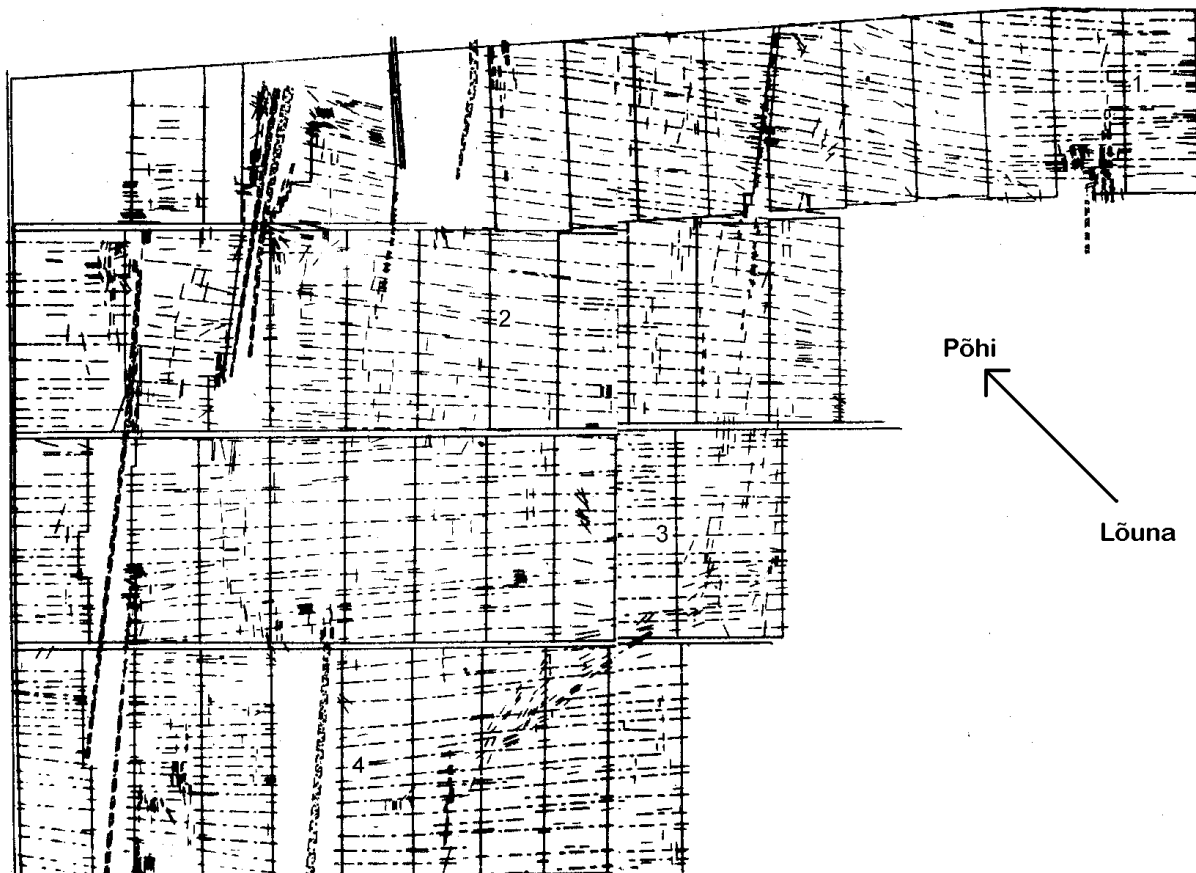
Kaevandamise ajal tehtava uuringu puhul peab silmas pidama, et ilma uuringuloata võib seda teha vaid oma mäeeraldise piires. Mäeeraldis on aga teatavasti maapõues piiritletud ruum. Tuleb teadvustada, et allmaakaevandamiseks antud mäeeraldise ei kuulu ei maapealsed ega sügaval maapõues lasuvad maarded.

Kaevandamisaegse uuringu peamised eesmärgid on:

- maavara kvaliteedi, eriti selle muutumise iseloomu täpsustamine,
- mäendustingimuste uurimine,
- olematu ehk geoloogilise uuringuga ekslikult arvele varu võetud tuvastamine ja registrist kustutamine.

Maavara kvaliteedi uuring on pidev. Näiteks tehnilise paekivi kaevandamisel, kui lasundi kvaliteedi muutlikkus on suur ja nõuded kauba kvaliteedile kõrged, võidakse kvaliteediproove võtta igast lõhkamise tarbeks tehtud puuraugust, seega sammuga isegi 2 × 2 m.

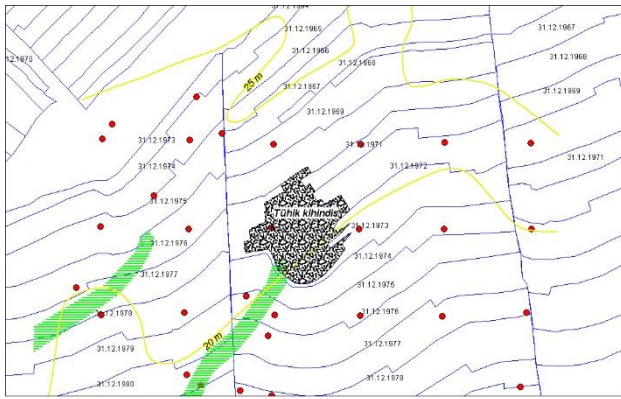
Mäendustingimuste uuringul jälgitakse esmajoones maapõue häirituse ilminguid, mõõdetakse lõhede vahekaugust, karsti iseloomu, kivimi mehhaaniliste omaduste muutumist jne. Kõik sellised nähud fikseeritakse kaevevälja avamisel ja lõigustamisel. Pilt 2.13 illustreerib, kuidas lõhed, mida märgati kaevanduskäikude läbimisel ja kanti mäetööde plaanile, kirjeldavad maapõue häiritust põlevkivikihi tasandil.



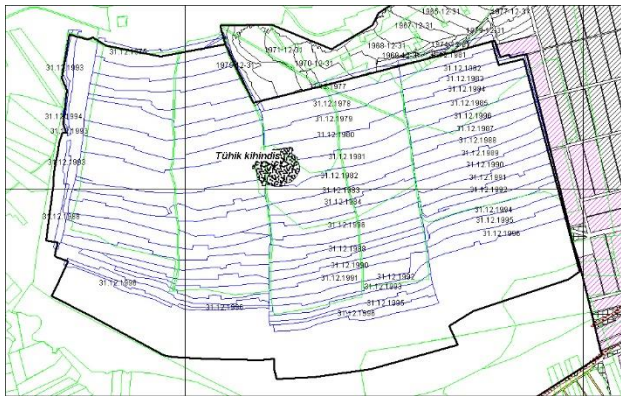
Pilt 2.13 Kaevevälja lõigustamise käigus leitud lõhed Venemaal, Leningradskaja kaevanduse põhjaosas.

Kaevandamise käigus toimuv geoloogiline uuring käib pidevalt, sest maa peal tehtud töö ei suutnud tuvastada kõiki kohti ega alasid, kus lokaalse maapõuehäire tõttu maavara puudub või ei vasta nõuetele. Nii on mäeeraldisel alati mingi osa olematut varu, mis Eesti tingimustes on enamasti seotud karstinähtustega. Vastavalt mäetööde liikumisele dokumenteeritakse kõik kõrvalekaldumised geoloogilise uuringu andmestikust ja korrigeeritakse kaevandatava varu kogust. Kaevandamise käigus teostataval geoloogilisel uuringul varu kogus tavaliselt väheneb mitmel põhjusel:

- häiritud alal maavaralase puudub, või on sedavõrd moondunud (lõhenenud, asendunud), et seda ei saa lugeda maavaraks; näiteks karstivööndites on põlevkivi asendunud saviga;
- häiritud alal ja selle lähedal lasuva kivimi kvaliteet ei vasta maavara nõuetele; tavaliselt on karstilähedastel aladel lubjakivi sedavõrd dolomiidistunud, et ei vasta tehnilise lubjakivi tingimustele; samuti on klaasiliiv rikkevööndi lähistel ja lõhenenud kivimis tunduvalt rauarikkam kui klaasi toormeks sobib;
- mäendustingimused ei võimalda ohutult kaevandada; allmaakaevandamisel on tavaline, et sagedaste lõhede ja lae ebapüsivuse tõttu ei ole kaevandamine tavatehnoloogiaga ohutu; eritehnoloogia on aga kallid, mistõttu rikkelahedane maavara kaotab kaevandamisväärsuse.



Pilt 2.14 Olematu varu ala Sirgala karjääris



Pilt 2.15 Olematu varu ala Aidu karjääris

Põlevkivi kaevandamise ajaloost on tuua näiteid, kuidas suured kogused kaevandamisväärsena arvele võetud varu on osutunud olematuks.

1971. aastal jõuti Sirgala põlevkivikarjääris alale, kus kihindit ei olnud. Kolme aasta jooksul kaevandati ümber tühja koha, mille pindala oli 220 ha. Nii osutus olematuks umbes 0,7 mln t varu, kuigi kaeveväli oli korralikult uuritud. Vastavalt toonastele A-kategooria varu nõuetele oli puurimise samm 500 m (punased punktid pildil), ent anomaalsel alal õnnestus jääda aukude vahele.

Sarnane nähtus avastati 1981. a Aidu (tollal Oktoobri) karjääris. Alast mõöduti kahe aasta jooksul. 211 hektaril osutus olematuks pea sama kogus varu kui Sirgalas.

Neid anomaalseid alasid uuriti hiljem, kuid ühest seletust häire tekkimise kohta ei ole. Nii ei saa ka anda mingeid mõistlikke soovitusi selliste ilmingute avastamiseks.

Ajaloost on teada ka äpardus, kui eelmise sajandi viiekümnendatel tuli lõpetada põlevkivikaevanduse nr 11 ehitamine, mille projekteerijad olid paigutanud Kohtla raudteejaamast põhja pool alale, kus põlevkivi ei olnud ⁴⁵.

Õpetlik kogemus maavara varu täpsustamisest

Mitte alati ei ole mäeinsenerid tegelenud ainult olematu varu dokumenteerimisega ja selle maha kandmisega. Plaanimajanduse ajal tuli ette, et põlevkivikaevandused esitasid varukasutust kontrollivale organile dokumente, mis pidid näitama, et kihindi tootlus oli osutunud suuremaks kui geoloogilise uuringu käigus arutati. Kuid see ei pruukinud tulla uuringu puudulikkusest. Loogiline on arvata, et kui põlevkivi varu on määratud põlevkivi kihtide kuiva massi summana, kuid kaevanduste müüdnud kaubapõlevkivi sisaldab alati 5...10 % aherainet ja kuni 14 % vett, siis varukasutuse ja kaubatoodangu kokku viimiseks üritati korrigeerida kihindi tootlust. Seoses selle üsna mõttetu kontrolli lõpetamisega majanduskorra muutudes ning kaevandamistasu sõltuvusse viimisega kasutatud varu kogusest, on varu ja toodangu sobitamine mäeinseneride tööülesannete seast kadunud. Samas on väljatud varu koguse eest maksmine tekitanud neile uue ja veelgi raskema ülesande – tõestada, et mäeeraldisel on kohti, kus maavara polnud või osutus kaevandamiskõlpsmatuks. Olematu varu mõõdistamine ja dokumenteerimine ning eriti just selle fakti tunnustamise taotlemine maardla nõuetele vastavuse hindaja ehk Eesti maavarade komisjoni ees läheb mäetöösturitele tunduvalt kallimaks kui kaevandamistasu maksmine olematu varu eest. Mida nad ka teevad.

Maavarade komisjoni ettevaatus olematu varu tunnistamisel on vägagi põhjendatud, sest vastupidist fakti – et maavara varu kogus mäeeraldisel osutus suuremaks kui maavara kaevandamisloaga saadi – ükski mäetööstur ei dokumenteerinud ega maavarade komisjonile ei edasta. Ainus laiemalt tuntuks on saanud juhtum on nn Sompma-Kohtla-Ojamaa anomaalia, kui põlevkivi kaevandamise käigus selgus, et maavara kvaliteet osutus tunduvalt paremaks, kui geoloogilisel uuringul julgeti fikseerida. On alust arvata, et toimus see, millest oli juttu eelpool, p 1.2 lõpus, lk 23.

⁴⁵ Kui selgub, et geoloog on välitöö puursüdamikku kirjeldanud pealiskaudselt, öeldakse, et ta tegi seda „sadulast“ - ratsutas kohale ja viskas pilgu südamikukastidele ilma, et oleks hobuse seljast maha tulnud. Ehitamata jäänud kaevanduse nr 11 kohta räägiti, et projekteerijad panid selle paika lennukilt.

Mõeldav on ka kaevandamise käigus tehtav maavara geoloogiline uuring väljaspool oma mäeeraldist, näiteks mäeeraldisega külgneva reservvaru usaldusväärsuse hindamine või ka hoopis teise, mäeeraldisest all või peal oleva potentsiaalse maavara lasundi kaevandamisväärsuse hindamine. Eestis nõuab selline tegevus uuringuluba.

2.3. Uuringu projekteerimise alused

2.3.1. Üldised nõuded maavarale

Maavarana võetakse arvele kivim, sete ⁴⁶, vedelik või gaas, mis vastab geoloogilise uuringu loas ja uuringu lähteülesandes kehtestatud nõuetele ning loomulikult siis, kui varu on geoloogilise uuringu protseduuridega tõestatud. See eeldab, et uuringuloa taotlejal on küllaldane ettekujutus tema tarbeks uuritava mineraaltoorme omadustest, sest just uuringuõiguse taotlemise staadiumis defineeritakse maavara kui äriiline objekt.

A.



Põhjendatud vajadusel tuleks maavarana arvele võtta ka loodustunud tehnogeenseid kivimeid ja setteid, näiteks varasemal kaevandamisel väljatud aheraine, rikastamisjäätmete, tuha jt panilad. Selline vajadus tekib, kui ammu ladestatud aherainel või jäätmeil, kasvõi kunagise vabriku katlamajas põletatud põlevkivi tuhal ei ole teist omanikku peale riigi.

Kuigi tehnogeensete kivimite ja setete lasud (kuhilad) ei ole loodusressurss, sest nad ei ole looduse loodud, on nad tihti muutunud looduse osaks. Selliste kivimite ja setete kaubastamine on samuti kaevandamine kõige sellest tulenevaga. Kui osutub vajalikuks tehnogeensete lasundite omadusi määrata, siis peaks see toimuma maavara uuringu meetodika kohaselt ja seda võib nimetada geoloogiliseks uuringuks.

B.



Pilt 2.16 Narva põlevkivielektrijaamade tuhaväljad.

A. Kosmosefoto internetist, millel nähtavad sinised laigud on mitmeid ruutkilomeetreid katvad tuhaväljad Kirde-Eestis, võimalik mineraaltoore sellele, kes seda vajaks. B. Korrastatud tuhaväli.

⁴⁶ Eesti maapõueseadus kasutab mõistete „sete, setted“ asemel mõistet „setend“. Geoloogilises kirjanduses ja ka selles õpikus on setend setete ja settekivimite koondnimetus.

Maavara ja maardlad on riigi ressurss. Sellest lähtuvalt on seadusandlikul tasandil paika pandud üldised nõuded, millele peab vastama riigi maavarade registris arvel olev maavara (Tabel 32). Samuti on normatiivdokumentides üldiseks teadmiseks kirjas Eesti maavarade peamised kasutusala (Tabel 33). Tööstur, taotledes maavara geoloogilise uuringu õigust ja koostades uuringu projekteerimise lähteülesannet, ei peaks juhendumata ainult üldistest nõuetest, mitte nendega piirduma. Lähtudes ainult üldistest nõuetest, annab tööstur märku oma nappidest varalistest võimalustest ja/või puudulikest mäendusalastest teadmistest. Uuringut plaaniva ja tegeva maavarageoloogi ülesanne on sellist tellijat juhendada, mitte ainult selleks, et hoida ära tulevast kahju, vaid ka selleks, et uuringuaruannet hindav maavarade komisjon tehtud tööd ei prakeeriks. Ja selgitada seda mäetöösturile nii, et kaoks arvamus, et nagu toimuks täpsem uuring ainult geoloogide suurema teenistuse huvides.

Mõningad piirväärtused maavarade kasutusala hindamiseks vt Tabel 34.

Tabel 32 Eesti maavarad vastavalt 2005. a maapõuaseadusele ja selle normatiivdokumentidele

Maavara	Kivimi või sette tüüp	Määravad omadused
Kivimid		
Dolokivi	Karbonaatkivim (=karbonaatne settekivim)	Dolomiidi sisaldus karbonaatsest osas > 50% MgO kivimis ≥14% Lahustumatu jääk kivimis < 25%
Lubjakivi		Kaltsiidi sisaldus karbonaatse osas > 50% MgO kivimis < 14% Lahustumatu jäägi sisaldus < 25%;
Fosforiit	Biokeemiline settekivim, liivkivim	P ₂ O ₅ keskmine sisaldus ≥ 6 %;
Kristalne* ehituskivi	Aluskorra tard- ja moondekivimid)	Survetugevus kuivalt ≥ 120 MPa**
Põlevkivi ehk kukersiit	Rohkem kui 10% süngeneetilist orgaanilist ainet sisaldav terrigeen-karbonaatse koostisega kivim, orgaaniline settekivim	Tootuskihi (põlevkivikihtide A...F ₁ koos nendevaheliste lubjakivikihtidega) kütvus ≥ 6,1 MJ/kg
Setted		
Järvelubi	Magevee karbonaatne sete	CaO sisaldus kuivaines ≥ 40%
Järvemuda	Klastilisest, karbonaatsest või orgaanilisest aineest koosnev magevee sete***	Orgaanilise aine sisaldus kuivaines ≥ 35%
Kruus	Mitmekomponendiline purdsete	Üle 5 mm läbimõõduga osakesi > 35%
Liiv		Üle 5 mm läbimõõduga osakesi < 35%
Meremuda	Mineraalmaterjalist koosnev meretekkeline sete	Orgaanilise aine sisaldus kuivaines > 5%
Savi	Valdavalt savimineraalidest koosnev sete	Plastsusarv**** ≥ 7
Turvas	Ebatäielikult lagununud taimejäänustest koosnev sete	Mineraalainete sisaldus kuivaines ≤ 35%

Normatiivdokumentides on kasutusel aegunud mõisted :

* kristalliline,

** ühikud 1200 kg/cm²,

*** esineb kõikjal mittesüsteemne mõiste „setend“,

**** plastsusarv, mis tegelikult on pinnase geotehniliste omaduste tunnus ei korreleeru savi keraamiliste omadustega.

Siin tabelis on piirtingimused (rajad) formaliseeritud just sellistena, nagu nad on sõnastatud normatiivdokumendis. Märgid asendavad normatiivakti sõnu:

- > üle...; rohkem kui...
- ≥ ... ja enam; on vähemalt...;
- < kuni...; ei ületa...; vähem kui...
- ≤ ei ületa...

Tabel 32 toodud rajad on võetud normatiivaktist, kuid on tinglikud. Kivimid ja setted on loodusobjektid, mille kvaliteeditunnuseid iseloomustab suur mõõtemääramatus. Nii näiteks ei tohiks dolo- ja lubjakivi eristamisel segadusse sattuda, kui laboratoorsel määrangul selgub et mineraal kaltsiidi või dolomiidi sisaldus karbonaatses osas on mõõtemääramatuse piires 50 %. Sama võib juhtuda kruusa ja liiva eristamisel, kui selgub et proovis on üle 5 millimeetrise läbimõõduga osakesi just 35 %. Kivimi ja sette tüüp on kujunenud keeruliste geoloogiliste protsesside tulemusel, mistõttu mõnelgi juhul ei ole kivim ühe-kahe tunnuse abil määratletav. Ja üldse kuulub kivimite ning setete klassifitseerimine geoloogia, mitte mäendusliku maavara uuringu valdkonda.

Tabel 33 Eesti maavarade võimalikud kasutusala vastavalt 2005. a maapõueseadusele ja selle normatiivdokumentidele

Kivim, sete	Erim	Kasutussuund	Võimalik kasutusala
Paekivi	Dolokivi Lubjakivi	Tehnoloogia*	Sõltuvalt koostisest mineraalsete sideainete tootmine, klaasitööstus, metallurgia, energeetika
		Ehitus	Sõltuvalt mehhaanilistest omadustest** viimistlus- ja ehituskivi ning täitematerjal
Savi	Raskeltsulav	Tehnoloogia	Sõltuvalt tarbimisest suur- ja väikekeraamikatööstus
	Kergeltsulav		Sõltuvalt tarbimisest ning omadustest tsemendi- ja keraamikatööstus
Turvas	Hästilagunenud	Kütusetööstus, tehnoloogia, meditsiin	Sõltuvalt tarbimisest ning lubatavast kaevandamise mahust kohalik ja hajaenergeetika, väetistetööstus, turbaravi
	Vähelagunenud	Taime- ja loomakasvatus	Sõltuvalt tarbimisest ja lubatavast kaevandamise mahust aiandus, absorbentid
Purdsete	Kruus	Ehitus	Sõltuvalt lisanditest, lõimisest ja mehhaanilistest omadustest betoonide ning mullete täide
	Liiv	Tehnoloogia	Sõltuvalt puhtusest ja lõimisest klaasitööstus, metallide valutööstus
		Ehitus	Sõltuvalt lisanditest, lõimisest ning mehhaanilistest omadustest betoonide, mörtide ja mullete täide
Muda	Järvemuda	Põllumajandus, meditsiin	Sõltuvalt tarbimisest väetis või ravimuda
	Meremuda	Meditsiin	Mudaravi
Lubisete	Järvelubi	Määratlemata	Tarbimise puudusel ei kaevandata
Sette-kivimid	Fosforiit	Tehnoloogia, põllumajandus	Tarbimise, keskkonnapiirangute ja ühiskonna vastuseisu tõttu ei kaevandata
	Põlevkivi	Energeetika	Kütus ja õli toore
Aluskorra kristalsed kivimid	Tard- ja moondekivimid tingnimeusega graniit	Ehitus	Viimistlus- ja ehituskivi ning täitematerjal, kõrge kaevandamiskulu tõttu ei kaevandata

* Mõisted 'tehnoloogia', 'tehniline' tähendab maavara kasutusala kontekstis tema hilisemat terminist või keemilist töötlemist

** Mehhaaniliste omaduste koondnimetusena kasutavad normatiivdokumendid isegi veel 2013. a ebamääraseid ja aegunud mõisteid "täitepinna", "madalamargiline", "kõrgemargiline" (vt Tabel 34) ⁴⁷.

⁴⁷ Killustiku kvaliteeditunnus "mark" pärineb nõukogude vene ehitusmaterjalide standarditest

Tabel 34 Maavarade põhitunnuste traditsioonilised piirväärtused, vastavalt võimalikule kasutusale

Maavara võimalik kasutusala	Kasuliku aine sisaldus % (kui ei ole teisiti)	Kasutu aine sisaldus %	Kahjuliku aine sisaldus, %	Mehhaanilised omadused
Ehituskruus	$\kappa_{>5} \geq 35$		$\kappa_{<0,05} \leq 20$	
Ehitusliiv		$\kappa_{>5} < 35$	$\kappa_{<0,05} \leq 10$	$Pm \geq 1,3$
Ehitus-täiteliv ja -kruus				Kui ei vasta ehitusmaterjalide-tööstuse nõuetele
Ehituspaekivi kõrgemargiline				$200 \leq \Gamma < 600$ külmakindlus ≥ 15 tsükli
madalamargiline				$\Gamma \geq 600$ külmakindlus ≥ 25 tsükli
Ehitus-täitepaekivi				$\Gamma < 200$
Energeetiline põlevkivi	$E \geq 34...35 \text{ GJ/m}^2$ kui $h > H/10$, siis $Q \geq 10,9 \text{ MJ/kg}$			
Tehniline dolokivi	$\text{MgO} \geq 18$	$\text{SiO}_2 + \text{R}_2\text{O}_3 \leq 5$		
Tehniline liiv	$\text{SiO}_2 \geq 95$		$\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,6$ $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 4,0$	
Tehniline lubjakivi	$\text{CaO} > 50$	$\text{SiO}_2 + \text{R}_2\text{O}_3 \leq 10$		
Turvas (hästilagunenud)	Raba- ja siirdesooturvas, lagunemisaste ≥ 25 ; madalsooturvas, lagunemisaste ≥ 15			
Turvas (vähelagunenud)		Raba- ja siirdesooturvas, lagunemisaste < 25 ; madalsooturvas, lagunemisaste < 15		

Siin kasutatud tähised peale üldtuntud keemiliste ühendite tähistest: E – põlevkivi energiatootlus, GJ/m^2 ; Γ - kivimi survetugevus, kg/cm^2 , geoloogias piisava täpsusega on uue ja vana tugevusühiku suhe $1 \text{ MPa} \approx 10 \text{ kg/cm}^2$; H – maavara lasumissügavus, m; h – maavaralasuandi paksus, m; κ_i – purdsette osakeste (terade) saagis, %, kus (i) tähistab klassi piiri (sõela ava läbimõõtu), mm; Pm - liiva peensusmoodul; Q – põlevkivi kütvus, MJ/kg ehk GJ/t ,

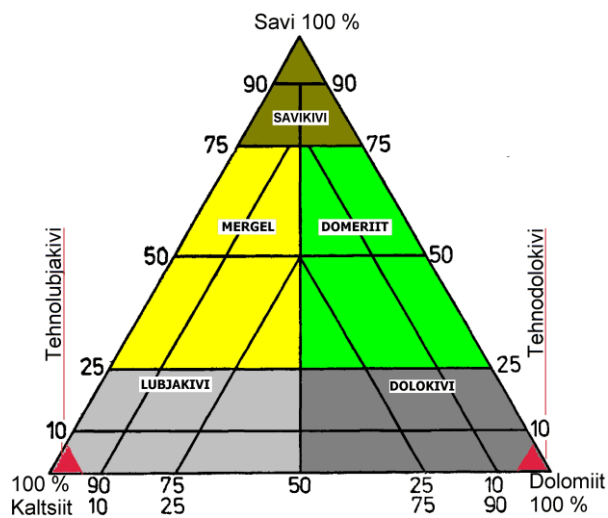
Lisaks võiks iga maavarageoloog teada mõningaid ehitajate ammuseid eriteadmisi, näiteks:

- betooniliivas peaks savi sisaldus ($\kappa_{<0,05}$) olema $< 3\%$ ⁴⁸
- vormiliiva kõige ebasoovitav lisand on kaltsiit, mistõttu CaO sisaldus peaks olema $\leq 2\%$ ⁴⁹.

⁴⁸ Grauen, A., 1940. Kuidas valmistada otstarbekohast betoonisegu, Tehnika Kõigile, Juuli., lk 200...201

⁴⁹ Reintalu, K., 1944. Valumuld, Tehnika Kuukiri nr 1 (5), lk 105...108

Näide karbonaat- ja savikivimite kogumite klassifitseerimisest on järgnev pilt, kus Herbert Viidingu koostatud diagramm⁵⁰ esitatakse kaasaegsamal kujul.



Pilt 2.17 Karbonaatkivimite kolmikdiagramm.

Kuna kolmikdiagramm illustreerib kivimeid, pidasime vajalikuks ja võimalikuks asendada ülaosas olnud sõna 'savi' mõistega 'savikivi', mis oleks vaste laensõnale argilliid. Eestis on savikivi ainuesindaja graptoliitargilliid.

Varem kandis dolokivi oma nimimineraali - dolomiidi nime.

Domeriit on vähese levikuga, kasutamist mitteleidnud kivim, mis esineb Narva põlevkivikarjääris katendi ja Permisküla ning Kuremäe uuringuväljadel põlevkivi lasumis, devoni lademetes. Ordoviitsiumi ajastu Haljala lademe merglit on võetud Aluverre murrust Virumaal ja kasutatud tsemendi toormeks Kundas.

2.3.2. Lihtsad võtted maavara uuringul

Maavarade uurimise ja kasutamise valdkonnas võivad osutada kasutamiseväärses veel mõned lihtsamad geoloogiliste objektide klassifitseerimise võtted. Näiteks sete, mis geoloogia mõistes on värskest kuhjunud kobe materjal, võiks olla eristatav käsipala tugevuse alusel.

Kui käsipala laguneb peos, siis on see sete, mitte kivim.

Kuna käel viis sõrme, siis võib seda reeglit meelde jätta mehhanistlikult ja lugeda setteks materjal, mille survetugevus on väiksem kui viis megapaskalit (5 MPa = 50 kg/cm²).

Geoloogid oskavad hinnata savi plastilisust (vt plastsusarv, Tabel 32) käte vahel ja ehitusgeoloogid eristavad saviliiva ja liivsavi selle järgi, kuidas materjal labidal käitub.

Kolme peamist purdsette liiki – kive ehk munakaid või veeriseid, kruusa, liiva ja savi, saue ehk tolmu saab kõige lihtsamal moel järgi eristada nii:

- kivi saab pihku võtta,
- kruusatera saab tõsta kahe sõrmega,
- liivateri mahub näpu vahele palju,
- tolm jääb käe külge.

Piisava kogemuse puhul võib silma järgi ja kätt abiks võttes eristada ka liivsavi ja saviliiva. Esimene on see, milles suurema osa moodustab sau ja vähema liiv. Teine – saviliiv on pinnas, milles enamus on liiv ja mahukas lisand on sau. Kui lisandit, ükskõik kumba, kas liiva või saue on alla veerandi, ehk vähem kui 25%, siis lisandi nimetusele lisatakse lõppu liide – '-kas': liivakas savi ja savikas liiv. Lisandit, mida on vähem kui 10% ei peeta nimetamisväärses.

Enamik Tabel 32 määravate tunnuste rajadest, eriti aga fosforiidi ja põlevkivi kvaliteeditunnuste piirväärtused on 20. sajandi teise poole tehnoloogia ja majanduse tasemel. Näiteks põlevkivi puhul 6,1 MJ/kg ehk 1450 kcal/kg on kuuekümnendatel aastatel Oudova (Leningradi) põlevkivimaardla jaoks välja arvatud bilansilise (aktiivse) varu piirtingimus. Selle teadmise valguses oleks hoopis asjalikum teadmiseks võtta, et

põlevkivi on kivim, mis õhkuivas olekus süttib tuletikust.

⁵⁰ Viiding, H. 1984. Eesti mineraalid ja kivimid, Tallinn, Valgus, 248 lk

2.3.3. Maardla kvaliteedi tagamine

Varu usaldusväarsus

Maavara varu jaotatakse usaldusväarsuse alusel **tarbevaruks** (kategoriatähisega T), **reservvaruks** (tähisega R) ja **prognoosvaruks** (tähisega P). Mida täpsem on uuring, seda usaldusväärsem on varu ⁵¹.

Maavara lasundid on erineva ehitusega. Väga lihtsad on meie süvamere tingimustes settinud Kambriumi ja Ordoviitsiumi ajastute kivimite – sinisavi (Pilt 2.18), ehituspaekivi (Pilt 2.19 ja põlevkivi (Pilt 2.20) lasundid. Väga lihtsate lasundite ja neid moodustavate kihtide paksus ning kvaliteeditunnused ei muutu kilomeetrite ulatuses. Sellise lasundi geoloogiliseks uurimiseks, eriti kui nõuded kaevisse kvaliteedile ei ole kõrged, ei lähe vaja kuigi tihedat uuringuvõrku.



Pilt 2.18 Väga lihtsa ehitusega sinisavi lasund Ülgase savikarjääris

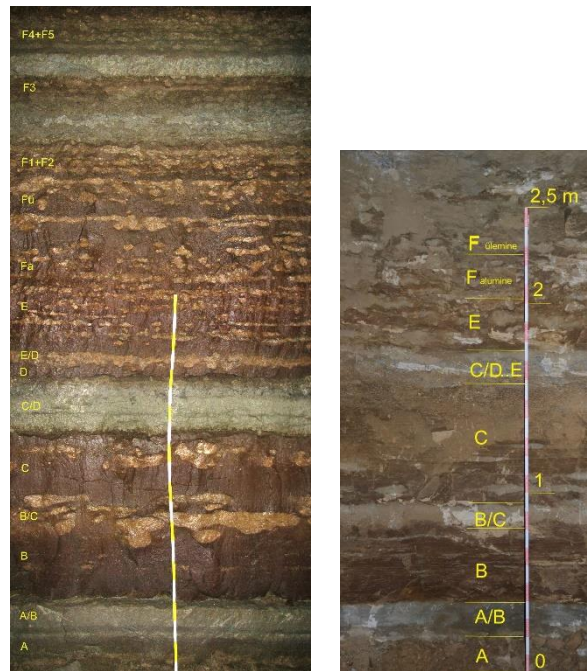
Sinisavi tehnilised omadused ei muutu Paldiskist Narvani.



Pilt 2.19 Väga lihtsa ehitusega ehituspaekivi lasundi alumine osa Tallinnas Laagna teel

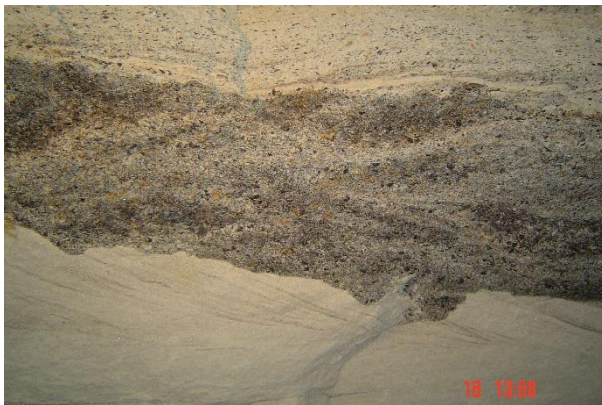
Klassikalise ehituspaekivi lasund koosneb Uhaku ja Lasnamäe ladest, mille lamamis on Aseri ja Kunda ladest. Paekihid on kilomeetrite ulatuses ühtlase paksusega ja tehniliste omadustega.

⁵¹ Eesti maapõueseadusandlus kasutab varu uurituse astme iseloomustamiseks otsetõlget vene keelest “detailsus”, mille eestikeelne vaste on „üksikasjalik“. Detailsus sobiks iseloomustama pigem uuringu põhjalikkust ja mitmekülgust, mitte usaldusväarsust.



Pilt 2.20 Põlevkivi kihind, vaatamata liitstruktuurile kuulub samuti lihtsate lasundite klassi
Vasakul – kihind Estonia, paremal – Ojamaa kaevanduses.

Üsna lihtsa ehitusega on suurte rabamassiivide turbamaardlad.



Fosforiidikiht (pilt kõrval), mis on tekkinud rannikumere rahututes tingimustes, ei ole nii püsiva ehitusega kui eelmiste näidete objektid. Siiski on fosforiidilasundi paksus leiukoha piires üsna püsiv ning kasulike ja kahjulike ainete sisaldus, samuti kihtide paigutus kihindis muutub vähe. Sellest hoolimata tuleb samaväärselt usaldatavuse tagamiseks teha fosforiidileiukohas mitu korda rohkem geoloogilist uurimistööd kui põlevkivimaardlas.

Pilt 2.21 Fosforiidikonglomeraadi kiht suletud Ülgase kaevanduse käigu seinas.

Keerukama ehitusega on troopilise Siluri ajastu mere tingimustes tekkinud Kesk-Eesti ja Saaremaa lubjakivimaardlad. Näiteks puhas tehniline lubjakivi võib lasuda üsna väikeste kompaksete korallmoodustistena.

Keeruka ehitusega on ka Devoni ajastul settinud liivakivi (Pilt 2.22). ning jääaegse tekkega liiva- ning kruusamaardlad (Pilt 2.23)



Pilt 2.22. Keeruka ehitusega lasund Piusa karjääris

Klaasitoormena kõne alla tuleva valge liiva kihid vahelduvad rauarikka kollase liiva kihtidega. Maardla ehitust häirib pildi keskel näha olev lasumishäire.



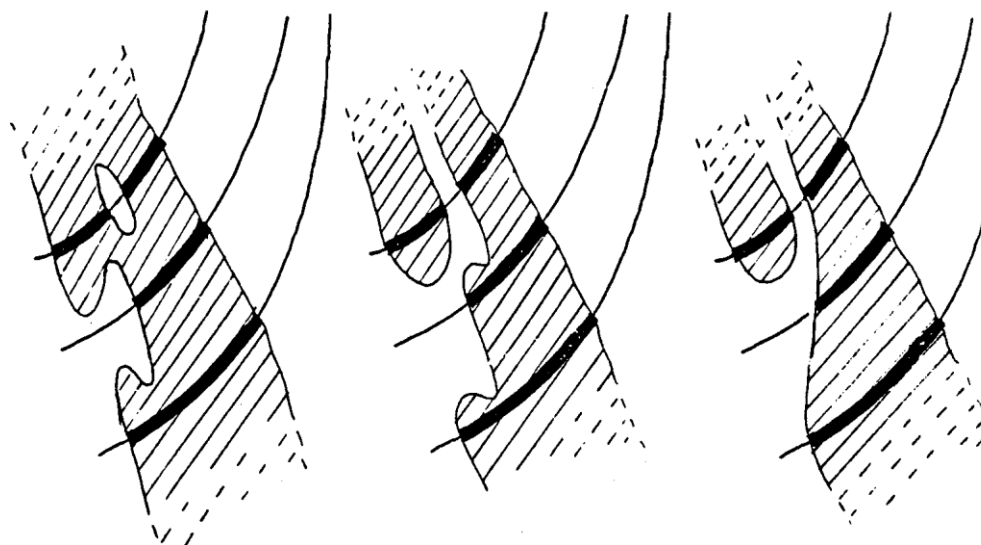
Pilt 2.23. Keeruka ehitusega kruusalasund.

Liiva-kruusa maardla teeb keerukaks erineva lõimiseiga kihtide vaheldumine.

Kui lavamaardlate lasundite ehitus on klassifitseeritav väga lihtsast kuni keerukani, siis aluskorramaardlad on valdavalt keeruka või väga keeruka ehitusega (Pilt 2.24, Pilt 2.25).



Pilt 2.24 Väga keeruka ehitusega on tard- ja moondekivimite kehad aluskorras.



Pilt 2.25. Soonmaardla kirjeldamise klassikaline probleem – milline on maagikeha tegelikult?

Vaadates seda pilti näeme, kuidas maagikeha lahti puurimisel saab geoloog teada, et kolm puurauku (peened jooned) läbisid maagisoone. Puurimisel leitud maak on pildil kujutatud jämeda joonega. Kui muud mitte midagi ei tea, siis puurteabe alusel võib ette kujutada vähemalt kolme erikujulist keha. Variandid, mida võib ette kujutada, on pildil viirutatud.

Arusaadavalt on **väga lihtsa** ehitusega maardla usaldusvääruse tagamiseks vaja vähem mõõtmiskohti ja proove kui **lihtsa** ehitusega maardlates. Niisamuti saab **keeruka** ehitusega maardlast samaväärse ettekujutuse palju vähema tööga kui **väga keeruka** ehitusega maardlast. Siiski ei saa maardla geoloogilist uuringut projekteerida ainult verbaalse klassifikatsiooni (väga lihtne – lihtne – keerukas – väga keerukas) alusel.

Märksa asjalikum on keerukust kirjeldada muutlikkuse kaudu. **Muutlikkus** on alati kahekomponendiline – **juhuslik** ja **süsteemiline** (vt 1.5 Trendi analüüs, lk 31, samuti varem viidatud õpikud Mäemajandus ja Infotöötlus mäenduses). Juhuslikku muutlikkust saab iseloomustada variatsioonikordajaga. Süsteemilise muutlikkust iseloomustab trendi gradient – tunnuse muutumise intensiivsus ja suund. Tunnuseks võivad olla lasundi paksus, kasuliku aine sisaldus ja mistahes muud uuringu tellijale vajalikud mõõtarvud.

Kõige lihtsama ehitusega, vähe muutuvate tunnustega on meil Kambriumi ja varajase Ordoviitsiumi ajastu kihid (Pilt 2.18 ... Pilt 2.20). Näiteks põlevkivikihi paksus muutub kilomeetrisel lõigul vaid 0,7...5 cm, mis tähendab, et tema muutlikkust väljendab suurus $0,0000007...0,000005 = (0,7...5) \times 10^{-6}$. Samas võib kruusalasundite puhul silmata lasundi paksuse kolmemeetrist vähenemist juba mõnekümne meetri peal, mida väljendaks muutlikkus $0,33 \approx 3 \times 10^{-1}$. Muutlikkuse nullide arv ehk arvu kümme astmenäitaja võiks olla abiks muutlikkuse hindamisel (vt järgmist tabelit).

Tabel 35 Lavamaardlate keerukuse lihtne klassifikatsioon peamiste tunnuste muutlikkuse alusel

Maardla tüüp	Tunnused on...	Paksuse muutlikkuse suurusjärk	Tunnuse variatsiooni-kordaja, %	Maavara
Väga lihtne	püsivad	< - 4	< 10	Põlevkivi, sinisavi
Lihtne	vähemuutlikud	- 3... - 4	10...30	Fosforiit, ehitusliiv
Keerukas	muutlikud	- 2... - 3	30...100	Tehniline liiv
Väga keerukas	väga muutlikud	- 1... - 2	> 100	Kruus, tehniline lubjakivi

Variatsioonikordaja rajad logaritmilises skaalas on 10^1 , $10^{1.5}$, 10^2 .

Mida keerukama ehitusega on uuritav lasund ja suurema muutlikkusega on tema tunnused, seda rohkem peab olema mõõtmiskohti ja proove, seda oskuslikumalt tuleb kavandada uuringu metoodika.

Kuid alati pole see nii. Fosforiidi ja liiva maardlad ning kruusa ja tehnilise lubjakivi maardlad kuuluvad ehitusele samasse keerukuse klassi. Kuid on selge, et kummagi paari (fosforiit – liiv, kruus – tehniline kivi) puhul pole tegu samaväärsete maavaradega. Fosforiidi ja tehnilise lubjakivi kvaliteeti hinnatakse mitme kasuliku ja kahjuliku aine, kruusa aga mõnikord ainult ühe, ehk saviosiste (tolmu) sisalduse alusel. Lähtuvalt kaevandamise ja töötlemise tingimustest tuleb tehnilise toorme kõigi komponentide sisaldus ja levik nii horisontaal- kui vertikaalsuunas määrata täpselt. Kruusa ja liiva puhul, isegi kui neid kasutatakse kõrge kvaliteediga ehitusmaterjalide tootmiseks, pole nii suurt täpsust vaja. Kasvõi seepärast, et liiva ja kruusa rikastamine on lihtsam ja odavam kui tehnilistel toormetel.

Seega sõltub maardla uuringu töömahukus mitte ainult maardla ehitusest ja tema kvaliteeditunnuste varieeruvusest vaid ka uuringutulemuste esitatavast täpsusest. Seepärast tulebki enne uuringu projekteerimist kokku leppida ja projekti lähteülesandes märkida kaks peamist asja – usaldusväärsuse tase ja peamiste tunnuste määramise täpsus ehk mõõtemääramatus. Arenenud mäetööstusriikides on need nõuded määratud normdokumentidega ⁵². Eesti 2005. a mäeseaduse normdokumentatsioon ei olnud selleni veel jõudnud ja pole veel (2013) märke, et selle poole püüeldaks. Siiski esitan nõudlikumate mäetöösturite jaoks arvvaartused, millest uuringu tellimisel juhinduda, alljärgnevas Tabel 36.

Tabel 36 Maavara kategooriate soovitatavad usaldusväärsuse tasemed, mõõtemääramatus ja lubatavad hälbed

Varu kategooria	Peamiste kvaliteedi- ja lasumistunnuste		Varu koguse suurim lubatav arvutuslik hälve plokis
	usaldatavus, %	mõõtemääramatus plokis, %	
Tarbevaru	> 85	< 10	500 t või m ³
Reservvaru	> 60	< 15	5 %
Prognoosvaru	> 50	< 20	10 %

Varu kaevandamisväärsus

Maavara varu jaotatakse kaevandamisväärsuse alusel:

- **aktiivseks** ehk tõestatud kaevandamisväärsuseks (tähisega A) ja
- **passiivseks** ehk tinglikult kaevandamisväärsuseks (tähisega P).

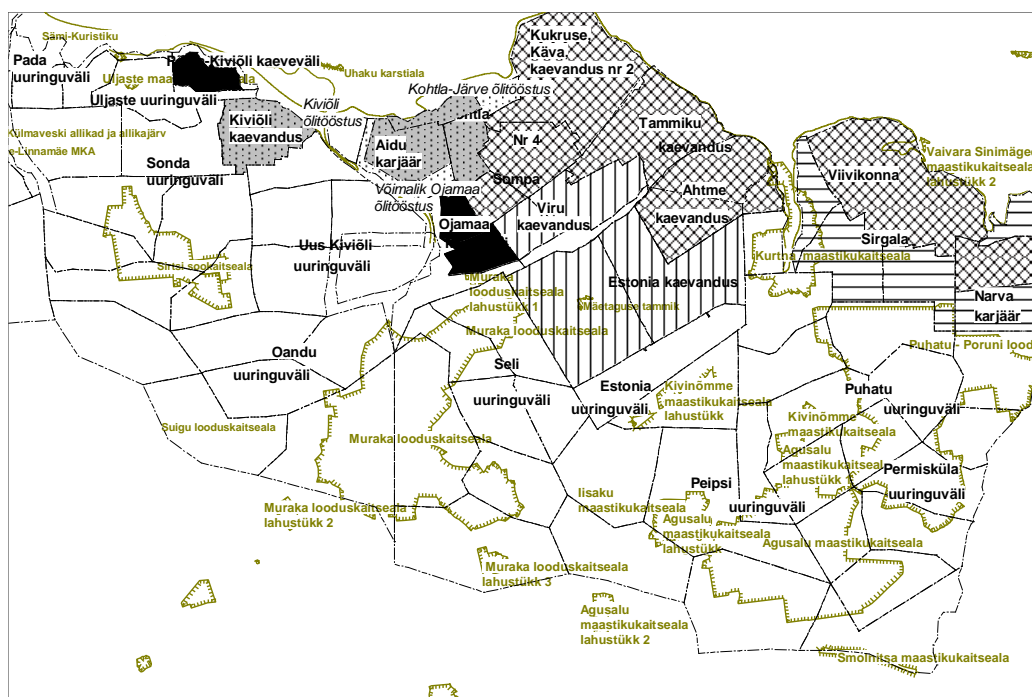
Varu on **majanduslikult aktiivne**, kui tema kaevandamisväärsus on tõestatud kaevandamisega või näidatud tasuvusuuringuga. Kui see nii ei ole, siis on varu majanduslikult passiivne, piltlikult öeldes – ootel. Praktikas on palju näiteid, et nii lihtne see ei ole. Põhjus on enamasti majanduse, tehnika ja tehnoloogia kiire arengus. Muutuv majandus esitab maavaradele uusi nõudeid ja tihti on need varasematest rangemad. Ka vastupidine on võimalik – uus tehnika on suuteline kasutama madalama kvaliteediga maapõuevara, ka sellist, mille varasemad majandushinnangud olid tunnistanud passiivseks. Seepärast ei saa varu aktiivsuse tingimused olla igavesed. Praktika näitab et 10...20 aastat vanad nõuded ei pruugi arenevas majanduses enam kehtida ja neid tuleb uuendada, muuta või neist loobuda. Nii mõnigi kord võib sellega kaasneda maavara kaevandamisväärsuse varu vähenemine riigi registris. Seepärast on uute nõuete põhjendamise ja aktsepteerimise üsna kallid ja töömahukas töö, eriti, kui tulemuseks on maavara kaevandatava varu ja ootuspärase ressursitasu vähenemine.

Varu on **keskkonnakaitseliselt passiivne**, kui selle kaevandamine ei ole lubatav keskkonnakaitseliste piirangute tõttu.

Praktikas on hulganisti näiteid selle nõude formaalsest rakendamisest. Otsuseid langetavad isikud, olles ühiskonna kaevandamisvastase hoiaku surve all, on tunnistanud passiivseks mistahes kaitseala või kaitstava objekti territooriumil paikneva maavara. Seda on tehtud ilma, et oleks süüvitatud objekti kaitsmise tingimustesse. Näiteks on tunnistanud passiivseks sadades miljonites tonnides majanduslikult aktiivset põlevkivivaru, mis lasub 50...70 m sügavuses maapõues kaitsealuste soode ja rabade all (Pilt 2.26). Kuigi oli teada, et seda põlevkivi saab väljata vaid allmaakaevandamisega, mille puhul saab tagada maapinna loodusliku oleku säilimine, kasutati formaalset reeglit – “varu asub kaitsealusel territooriumil”. Seda ei saa siiski käsitleda ühekülgse, ainult kaevandamise poolelt vaadatuna. Uuritud põlevkivi ei kao kaitsealade alt ära. Kui saab olema kaevandamistechnoloogia, mis tagab hoitava ala või objekti häirimatu säilimise, võib varu saada kaevandamisväärsuseks. Harvemini ja vähema tõenäosusega juhtub, et kaevandamist takistav objekt kaob, hävib või nii nagu maavara varu puhulgi – osutub olematuks, "fantomiks".

⁵² Reinsalu, E., 2011. Eesti mäendus, Tabel 1.5. Maavaravaru usaldusväärsuse kategooriate võrdlus

Kuid keskkonناسäästliku kaevandamise võimalikkust tuleb tõestada keskkonnamõju hindamise alusel. See on uuringu- ning kaevandamisõiguse taotleja asi.



Pilt 2.26 Kaev- ja uuringuväljade ning -plakkide paigutus Eesti põlevkivimaardlas ning nende kaetus kaitsealadega 2005. a.

Püstviirutus – kaevandusväljad, rõhtviirutus – karjääriväljad, ristviirutus – ammendatud või sulgemisjärgus olevad, täpilised väljad – uued projektid. Kaitsealade territooriumid on „karvased“.

Kaevandatavuse seisukohalt võib keskkonnakaitseliste piirangute tõttu passiivselt seisva maavara jaotada nelja kategooriasse⁵³ (Tabel 37). Tabeli sisu loomisel on lähtutud ühelt poolt kaevandamise keskkonnamõju iseloomust ja maardla mäendustingimustest ning teiselt poolt kaitseala tundlikkusest, haavatavusest. Tabelis toodu ei ole absoluutne, vaid sõltub täielikult sellest, kus, kuidas ja kui sügaval maavara lasub, millise kaevandamismooduse- või viisiga on seda võimalik kaevandada, millisele mõjutusele on tundlik kaitstav objekt või ala jne. Kaevandatavuse kategooria tuleb igal juhul määrata projektipõhiselt. Teisisõnu – keskkonnamõju hindamisel aluseks peab olema adekvaatne ja arusaadav selgitus, vähemalt eskiisprojekti näol, kuidas võiks kaevandada.

Tabel 37 Maardlate ja looduskaitsealade ning -objektide kattuvade kategooriad

Kategooria	Allmaakaevandamine	Avakaevandamine
I	Igasugune kaevandamine on keelatud, maavara varu kustutatakse riigi registrist	
II	Kaevandamine on võimalik kokkuleppel haldajaga või teiste pädevate isikutega, ja/või nende poolt seatud tingimustel; varu kaevandamisväärsuse kategooriat (aktiivne / passiivne) ei muudeta	Avakaevandamise on keelatud; varu on passiivne seni, kuni puudub sobiv allmaakaevandamise tehnoloogia ja selle tehnoloogia kasutamise majanduslik põhjendus
III	Kaevandamine on lubatud kooskõlastamisega, kui ei kahjustata kaitstavat ala või üksikobjekti	Kaevandamine on lubatud kokkuleppel haldajaga või teiste pädevate isikutega
IV	Kaevandamine on lubatud kooskõlastuseta, sest objekt ei oma enam kaitsealust väärtust	

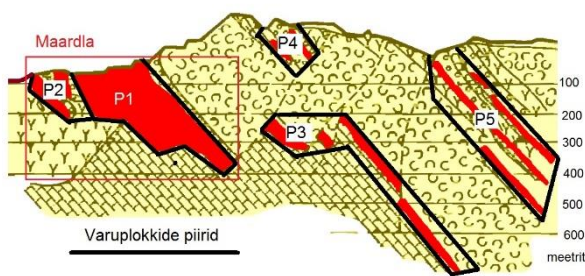
Kategooriad tabelis 37 ei samad, mis kaitsealade kategooriad.

⁵³ Erg, K., Reinsalu, E., Valgma, I. 2003. Põlevkivi kaevandamise võimalikkusest looduskaitsealadel, Keskkonnatehnika nr 3.

Kuna maavara geoloogiline uuring on kaevandamise eeltöö, siis keskkonnakaitseliselt passiivse varu geoloogiline uuring ei ole üldjuhul lubatav. Mõjuval põhjusel ja keskkonnohutul meetodil peaks see olema siiski teostatav, kuid kõik see peab olema tõestatud nii uuringu kui ka võimaliku kaevandamise keskkonnamõju hinnanguga. Ühe võimaliku lubava faktorina võib kõne alla tulla keskkonnaseisundi oluline paranemine kaevandamise tulemusel.

2.3.4. Plokkimine

Maardla alajaotus on plokk. Plokk on geograafiliste koordinaatidega määratud kolmemõõtmeline osa maapõuest, mille kaevandamisväärsust ja usaldatavust käsitletakse konstantsetena. Piltlikult - plokk on nagu kauba kast laos. Kõik, mis selles on, peaks olema ühesuguste omadustega. Igal plokil on tunnus, mis koosneb maardla nimest ja ploki indeksist, mis omakorda koosneb varu kategooriatähisest ja järjekorranumbrist. Kihtmaardlas võivad varuploki püsttahud olla vertikaalsed⁵⁴ ja ploki ülemiseks ning alumiseks piiriks võib olla geoloogiliselt eristatav pind.

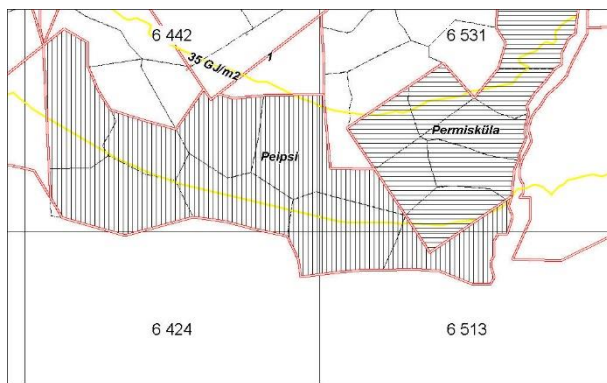


Pilt 2.27. Maavara plokkimise näide.

Plokid: P1 ja P2 – aktiivne tarbevaru, P3 – passiivne reservvaru, P4 – aktiivne reservvaru, P5 – passiivne tarbevaru

Nii ongi varu plokkimise aluseks:

- maavara kaevandamisväärsus – on aktiivse ja passiivse varu plokid
- maardla uurituse tase – on tarbe- ja reservvaru plokid
- plokid on erinevate kaevandamistehnoloogiatega kaevandatavad (veepealse ja veeluse tehnoloogiaga) või koosnevad eri kasutusala maavara (tehniline ja ehituslik mineraaltoore).



Pilt 2.28 Näide varuplokkide paiknemisest Eesti põlevkivimaardla lõunaosas.

Kõrval pildil on maagimaardla, mille varuplokid P1 ja P2 on piisavalt uuritud. Nad on maapinna lähedal, saab kasutada avakaevandamist. See varu on igati kaevandamisväärne ja kui ta asuks Eestis, siis nimetataks seda aktiivseks. Kaevandamisväärne maavara moodustab maardla. Plokk P5 on ka uuritud, kuid leitud, et ta koosneb õhukestest kihtidest ja paikneb geoloogiliste häirete ruumis. Seetõttu on see varu jäetud passiivseks. Plokk P4 on uuritud, on kergesti kaevandatav, kuid maavara ei vasta kvaliteedinõuetele ja jäetud reservi. Plokk P3 on piisavalt uuritud, seega vastab tarbevaru tasemele, kuid kuna ta lasub sügaval ebakvaliteetse varu ploki all, siis selle maavara väljamine oleks kallis ja on ta majanduslikult passiivne.

Kuigi plokk on maavara ruumiline ühik, käsitletakse suurtes lavamaardlates, kus ploki paksus on mitu suurusjärku väiksem kui rõhtmõõtmel, neid kui maa-alasid (Pilt 2.28). Plokkide kogumi ala on väli – uuringu-, kaeve-, kaevandus- või karjääriväli. Kõrval pildil on viirutatud „Peipsi“ ja „Permisküla“ põlevkivi uuringuväljad, mis on jaotatud väiksemateks ühikuteks – plokkidaks. Plokkide nurgapunktideks on valitud uuringupuuraugud, sest nii on saavutatud plokkide hea seotus geograafiliste koordinaatidega⁵⁵. Tegu on valdavalt passiivse varu plokkidega, sest nad paiknevad lõuna pool aktiivsuspiiri, 35 GJ/m² joont. Plokid, mis paiknevad lõuna pool alumist kollast joont (25 GJ/m²) ei kuulu varu hulka.

⁵⁴ Ploki tahud võivad, kuid ei pea olema ei vertikaalsed ega horisontaalsed. Rõhtsad tahud, ehk ploki lagi ja põhi on enamasti horisontaalsed seepärast, et lavamaardlates valdab rõhtkihisus. Paksudes puistemaardlates ei tarvitse see nii olla. Ploki seinad pannakse paika vertikaalselt enamasti seepärast, et ollakse harjunud õhukeste maardlatega. Kuid tihti nõuab elu vabanemist sellisest harjumuspärasest tavast. Kõige sagedamini tuleb kaldseintega plokkide kujundada sügavates savimaardlates, sest seda nõuab pervede püsivus. Püsivusnõudega tuleks arvestada ka kruusa- ja liivamaardlate plokkimisel.

⁵⁵ Puuraukude valimine ploki väljaku nurgapunktiks on endisaegne tava, mis tekkis mitte ainult geograafilise info salastamisest vaid ka algelisest mõõdistamistehnikast. Vaatamata lihtsusele, ei ole see soovitatav. Kuna ploki varu arvutamisel kasutatakse puuraukude andmeid, siis auk, mis on üheaegselt 2...4 ploki nurgapunktiks, annab andmeid neile kõigile. Juhul kui selle puuraugu andmestik on pole esinduslik, levib ebatäpsus kõigile naaberplokkidele.

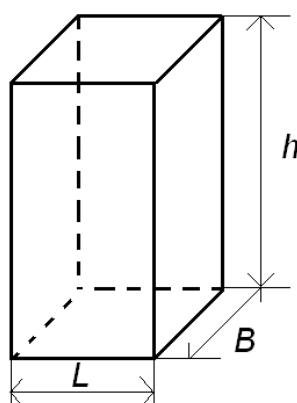
2.3.5. Varu arvutamine

Varu arvestatakse plokkide kaupa, mahus või massis, maapõues olevas koguses. Eesti tava kohaselt arvestatakse massis fosforiidi, põlevkivi ja turba varu. Ehitusmaavarade, mille hulka loetakse ka tehniline lubjakivi ja dolokivi, arvestust peetakse mahu alusel. Varu kogust väljendatakse tuhandetes tonnides (tuh t) või tuhandetes kuupmeetrites (tuh m³), millest tulenevalt varu mõõtemääramatus on vähemalt ±500 tonni või kuupmeetrit. Maailma mäenduse praktikas arvutatakse sageli varu kasuliku aine koguse järgi. Näiteks põlevkivi varu ekvivalendiks on enamikes maades temast saadava õli maht barrelites.

Lavamaardlate kvaliteedi oluline tunnus on

kihindi tootlus

mida mõõdetakse maavara või selle kasuliku komponenti kogusega pindalaühikul. Viljelevas tööstuses kasutatakse analoogilist mõistet, saagikus (viljakus) mida tavaliselt mõõdetakse ühelt hektarilt saadava teravilja saagiga või puidu kogusega.



Massi ühikutes mõõdetava maavara tootlus (ρ , t/m²) on ploki massi (M , t) ja pindala (S , m²) jagatis

$$\rho = M / S$$

ehk juhul kui plokk on risttahukakujuline

$$\rho = (h \times L \times B \times d) / (L \times B)$$

kus (pilt kõrval): h - lasundi paksus, m, L ja B - ristkülikukujulise pindalaga ploki (põhja) pikkus ja laius, m, d - maavara mahumass, t/m³.

Pilt 2.29. Risttahukakujulise maavaraploki skeem

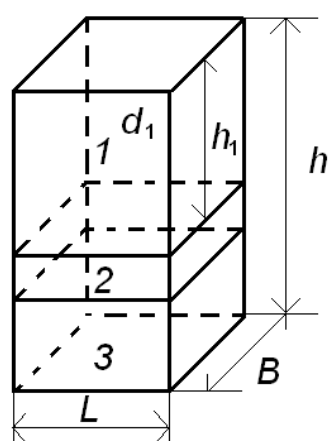
Kuna L ja B taanduvad, muutub tootluse valem lasundi paksuse ja mahumassi korrutiseks

$$\rho = h \times d, \text{ t/m}^2$$

Selle valemi abil arvutatakse näiteks turbamaardla tootlus. Kui peamine ei ole mitte maavara mass vaid kasuliku komponendi sisaldus, siis valem saab uue kuju:

$$\rho_j = (h_j \times k_j \times d_j) / (h_j \times d_j)$$

kus ρ_j on (j) kasuliku aine tootlus ja k_j on sama aine sisaldus ühes tonnisisalduses maavaras, ükskõik, kas t/t, GJ/t, Mcal/t jm. Kui kasuliku aine sisaldust mõõdetakse protsentides, tuleb mõõtari jagada sajaga, nii et 17% = 0,17 t/t⁵⁶



Pilt 2.30. Risttahukakujulise maavaraploki skeem, kui kihind moodustub kolmest kihist

Kui tegu on kihilise maardlaga ja meil on see enamasti nii, kusjuures ploki kuulub mitu kihti, siis arvutatakse kihindi tootlus kaalutud keskmisena

$$\rho_{ij} = \sum h_{ij} \times k_{ij} \times d_i / \sum h_{ij} \times d_{ij}, \text{ t/m}^2$$

kus (i) on kihindit moodustavate kihtide indeks (vt pilti kõrval, millel (i) = 1, 2, 3...).

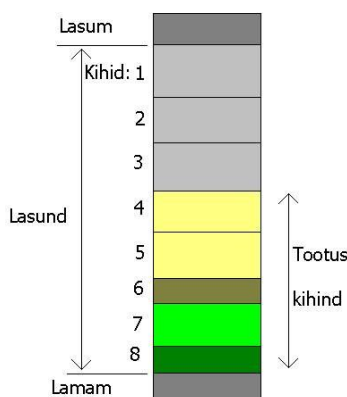
Juhul, kui eri kihtide mahumass ei erine, taandub d valemist välja. Nii on see enamiku meie maavarade puhul, kuid mitte põlevkivil, kus kihindi kivimite mahumassi erinevus on oluline. Ka fosforiidi tuleks arvestada liivakivi, detriidi ja konglomeraadi mahumassi erinevust, mida alati pole tehtud.

⁵⁶ Sama valemiga arvutatakse kasutu ja kahjuliku aine „tootlust“.

Põlevkivikihi komponentide – põlevkivikihtide ja pae vahekihtide mahumass on individuaalne ja sõltub orgaanilise aine (kerogeeni), ning savi- ja lubimineraalide suhtest kihis. Põlevkivi kihindit moodustavate kihtide mahumassi arvutamisel on kaks meetodit – täpne meetod, mis arvestab lubi- ja savimineraalide erinevat mahumassi eri kihtides. Selle töötas välja mäeinsener **Heino Sits**⁵⁷ Geoloogiateenistustes on kasutusel hilisem ja lihtsam meetod, mis arvestab ainult pae- ja põlevkivi mahumassi erinevust. Selle meetodi töötas välja geoloog **Vello Kattai**⁵⁸. Mõlema meetodiga saab tutvuda ja nende kasutamist harjutada juhendmaterjaliga varem viidatud raamatus [Infotöötlus Mäenduses](#). Meetodi erinevus annab varu koguse lahknevuse kuni 3 %, seda just kõrgema kvaliteediga plokkides. Kihindi kütvuse ja energiatootluse vahe võib olla kuni 11 %⁵⁹.

Maavara uuringu tavaline ülesanne kihilise lasundi hindamisel on määrata

tootus lasund, tootus kihind



Pilt 2.31. Kaheksast kihist koosnevast fosforiidilasundist on võetud tootsasse kihindisse viis (kihid 4...8)

Tootus on see osa lasundist, mis vastab uuringu ülesandes ette nähtud nõuetele ehk piirtingimustele (pilt vasakul). Kui lasund koosneb mitmest kihist, siis tootsasse kihindisse võetakse need kihid – see osa kihindist, mille kaalutud keskmised kvaliteeditunnused vastavad nõutavatele. Seejuures ei pea kihte võtma tootsasse ossa mitte geoloogiliste tunnuste ega eristatavate lahutuspiiride, vaid nõutavate kvaliteeditunnuste alusel. Selliste arvutuste jaoks saab eeltoodud valem lisaks uue liikme, väljamisteguri v_i . Kui $v_i = 0$, siis seda kihti ei pea väljama ja ta ei kuulu tootsasse kihindisse. Kui $v_i = 1$, siis kiht võetakse tootsasse kihindisse tervest. Kui väljamistegur on 0 ja 1 vahel ($0 < v_i < 1$), siis kiht on võetud tootsasse kihindisse osaliselt. Väljamisteguri sisaldav valem on:

$$p = \frac{\sum v_i \times h_i \times k_i \times d_i}{\sum v_i \times h_i \times d_i}, \text{ t/m}^2,$$

kus jagatav $\sum v_i \times h_i \times k_i \times d_i$ on kihindi tootsa osa tootlus, mis näitab, kui palju kasulikku, kasutat või kahjulikku komponenti on lasundi ühel ruutmeetril.

Oluline on seejuures silmas pidada, et kui uuringu lähteülesandes ei nähta ette lasundi kõrgselektiivset väljamist, näiteks kihiti koorimist avakaevandamisel, siis ei saa mitteväljatav ($v_i = 0$) või osaliselt väljatav ($0 < v_i < 1$) kiht paikneda väljatavate kihtide ($v_i = 1$) vahel.

⁵⁷ Sits, H., 1977. Kukersiitpõlevkivi kihindi kivimite kütvuse, näiva tiheduse ja paksuse muutumise seaduspärasustest // Põlevkivileiupaikade markšneideriasjanduse ja geoloogia küsimused (О закономерностях изменения мощности кажущейся плотности и теплоты сгорания пород пласта сланца кукурсита // Вопросы маркшейдерий и геологий сланцевых месторождений) Valgus. Tallinn, lk 52...57.

⁵⁸ Kattai V., 1991. Korrelatsioonimeetod - tee põlevkivi laboratoorse uuringute mahu vähendamisele // Raalide kasutamine Eesti maavarageoloogia ülesannete lahendamisel (Использование метода корреляций – путь к сокращению объемов лабораторных исследований // Применение ЭВМ при решении задач геологий полезных ископаемых Эстонии) Eesti TA Geoloogia Instituut, Tallinn, lk 81...93.

⁵⁹ Koitmeets, K., Reinsalu, E., Valgma, I., 2003, Precision of Oil Shale Energy Rating and Oil Shale Resources, Oil Shale, Vol. 20, No 1, pp 15...24.

Näide 11. Fosforiidi tootsa kihindi määramine.

Uuringupuurauk Toolse, 591

TOOTSA KIHINDI PIIRTINGIMUSED

Kasulik komponent P ₂ O ₅	>	6	%
Kahjulik komponent MgO	<	1	%
Kahjulik komponent Fe ₂ O ₃	<	2	%
Rauamoodul Fe ₂ O ₃ /P ₂ O ₃	<	0.19	
Vajalik paksus	>	0.5	

LÄHTEANDMED MÕÕDISTUSE ALUSEL

Kiht	Väljamis- tegur	Paksus, m		Komponentide sisaldus %			Kihitide tootlus komponentide kaupa		
		algne	väljatav	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃
1	1	1.3	1.3	0.78	0.10	3.03	1.01	0.13	3.94
2	1	1.2	1.2	1.20	0.04	1.68	1.44	0.05	2.02
3	1	0.3	0.3	3.46	0.07	1.40	1.04	0.02	0.42
4	1	1.2	1.2	3.44	0.04	0.74	4.13	0.05	0.89
5	1	1.5	1.5	3.89	0.26	1.02	5.84	0.39	1.53
6	1	0.3	0.3	11.98	0.20	1.25	3.59	0.06	0.38
7	1	0.5	0.5	5.32	0.06	0.86	2.66	0.03	0.43
8	1	0.9	0.9	6.01	1.96	2.03	5.41	1.76	1.83
Summa / Kaalutud keskmine		7.2	7.2	3.49	0.35	1.59	25.12	2.49	11.43
Peab olema		>0.5		>6	<1	<2			
						Rauamoodul	0.45		
						Piirtingimus	<0.5		

ARVUTUSTULEM - PIIRTINGIMUSTELE VASTAV TOOTUS KIHIND (toonitud)

Kiht	Väljamis- tegur	Paksus, m		Komponentide sisaldus %			Kihitide tootlus komponentide kaupa		
		algne	väljatav	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃
1	0	1.3	0	0.78	0.10	3.03	0.00	0.00	0.00
2	0	1.2	0	1.20	0.04	1.68	0.00	0.00	0.00
3	0	0.3	0	3.46	0.07	1.40	0.00	0.00	0.00
4	0	1.2	0	3.44	0.04	0.74	0.00	0.00	0.00
5	0	1.5	0	3.89	0.26	1.02	0.00	0.00	0.00
6	1	0.3	0.3	11.98	0.20	1.25	3.59	0.06	0.38
7	1	0.5	0.5	5.32	0.06	0.86	2.66	0.03	0.43
8	0.8	0.9	0.72	6.01	1.96	2.03	4.33	1.41	1.46
Summa / Kaalutud keskmine		7.2	1.52	6.96	0.99	1.49	10.58	1.50	2.27
Peab olema		>0.5		>6	<1	<2			
						Rauamoodul	0.21		
						Piirtingimus	<0.5		

Ülemises, lähtetabelis näeme, et terve fosforiidi kihind, mis puursüdamiku mõõdistuse alusel koosneb kaheksast kihist, ei vasta tootsa kihindi peamisele nõudele – kasuliku komponendi P₂O₅ kaalutud keskmine sisaldus pole piisav. Alumises, arvutustabelis on tulem, mis saadi, kui üksteise järel loobuti ülemistest kihitidest 1...5 ja nii jõuti kasuliku komponendi rahuldava tulemuseni. Kuid selle tulemusel alles jäänud kihitide 6...8 kaalutud keskmine MgO sisaldus ületas lubatava 1% piiri. Nähes, et peamine magneesiumi kandja on kiht 8, otsustati vähendada tema osalust tootsas kihis ja kaasata temast vaid 80% (väljamistegur 0,8). Nii saadi rahuldav tulemus (MgO = 0,99%). Sellist tulemust kaevandajad aktsepteerivad, sest nii tekkinud tootus osa kihindist on kompaktne, ei sisalda madala kvaliteediga vahekihte ja alumise kihi osaline väljamine on hõlpsalt teostatav – osa kihist jääb põhja maha

Maavara peamiste kvaliteedi- ja lasumistunnuste keskväärtuste arvutamise täpsus (mõõtemääramatus), selle usaldatavuse tase ning varu koguse suurim lubatav hälve peavad vastama Tabel 36 Maavara kategooriate soovitatavad usaldusväärsuse tasemed, mõõtemääramatus ja lubatavad hälbed) toodule.

2.4. Maavara uuringu projekteerimine

2.4.1. Mõisted

Ühese mõistmise huvides täpsustagem kõigepealt mõningate üldkasutatavate sõnade tähendust meie käsitluses.

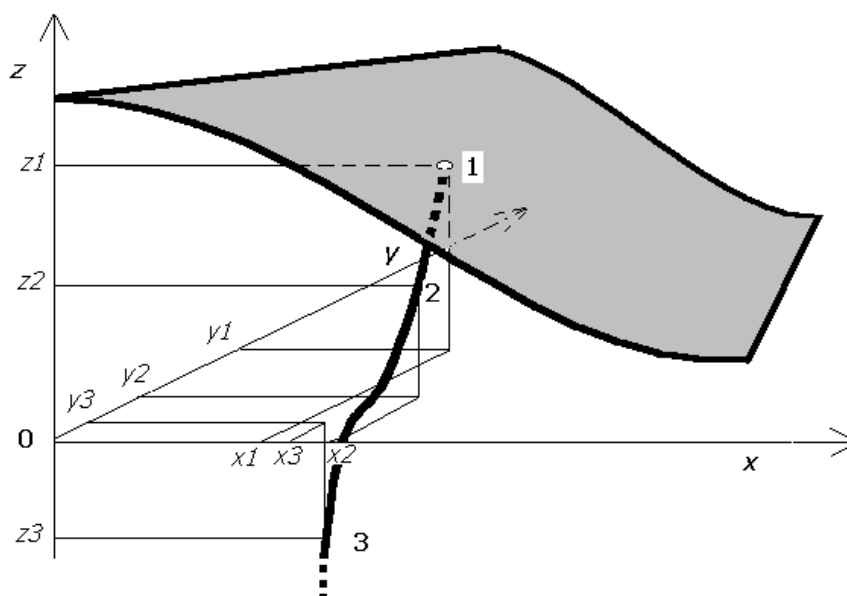
Mõõtmiskoht ⁶⁰

on geograafiline mõiste, koht, kus vaadeldakse, puuritakse, kaevatakse, mõõdetakse geoloogiliste objektide lasumissügavust, paksust, mehhaanilisi omadusi, veejuhtivust ja teisi tunnuseid ning võetakse mitmesuguseid proove, teisisõnu fikseeritakse vähemalt üks mõõtmistulemus. Tavaliselt adresseeritakse mõõtmiskoht kahemõõtmelises geograafilises koordinaadistikus.

Mõõtmispunkt ⁶¹

on maapõues (kolmemõõtmeliselt) või maapinnal (kahemõõtmeliselt) geograafiliste koordinaatide abil võimalikult täpselt adresseeritud koht, kus maapõue omadusi käsitletakse ühtsena.

Mõõtmispunkt võib olla paljand, kust maavara otsingul võetakse käsipala, puurauguga läbitud suhteliselt õhukene erim maapõues, lõik puursüdamikust, aga ka kaevand või paljand, kus uuringul kirjeldatakse objekti ja/või võetakse vähemalt üks proov.



Pilt 2.32 peaks näitama, et mõõtmiskoht (koordinaatidega x_3 , y_3 , z_3) ei pruugi maapõues paikneda puuraugu suudme (koordinaatidega x_1 , y_1 , z_1) all.

1 – puuraugu suue, 2 – (mõõtmispunkt) puuraugu keskkohas ja 3 – mõõtmispunkt kusagil sügavas. Vastavate indeksitega x , y ja z on mõõtmispunktide koordinaadid.

Ainult maapinna lähedal, lihtsa ehitusega maardlates võib eeldada, et puurauk on vertikaalne või et puuraugu kaldumisest ning kõverdumisest tingitud hälbed on muude ebatäpsustega võrreldes tühised. Sügavate puuraukude puhul see ei pea paika. Eri tugevusega kaldkihte läbides võib puurauk minna vägagi kõveraks. Mõõtmispunktide koordinaadid kõveras puuraugus ei ole kirjeldatavad augu suudme (mõõtmiskoha) koordinaatidega ega kaugusega maapinnast piki puuraugu telge. Suurte ja sügavate maagikehade ning gaasi ja õlimaardlate uuringul, samuti ka maardla avamisel, puuritakse ühest kohast kimp mitmes suunas kaldu ja kõveraid auke (Pilt 2.1 Sügavale ulatuva maardla uuringupuuraukude võimalik paigutus). Mäetöödega avatud sügavate maavaralasadite puhul puuritakse uuringuauke allmaa-kaeveõõntest mistahes suunas (Pilt 2.12 Geoloogiline uuringu käigud ja puuraugud süvakaevanduses). Ka neil juhtudel ei kirjelda mõõtmispunkti koordinaadid mõõtmiskoha.

⁶⁰ 'koht' on üsna ebakonkreetselt adresseeritud geograafiline määratlus (maakoht, leiukoht...)

⁶¹ 'punkt' kui mõiste pretendeerib täpsemale geograafilisele määratlusele, kuid asja üle järele mõeldes selgub, et geoloogias ei ole ka punkti määratlus absoluutselt täpne – mõnel juhul on tegu mingi lõigu või mahuga (vt Tabel 38 Soovituslik proovi pikkus puursüdamikust, sisuliselt mõõtmispunktiks taandatav lõik).

Proov

on esinduslik kogus uuritavat (proovitavat) materjali – kivimit, setet, orgaanilist ainet, vedelikku, gaasi jms, mis on võetud vastavate vahendite või seadmete abil maavara uurimiseks ja mis uuringu metoodika või tingimustega ette nähtud täpsusega iseloomustab proovitava materjali omadusi.

Proov võib olla käsipala, kogus kaevist (all pildil) lõik puursüdamikust (Pilt 2.35), portsion vedelikku või gaasi jne.



Pilt 2.33 Vasakul sõelumist ootav kruusa proov, paremal - kivistisega käsipala

Proovimiskoht

on mõõtmiskoht, kust võeti proov; see võib olla puurauk, kaevand (šurf, kraav) või paljand kõrvaloleval fotol.



Pilt 2.34 Proovimiskoht – Porkuni lademe stratotüüp

Proovimispunkt



on võimalikult täpselt adresseeritud mõõtmispunkt, kust võeti proov - osa puursüdamikust, osa nn vaguproovist, osa paljandist, kraavist jne.

Pilt 2.35 Proovimispunkt on südamikul märgitud sügavusega meetrites.

2.4.2. Geoloogilise teabe adresseerimine

Maavara uuringul saame uut teavet maapõue kohta. Selleks, et seda kasutada, peab olema täpselt teada, millist kohta või punkti maapõues teave iseloomustab. Maavara puhul on täpsus eriti oluline, sest tegu on varaga, millel on omanik ja mida kasutatakse ärihuvides. Mistahes vara kasutamisel võivad tekkida huvikonfliktid eri ressursside – maa, metsa ja teiste maavarade omanike ning valdajate vahel.

Traditsioonilised adresseerimismeetodid

on näiteks maardla **verbaalne** kohta- ja liigimäärang.

Kohamäärang tähendab, et igal maardlal on nimi, mis sisaldab ka tema nimimaavara nimetust, näiteks:

- Väo lubjakivimaardla
- Kurevere dolokivimaardla
- Eesti põlevkivimaardla
- Pannjärve liivamaardla

Maardla adresseerimisel on oluline ka maardla asukoht: maakond, vald. Sellist meetodit kasutab maavarade register, kus iga maardla kohta (suurematel maardlatel ka maardla osa kohta) on olemas registrikaart. Registrikaart sisaldab maardla kindlaks määratud mõõtkavas asukohaskeemi.

Geoloogilise teabe adresseerimist toetavad teised katastrid. Maardla kaardil aitavad orienteerida maakatastriüksuste tunnused ja piirid, metsakvartalite numbrid jms.

Täpse adresseerimise tagavad mõõtmis- ja/või proovimiskoha **geograafilised koordinaadid**.

Registrikaardis on traditsiooniliselt maardla tingliku keskpunkti koordinaadid, mis annavad umbkaudse ettekujutuse maardla paiknemisest ⁶². Palju olulisemat teavet kannavad uuringuala, uuringuruumi teenindusmaa, maardla, mäeeraldise, ploki jne nurgapunktide koordinaadid.

Suhteliselt täpseks võime pidada puuraukude ja vaatluskaevude suudmete geograafilisi koordinaate.

Geograafilised koordinaatsüsteemid

Geograafilise koha adresseerimiseks kasutatakse polaar- ja ristkoordinaatide süsteemi. Maardla keskpunkt registrikaardis on tavaliselt polaarkoordinaatides.

Kaasaegne adresseerimine eeldab, et kogu teave on esitatud Eesti koordinaatsüsteemis. Kasutada tuleb Eesti põhikaardisüsteemi L-EST 97, milleks on *Lamberti* konformsele koonilisele projektsioonile tuginev võrgustik. Leiab kasutamist ka Eesti baaskaardi koordinaatsüsteem TM-B, *Mercatori* põiksilindrilisele projektsioonile tuginev võrgustik. Kuna baaskaardi koordinaatsüsteem, sõltuvalt kohast, võib L-EST'ist oluliselt lahkneva (kuni 70 m), peab alati teadma ja märkima, kumma süsteemiga on tegu.

Varasemal ajal oli kaartide ning plaanide koostamisel ja uuringuteabe adresseerimisel kasutusel väga mitmeid koordinaatsüsteeme. Eelmise majanduskorra ajal oli üldiselt kasutusel nn Pulkovo 1942. a (Gauss-Krüger) süsteem kuid tuli ette, et kasutati ka salastatud lähteandmetega 1963. a süsteemi ⁶³. Linnades, aga ka suurtel kaevandustel olid oma kohalikud geodeetilised süsteemid. Enne teist maailmasõda olid Eestis kasutusel (*Gauss*)-*Lamberti* süsteemi variandid ⁶⁴.

Eri koordinaatsüsteemis adresseeritud teabe sidumine projektiga nõuab rohkem teadmisi, kui siinkohal suudame anda. Seda enam, et meie kogemus näitab, et varasemal ajal talletatud teabe, näiteks Sillamäe uraanikaevanduse mäetööde plaani puhul ei olnud välistatud ka koordinaatide taotluslik moonutamine.

2.4.3. Teabe kodeerimine

Andmestiku töötlemise ja esitamise huvides ning käigus, samasisulise teabe rühmitamiseks, mõnikord esitamise lihtsustamiseks, mõnikord ka maskeerimiseks, markeeritakse, indekseeritakse teavet.

⁶² Seda mõneti aegunud adresseerimismoodust asendab kaasajal Maa-ameti kaardiserverimaardlate rakendus.

⁶³ Kuna varasemal ajal moonutati kaarte militaarse desinformatsiooni eesmärgil (näiteks Peipsi ja Võrtsjärve ning Soome lahe vahekaugused ja kaldajoon olid valed) siis nende põhjal joonistatud suured geoloogilised kaardid ei vasta kaasaja nõuetele.

⁶⁴ Oli kasutusel Ubja kaevanduses kuni selle sulgemiseni.

Kivimite ja setete erimeid jaotatakse geoloogilise ajaskaala alusel ladekondadeks ja ladestuteks. Eestis paljandub, kui mitte arvestada migreerunud kivimite ja setete päritolu, neli ladestut, mille kivimeid ka vastavalt markeeritakse:

Q	– Kvaternaar
D	– Devon
O	– Ordoviitsium
C, Cm või E	– Kambrium

Ladestud jaotuvad ladestikeks, ladejärgudeks ja lademeteks, kihistuks, kihistikuks, kihiks, millest igaühel on oma nimi, marker ja indeks. Näiteks: S_{1jgV}+S_{1jnK} on Jaani ja Jaagarahu lademe piirikihtide biohermne kompleks Siluri ladestus Metskülas Saaremaal⁶⁵.

Kukersiitpõlevkivi kihid on markeeritud tähtedega A...H, nende alakihid indekseerituna (F₁ ja F₂) ja vahekihid naaberkihtide markeritega A/B...D/E. Analoogiliselt on markeeritud savikivi kihte. Kuid Oudova (Leningradi) maardlas tähistatakse kukersiitpõlevkivikihte hoopis rooma numbritega ülalt alla. Nii on Narva jõe taga E+F kiht I ja A+A' on IV-kiht⁶⁶.

Nii markeeritud erimid ja eriti just nende piirpinnad võivad olla varuplokkide laeks ja põrandaks.

Teabe kohaldamine ristkoordinaadistikku

Iga mõõtmis- ja proovimiskoht peab olema geograafiliselt adresseeritud. Seega peaks iga proov olema leitav kolme ristkoordinaadi x, y ja z abil. Et praktikas, eriti lavamaardlate uuringul tihti nii ei toimita, siis tuleb arvestada veega, mida illustreeris Pilt 2.32. Kuid z-koordinaadi määramisel on veel teinegi omapära. Proovil on alati mingi maht, sest ta võetakse ruumist, mitte punktist. Matemaatiliselt väljendades on proovil kolm mõõdet: Δx , Δy , Δz . Enamasti, eriti kihtmaardlate puhul on koordinaatide hälbed $\Delta x/x$, $\Delta y/y$ tühiselt väikesed. Kuid $\Delta z/z$ suhtes seda öelda ei saa.

Prooviks võetakse geoloogilise objekti erim, mille tundmine on maavara uuriva geoloogi kutseoskuste ja -teadmiste asi. Seepärast tavaliselt tähistatakse proov erimi lahutuspinna koordinaatidega: z_i ja z_{i+1}, kus (i) on geoloogilise erimi lahutuspinna indeks. Kui indeks kasvab puuraugu suudmest augu põhja suunas, siis mõõtmispunkti kolmas koordinaat

$$z = (z_i + z_{i+1}) / 2.$$

Eesti meetodikatest leiab Δz -küsimusele soovitusi fosforiidi uuringu juhendis⁶⁷, kus Δz vähimaks väärtuseks soovitatakse 0,1 m ja suurimaks 2 m. Karbonaatkivimitel lubatakse proovi pikkuseks kuni 4 m (järgnevas tabelis).

Tabel 38 Soovituslik proovi pikkus puursüdamikust, sisuliselt mõõtmispunktiks taandatav lõik

Maavara	Prooviks võetava südamiku pikkus
Fosforiit	0,1...2 m
Graniit	< 4 m
Karbonaatkivim	2 m kuni pool karjääri kõrgust
Liiv ja kruus	2 m
Põlevkivi	Proovitava kihi ja vahekihi paksus, välja arvatud, kui need on < 5 cm
Savi	< 4 m
Turvas	1 m, mass $\geq 0,5$ kg

Mõningad adresseerimise lihtsustused lavamaardlates

Kihtmaardlate uuringu tavaarvutustes jäetakse z tihti ilmutamata. Kui tegemist on ainult ühest erimist koosneva homogeense lasundiga, siis tavaliselt antakse ainult kihi põhja kõrgus merepinnast ja kihi paksus h. Mitmest kihist koosneva lasundi ehk kihindi puhul, mis on valdav Eesti maardlates, antakse tavaliselt kihindi põhja z-koordinaat ja kihtide eralduspindade kõrgus kihindi põhjast.

⁶⁵ Perens, H. Paekivi Eesti ehituses I, EGK, Tallinn, 2003, lk 84.

⁶⁶ Praktikas kohtab kahesugust põlevkivi vahekihtide markeerimist. Tavaline on lasumis- ja/või tähestikupõhine (A/B, B/C jne), kuid kohtab ka nn „puurimispõhist“ järjestust (F/E, E/D...B/A). Oudova maardla põlevkivikihid on markeeritud puurimispõhiselt – selles järjekorras, kuidas nad leiti.

⁶⁷ Keskkonnaministri 26. mai 2005. a määrus nr 44 “Üldgeoloogilise uurimistö ja maavara geoloogilise uuringu tegemise kord”.

2.4.4. Projekteerimise lähteülesanne

Projekteerimise hea tava kohaselt koostab lähteülesande asjast kõige rohkem huvitatud isik, s.t uuringuloa omaja. Tegelikult võiks lähteülesanne olla valmis juba enne uuringuloa taotlemist, sest siis oleks uuringu taotlejal ja ka lubajal kavandatavast parem ettekujutus.

Projekti lähteülesandes peaks olema määratud ⁶⁸:

- vajalik varu kogus kaevandamisväärsuse ja usaldusväärsuse kategooriate kaupa,
- uuritava maavara ja kaasnevate kivimite kvaliteedi- ning lasumistunnuste nimistu – tunnused, mida uuringul tuleb mõõta,
- varu kaevandamisväärsuse piirtingimused (*cut-off-grades, кондууу*) – arväärtused ja nende mõõtemääramatus,
- varu usaldusväärsuse kriteeriumid, arväärtused; seejuures maavara peamiste kvaliteedi- ja lasumistunnuste mõõtemääramatus ning usaldatavus ei tohiks olla väiksemad neist, mis toodud Tabel 36 Maavara kategooriate soovitatavad usaldusväärsuse tasemed, mõõtemääramatus ja lubatavad hälbed,
- muu projekti koostamiseks vajalik lähteandmestik või viited, sh proovimise ja laboratoorsete tööde meetodika, kasutatavad standardid, sise- ja väliskontrolli kord jms.

Projekti lähteülesandest sõltumata tuleb iga maavara puhul ette näha maavara kvaliteedi ja lasumistingimuste traditsiooniliste põhitunnuste mõõtmine (Tabel 34).

2.4.5. Projekti koostamine

Maavara uuringu projekt, vastavalt projekteerimise heale tavale, koosneb seletuskirjast ja lisadest. Viimased jaotuvad kaheks – graafilised lisad ehk joonised ning tekstilised ehk dokumendid.

Projekt on dokument ja selle iga osa, leht ning lehekülg peab olema identifitseeritav.

See tähendab, et projekti kõik osad ja joonised peavad kandma kirjet, millise maardla või maardla osa uuringu jaoks projekt on koostatud, kellel on uuringu luba ning kes ja millal tegi projekti. Graafilistel lisadel - mõõtkavas koostatud kaartidel, plaanidel, lõigetel ja joonistel paigutatakse need andmed kirjanurka.

Projekti seletuskiri

on dokument, milles piisava üksikasjalikkusega seletatakse lahti kõik käsitletava maardla uuringutegevused. Igal juhul peavad seal olema järgmised, nn **projekti olulised osad**:

- tiitelleht, millel on maardla ja/või selle osa nimetus, uuringuloa omaja, uuringu teostaja ja uuringu projekti koostaja andmed – nende registri number, vastutava spetsialisti nimi ja allkiri ning projekti koostamise aeg (kuu, aasta),
- sisukord teksti osade ja lisade täieliku numeratsiooniga,
- uuringuala (uuringuruumi teenindusmaa) suuruse põhjendus,
- mõõtmis- ja proovimiskohtade arvu (tiheduse) põhjendus,
- uurimismeetodite st proovimise, laboratoorsete tööde jms, samuti kasutatavate normatiivdokumentide, standardite, meetodikate jms valiku põhjendus,
- keskkonna- ja loodushoiumeetmete kirjeldus,
- uuringuga rikitud maa korrastamise ja puuraukude ning kaevandite sulgemise kirjeldus ja joonised (tüüpskeemid).

Projekti graafiline osa

on kaardid, plaanid ja tehnilised joonised:

- uuringuala asukoha kaart,
- uuringuala plaan mõõtmis- ja proovimiskohta paigutusega, millel on näidatud kasutatavad ja rajatavad ligipääsuteed ning tegevuse keskkonnamõju ala,
- lõiked maapõue uuritavast osast (uuringuruumist),
- puuraukude ja kaevandite sulgemise joonised, skeemid või tüüpprojektid.

⁶⁸ Tingliku kõneviisi kasutamine tuleneb sellest, et selle teksti kirjutamise ajal (2013) ei olnud Eesti maapõuekasutamise kord jõudnud arenenud mäetööstusriikide tasemele.

Kaardid ja plaanid koostatakse joonistena, mille põhiformaadiks on püstne A4, mida vajadusel suurendatakse täisarv korda laiuse või/ja pikkuse suunas.

Mitte iga graafiline materjal ei ole joonis – joonis on dokument ja selle tunnus on kirjanurk

Fotod, joonistused (skitsid, abrissid), graafikud, skeemid, diagrammid jne, mis ei ole mõõtkavas, on pildid, illustratsioonid ⁶⁹. Pildid, mida ei ole otstarbekas paigutada teksti, võivad olla esitatud graafiliste lisade seas.

Projekti tekstilised

on:

- lähteülesanne,
- uuringuloa ära kiri,
- uuringualal paiknevate kinnisasja omanike tingimused nende maale projekteeritavate puuraukude, kaevandite ja ajutiste ehitiste asukohtade suhtes.

Siin olid loetletud projekti olulised osad. Peale nende lisatakse teisi dokumente, mida asjaosalised, eriti uuringu taotleja ja lubaja peavad vajalikuks eesmärgi saavutamisel.

2.5. Uuringuvõrgu arvutamine

2.5.1. Mõõtmis- ja proovimiskohad

projekteeritakse varem tehtud geoloogiliste tööde käigus saadud teabe alusel.

Varasemad tööd võivad olla selles piirkonnas tehtud üldgeoloogilised tööd, maavara otsing, mõnikord ka sama maavara endine uuring. Peamine, mis varasemate tööde alusel tuleb teada saada, on uuritavate tunnuste varieeruvus. On ju selge, et mõõtmis- ja proovimiskohti peab olema seda rohkem:

- mida suurem on määratava tunnuse varieeruvus,
- mida kõrgem peab olema tulemuste usaldatavus ja
- mida väiksem on nõutav mõõtemääramatus või hälve, üldkeeles ka mõõtmisviga.

Kui tunnuste varieeruvust on võimalik hinnata eelnenud tööde alusel, siis uuringu usaldatavuse ja mõõtemääramatuse peaks uuringu tellija ette andma.

Eesti lavamaardlates on peamiste tunnuste varieeruvustase enamvähem teada. Ka usaldatavuse ja mõõtemääramatuse tase on aegade jooksul välja kujunenud. Seepärast võivadki vähenõudlikku, väheteadlikku või riskijuhmi tellijat rahuldada kogemuse alusel kujundatud soovitud maapõueseaduse normdokumentidest (Tabel 39). Sisuliselt tagavad need riiklikku maavarade registrit rahuldava usaldusväärsuse alamtaseme.

Tabel 39 Kogemuslikud puurimisvõrgu sammud (vahekaugused, võrk), m

Maavara	Tarbevaru	Reservvaru
Fosforiit	200...800	
Graniit	200...600	400...1200
Järvemuda, järvelubi, meremuda	50 × 100... 100 × 200	100 × 200...200 × 400
Liiv, kruus	≤ 200 (vahekaugus)	≤ 400
Paas	50...400	100...800
Põlevkivi	2 × 1 km	4 × 2
Savi (Devon, Kvaternaar)	50...100	100...200
Savi (Kambrium)	200...300	400...600
Turvas	100 × 100 või 200 × 200	400 × 400 või 800 × 800

Nagu näha, varieeruvad soovituslikud sammud kuni 8 korda. Kõik nad on pärinevad ajast, mil uuringunormatiive koostasid NSVL keskvalitsuse ministriumite instituudid, kelle arvutused lähtusid klassikalistest geostatistika põhimõtetest ja meetodikast, mida esitatakse selles õpikus.

Puurimisvõrgu samm ja sellega pöördvõrdeline puurimistihedus määrab minimaalse puuraukude arvu uuringuala või maardla pindalaühikul. Kuid tuleb arvestada, et usaldusväärne on vaid see puurauk, millest saadakse esinduslik südamik. Esinduslikkust hinnatakse südamiku saagisega. Ka selleks on

⁶⁹ See on ka põhjus, miks selles õpikus illustratsiooni ei nimetata joonisteks

Eestis välja kujunenud ja maapõueseaduse normatiivdokumentidesse sisse kirjutatud kogemuslikud normid (järgnev tabel).

Tabel 40 Nõutav südamiküsa saagis

Maavara	Saagis, %	Täpsustus
Fosforiit	80	Kihist ja proovist
Graniit (= "kristalliline" kivim)	90	
Paas	80	Kihi paksusest
Paas viimistluskiviks	80	Iga tõste kohta
Põlevkivi	80	Puhtast, ilma suletisteta kihist
	90	Suletistega põlevkivikihist
Savi	80	Intervallil

Tabelis toodu peaks juhtima mõtte korduspuurimise vajadusele ja seda projektis ette nägema.

2.5.2. Mõõtmis- ja proovimispunktide arvutamise meetodika

Punktide arv plokis ja/või maardlas sõltub sellest, kui suur on projekteerimisülesandes ette antud:

- mõõdetava tunnuse hajumist iseloomustav standardhälve (s_p), mis saadakse maavara otsingu, varasema uuringu või analoogia alusel,
- tunnuse aritmeetilise keskmise lubatav hälve plokis (edasises – mõõtemääramatus) (Δp), või suhteline mõõtemääramatus (ρ), tavakeeles ka lubatav suhteline viga,
- mõõtemääramatuse ületamise tõenäosus, teisisõnu – aritmeetilise keskmise mõõtemääramatuse usaldustase (P),
- kas tunnuse keskväärtus peab olema antud rajades (nn kahepoolne usaldusrajad) või, nagu enamasti, tunnuse keskväärtus ei tohi olla väiksem või suurem ette antust (nn ühepoolne usaldusrajad).

Vajalik punktide arv määratakse valemiga

$$n = (t s_p / p \rho)^2$$

kus: t – Studenti kordaja, vastavalt usaldustasemele P , s_p – standardhälve, p – mõõdetava tunnuse keskväärtus, ρ – ette antud suhteline viga $\Delta p / p$.

Mõõdetava tunnuse hajuvus võib olla eelnevalt teada ka näiteks variatsioonikordajana, mis on

$$v = s_p / p$$

Punktide arvu määramine oleks lihtne, kui tegemist ei oleks surnud ringiga – Studenti kordaja t , mille alusel määratakse punktide arv, sõltub omakorda punktide arvust.

Siiski on lahenduse leidmiseks mitmeid meetodeid. Juhenditest võib leida vastavaid nomogramme. Kuid kõige käepärasem on **proovimise meetod**. Selleks tuleb koostada tabelarvutusprogrammis, (*Excel*’is) tabel, mille esimeses veerus antakse ette järjest kasvav n_1 . Siis arvutatakse ridahaaval igale n_1 väärtusele vastav vabadusastmete arv $f = n_1 - 1$, mille alusel võetakse vastav Studenti kordaja t (Tabel 5 Studenti kordaja t). Seejärel arvutatakse ette antud usalduspiiri ning suhtelise vea abil n_2 . Arvutusi tehakse n_1 kasvades ridahaaval, kuni „arvutud“ $n_2 \leq n_1$. See n_1 ongi piisav punktide arv. Prooviarvutuste tabel on järgnevas näitena toodud.

Näide 12. Mõõtmispunktide arvu määramisest proovimise meetodil

Tabel 41 Mõõtmispunktide arvu määramisest proovimise meetodil

Arvutustes:
Variatsioonikordaja $v = s_p / p = 0,1 = 10 \%$
Ette antud suhteline viga $\rho = 0,05 = 5 \%$
Ühepoolne usalduspiir $P = 0,85 = 85 \%$

Rahuldav tulemus $n \geq 5$

n_1	$f = n - 1$	Studenti kordaja t (85%)	„Arvutatud“ $n_2 = (t v / \rho)^2$
1	0		
2	1		
3	2	1,25	6
4	3	1,19	6
5	4	1,16	5
6	5	1,13	5
7	6	1,12	5
8	7	1,11	5
9	8	1,10	5
10	9	1,10	5

2.5.3. Mõõtmis- ja proovimiskohtade optimaalne paiknemine

projekteeritakse mõõdetavate tunnuste trendi alusel, arvestades ka uuringuala geoloogilist ja geograafilist situatsiooni, eriti aga maavalduste ja teede paiknemist ning kinnistu omanike tingimusi.

Varasemas juhendmaterjalis soovitatakse uuringualal kujundada ruutsilmne uuringuvõrk. See eelistus on tekkinud mitmest näiliselt lihtsustavast eeldusest. Ruutsilmse võrgu puhul saavad mõõtmis- ja proovimiskohad ühtlaselt jaotatud ja hiljem on sellise võrgu abil lihtsam plokke kujundada⁷⁰. Samuti on lihtsam ridades paigutatud mõõtmiskohtade alusel joonistada iseloomulikuid läbilõikeid. Ruutsilmse võrgu vastu on aga mitu argumenti:

- mõõtmis- ja proovimiskohad ei pea olema regulaarselt jaotatud; hoopis mõistlikum on, kui maardla parimas ja/või esmahõlvatavas osas on uuringu täpsus suurem ja võrk vastavalt tihedam,
- ruutsilmse võrgu paigutamine liigendatud maastikku ja haritavale maale võib osutuda kulukaks, tihti võimatuks,
- teoreetilist põhjendust välja toomata võib väita, et ruutsilmne, seega regulaarse sammuga võrk võib süstemaatiliste nähtuste, näiteks karsti kohta anda väärinformatsiooni; kujutage ette, et võrk projekteeritakse sammuga 300×300 m alal, kus karstivööndite vahe on samuti keskmiselt 300 m; kui uuringuvõrgu esimene puurauk sattus juhusikult karstivööndite vahelise ala keskele, siis suure tõenäosusega ei satu ka rea järgmised augud karstivööndisse.

Seepärast tuleb põhjalikult kaaluda, kuidas uuringuvõrk koostada ja orienteerida. Kas paigutada mõõtmis- ja proovimispunktid ehk puuraugud ja kaevandid maastikul:

- huupi,
- valikuliselt,
- käikudena (trassidena, maršruutidena, profiilidena),
- kontsentriselt või
- mingi muu algoritmi alusel.

Üldiselt on kõige soovitavam mõõtmis- ja proovimiskohtade hajapaigutus. Argument, et huupi paigutatud mõõtmiskohtade alusel ei saa kujundada ilmekaid läbilõikeid, pärineb ajast kui kasutati joonlauda ja kui puudus arvutitarkvara, mis lubab kujundada läbilõikeid mistahes ette antud joonel. Kaasaegne tarkvara võimaldab töödelda mistahes paigutusega mõõtmispunktide andmekogumeid. Nii et jääb ära ka ruutvõrgu kasuks rääkiv plokkimise ja varu arvutamise lihtsus.

Mõõtmis- ja proovimispunktide tihedus

Käsitledes rõhuga lasumisega laialdasi maardlaid tohime piirduda tasandilise käsitlusega. Siis on objekt tasandil kirjeldatav kahe, x - ja y -koordinaadiga. Võrgustiku projekteerimise oluline küsimus on mõõtmispunktide arvu ja nende tiheduse – punktutiheduse valik⁷¹.

⁷⁰ Eeldusel, et plokkide ja väljade nurgapunktideks saavad puuraugud ja/või mõõtmiskohad

⁷¹ Kõik järgnevas mõõtmispunktidesse puutuv on käsitletav ka proovimispunktide suhtes

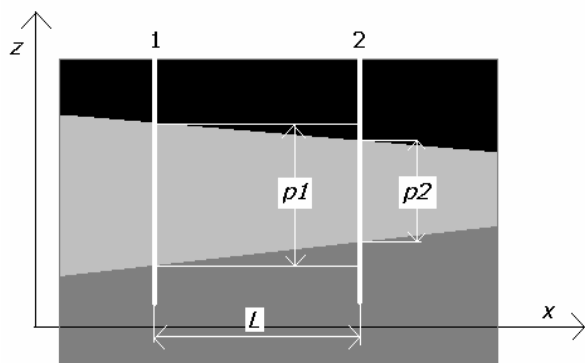
Punktitiheus (δ) on mõõtmispunktide keskmine arv uuritavas mahus, ruumilises plokis, xyz-ruumi mahuühikus. Käsitledes maardlat kahemõõtmelisena, on punktitiheus mõõtmispunktide keskmine arv xy-tasandi pindalaühikul, tavaliselt ruutkilomeetril ($1/\text{km}^2$). Punktitiheus on otseses seoses eelnevas esinenud mõistega **võrgu samm** (puurimise samm, uurimisvõrgu silm). Tähistame sammu b . Näiteks mõiste “võrk 200×200 m” tähendab, et proovikohad valitakse ridamisi ehk käikudena, sammuga $b = 200$ m ja käikude vahe k on 200 m. Mõõtmispunktide arv ruudus, mille küljepikkuse on l , avaldub

$$n = (l/b + 1)^2$$

Seega, kui puurimissamm on 200 m ehk $0,2$ km, siis ruutkilomeetrisel alal ($l = 1$) on $(1 / 0,2 + 1)^2 = 36$ proovipunkti, mis ongi antud juhul punktitiheus ($\delta = 36$ punkti ruutkilomeetril, $1/\text{km}^2$).

Varuploki optimaalne suurus lavamaardlas

Uuringu käigus tehtud mõõtmiste, proovide ja analüüside tulemused moodustavad tunnuste valimi. Valimi suurus määrab teabe usaldusväärsuse - mida suurem on valim, seda usaldusväärsem on tunnuse keskvääratus. Seega tuleks usaldusväärsuse huvides teha võimalikult palju mõõtmisi, proovimisi. Kuid maavara uurides ei ole otstarbekas võtta proove ainult ühest ja samast kohast. Ei ole ju uuringu ainus eesmärk mõne tunnuse, ükskõik kui oluline see ka ei oleks, täpne määramine ühes kohas. Ülesanne on maavara koguse, s.t lasundi või selle maavaraks sobiva osa lasumistingimuste, suuruse, ehituse ja teiste oluliste geoloogiliste tunnuste kindlaks tegemine. Selleks uuritakse maardlat ruumiliselt, puuritakse läbi nii laiuti kui sügavuti. Nii hakkab uuritava tunnuse mõõtmistulemuste hajumist (muutlikkust, varieerumist) mõjutama süstemaatiline muutlikkus, trend ja valimit ruumiliselt suurendades hakkab tema usaldusväärsus langema.



Pilt 2.36 Trendist tulenev lasundi paksuse muutumine

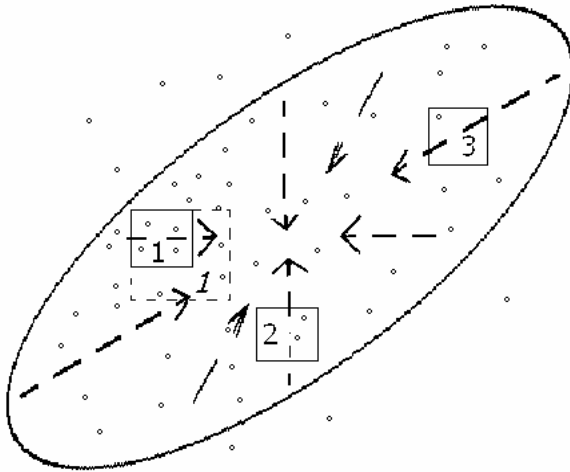
Näiteks siin pildil on puuraugus 1 mõõdetud kihi paksuse väärtus $p1$. Veidi eemal, kaugusel L augus 2 on samal tunnusel juba teine väärtus. Joonisel on $p2 < p1$. Süstemaatilist muutust iseloomustab $1 \Rightarrow 2$ -suunalist trendi intensiivsus

$$I = (p2 - p1) / L,$$

mille mõõtühikuks on tunnuse mõõtühiku ning xy-koordinaadistiku mõõtühiku suhe. Kui koordinaadistiku mõõtühikuks on kilomeeter (km) ja kihi paksust mõõdetakse meetrites, siis trendi intensiivsuse mõõtühikuks on m/km. Antud juhul lasundi paksus väheneb suunas $1 \Rightarrow 2$, mistõttu trend on miinusmärgiga.

Trend võib olla lineaarne või mittelineaarne. Trendi intensiivsust (tunnuse muutumise kiirust) ja suunda kirjeldab eelpool (p 1.5.2), käsitlust leidnud gradient (vt ka õppematerjali Infotöötlus mäenduses). Lineaarne trend on lihtne, see tähendab, et tunnuse muutumine ja suund on igas punktis ühesugused, konstantsed⁷². Üldiselt iseloomustab geoloogiliste objektide tunnuseid mittelineaarne trend, see tähendab, et tunnuse muutumise intensiivsus ja suund erinevad igas punktis. Käsitledes piisavalt väikest ala või plokki, võime selle piires rahulduda ka lineaarse käsitlusega ja mõõta tunnuse süstemaatilist muutlikkust ühe gradiendiga (järgnev pilt).

⁷² Geoloogilise tunnuse lineaarse trendiga on samuti kui normaaljaotusega – ta ei kehti kunagi, kuid teda kasutatakse alati.



Pilt 2.37 Lõige maardlast, mille moodustab läätsekujuline lasund

Ringikesed pildil tähistavad hajali paiknevaid mõõtmiskohti, kus on määratud geoloogilise tunnuse väärtus p . Tunnuse väärtus kasvab lasundi keskme suunas. Kasvu iseloomustab gradient, mille suunda tähistavad nooled. Maardlale on kujundatud kolm ruudukujulist ploki 1, 2 ja 3, mis võiksid olla kaevväljad või varuplokid. Plokkide küljed on suunatud peamiste ilmakaarte järgi. On näha, et punktitihedus on suurim plokkis 1 ja vähim plokkis 3.

Joonis illustreerib ka seda, kuidas ploki 1 suurendamisega kujundatakse uus plokk 1 (kontuuritud punktiiriga). Uues plokkis on rohkem proovikohti, kuid trendi mõju on suuremas plokkis ilmselgelt suurem kui väiksemas plokkis.

Edasises arutelus, püüdes saada varuploki jaoks mingi tunnuse võimalikult head ja usaldusväärset keskmist, kirjeldame selle tunnuse muutlikkust ploki piires dispersiooniga. Nagu teada, on parim moodus keskvärtuse usaldatavuse tõstmiseks valimi suurendamine. Valimi suurendamise esimene võimalus on hankida uuritavast plokkist rohkem andmeid, suurendada punktitihedust. See pole odav ja seepärast püütakse sellest hoiduda. Pealegi, paljudel juhtudel on geoloogiline töö ehk proovide võtmine juba tehtud ja maardla plokkimine toimub hiljem⁷³. Seepärast üritatakse sageli valimit kasvatada ploki suurendamisega, haarates sellega keskmise arvutamiseks rohkem mõõtmiskohti (Pilt 2.37). Kuid ploki suurenedes kasvab süstemaatilise muutlikkuse ehk trendi osakaal summaarses dispersioonis⁷⁴. Siis tekibki küsimus, kui mahukaks võib ploki ajada – valimit suurendades väheneb keskmise mõõtemääramatus tänu andmete lisamisele, kui suureneb trendi mõju arvel. Lahenduse otsimine kuulub optimeerimisülesannete valda. Üritame leida ploki optimaalseid mõõtmiseid lähtuvalt geoloogilise informatsiooni muutlikkusest.

Lihtsa kihtmaardla puhul geoloogilise tunnuse ülddispersioon avaldub valemiga

$$D = D_p / n + D_t$$

kus D_p on üksikmõõtmise dispersioon, n - mõõtmiste arv ja D_t - uuritava geoloogilise tunnuse trendist tulenev dispersioon ploki piires.

Üksikmõõtmise dispersioon D_p koosneb geoloogilise objekti muutlikkusest ja mõõtmisveast, D_t sõltub trendi intensiivsusest ja ploki mõõtmetest. Kui ploki laiendada, siis tunnuste arv n plokkis kasvab ja valemi esimene liige väheneb. Samas valemi teine liige D_t suureneb, sest ploki suurenemisel hakkab üha rohkem ilmnema tunnuse süstemaatiline muutlikkus.

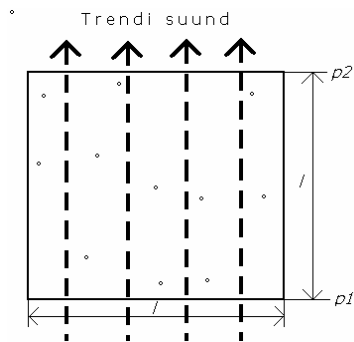
Käsitleme lihtsuse huvides ruudukujulise ristlõikega ploki lavamaardlas, milles proovikohad on hajali. Sel juhul kehtib plokki sattuvate proovikohtade arvu ja nende tiheduse (punktitiheduse) vahel seos

$$n = \delta l^2$$

kus δ on punktitihedus ja l ploki külje pikkus. D_p ja D_t avaldamiseks võtame lihtsustavalt aluseks lineaarse trendi, mille puhul süstemaatilise muutlikkuse maksimaalne intensiivsus on konstantne, väärtusega ΔF .

⁷³ Nii tehti Eesti põlevkivimaardlaga, kuid kahjuks jäeti kõrvale mäetehniline aspekt ja plokid kujundati meelevaldselt. Seetõttu tuleb varuplokkide optimeerimisega tegeleda iga kord, kui taotletakse uut kaevandamisluba või mäeeraldise laiendust.

⁷⁴ Teatavasti juhuslikku muutlikkust ja süstemaatilist muutlikkust iseloomustavad dispersioonid liituvad



Pilt 2.38 Ploki külg on trendi (gradiendi) suunas.

p_1 – tunnuse arvutuslik (keskmise) väärtus ploki alumisel piiril, p_2 – sama ploki ülemisel piiril

Vaatleme esmalt plokki, mille külg langeb kokku trendi (gradiendi) suunaga (pilt kõrval). Sel juhul on süstemaatilise muutlikkusest tulenev hälve ploki piires

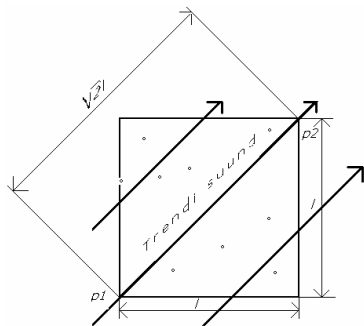
$$p_2 - p_1 = l \Delta F$$

Kuna proovikohad on hajali, siis gradiendi suunas liikumisel suurenevad vahemikus $p_1 \Rightarrow p_2$ plokki sattuvate proovikohtade arv ja nendes mõõdetav süstemaatiline muutlikkus ühtlase jaotuse kohaselt. Ühtlase jaotuse dispersioon on

$$D_t = (p_2 - p_1)^2 / 12 = l^2 (\Delta F)^2 / 12$$

Teisel juhul, kui trend on ploki diagonaali suunas (järgmine pilt) on

$$p_2 - p_1 = 2^{0.5} l \Delta F$$



Pilt 2.39 Ploki diagonaal on trendi suunas.

p_1 – tunnuse arvutuslik väärtus ploki alumises vasakus nurgas, p_2 – sama ploki paremas ülemises nurgas

Sel juhul kasvab plokki sattuvate proovikohtade arv ja nendes mõõdetav süstemaatiline muutlikkus vahemikus $p_1 \Rightarrow p_2$ kolmnurkse jaotuse kohaselt. Kolmnurkse jaotuse dispersioon on

$$D_t = (p_2 - p_1)^2 / 24 = (2^{0.5} l (\Delta F))^2 / 24 = l^2 (\Delta F)^2 / 12$$

ehk sama valemi järgi.

Pannes nüüd saadud avaldised kokku, saame

$$D = D_p / (\delta l^2) + l^2 (\Delta F)^2 / 12$$

Et saadud avaldise abil leida ruudukujulise ploki optimaalset mõõdet, sellist, milles juhusliku ja süstemaatilise muutlikkuse summa oleks minimaalne, sooritame klassikalise optimeerimismenetluse, võttes esimese tuletise, mille võrrutame nulliga

$$dD / dl = - 2 D_p / \delta + 2 l (\Delta F)^2 / 12 = 0$$

Pärast lihtsustusi saame

$$l_{opt} = 3,46 D_p^{0.5} / \Delta F \delta^{-0.5}$$

Edasi, kasutades teadmist, et dispersioon on standardhälbe ruut

$$s_p = D_p^{0.5}$$

võime defineerida väga olulise geoloogiliste objektide muutlikkuse tunnuse, juhusliku ja süstemaatilise muutlikkuse suhtarvu

$$\mu = D_p^{0.5} / \Delta F = s_p / \Delta F$$

See suhe saab olulise rakendusliku väärtuse, kui leiame trendi kirjeldamiseks piisavalt hea mudeli. Siis saame trendi analüüsiga hinnata, millist osa tunnuse muutlikkusest kirjeldab mudel ja võtta see süstemaatiliseks muutlikkuseks. Teise osa, mida mudel ei kirjelda ja mida iseloomustab jääkdispersioon (jääkstandardhälve), jätame juhuslikuks muutlikkuseks. Trendi analüüs annab mõlema jaoks arväärtused, mille alusel on juba lihtne määrata maardla, ploki või välja iseloomulikkude muutlikkuste suhet. Isomeetrilise ploki, maardla või kaevevälja, sellise mis on ligilähedaselt ruudu kujuline, külje optimaalne (keskmise) pikkus on:

$$l_{opt} = 3,46 \mu \delta^{-0.5}$$

Valemist järeldub, et esinduslik varuplokk võib olla seda suurem, mida väiksem on uuritava tunnuse süstemaatiline muutlikkus sama tunnuse juhusliku muutlikkuse suhtes ja mida suurem on uuringu punktihedus. Mõned illustreerivad arvutustulemused on järgnevas tabelis.

Tabel 42 Mõningaid andmeid Eesti maardla põlevkivikihi süstemaatilise ja juhuslikust muutlikkusest ja neile vastavad isomeetriselise varuploki optimaalsed külje pikkused

Tunnus, mille muutlikkuse alusel tuleks määrata varuploki optimaalne suurus	Süsteemaatiline muutlikkus	Juhuslik muutlikkus	Muutlikkuste suhtarv μ	Optimaalne ploki külje pikkus vastavalt punktihedustele, km	
Varu endisaegne kategooria, mis võetakse aluseks ploki koostamisel:				C	B
Varu nüüdismõiste:				Reservvaru	Tarbevaru
Vastav uuringu punktihedus oli toona 1/km ² :				2	4
Kihindi lasumissügavus m	2...5	2...10	1...2	-	-
Kihindi paksus m	0,007...0,05	0,05...0,15	1...> 3	≈ 3	≈ 6
Kihindi kütvus MJ/kg	0,04...0,23	0,41...0,64	2...> 3	≈ 3	≈ 5
Kihindi kallakus m/km	3	2	0,6...1	-	-

Tabeli parempoolsete veergude arvud on mõeldud endisaegsete geoloogiliste uuringute ajal määratud põlevkivi varu (B ja C kategooria plokkide) kujundamiseks uuteks, esinduslikeks plokkideks. See vajadus võiks tekkida uute kaevandusväljade piiritlemisel.

2.5.4. Uuringuvõrgu orienteerimine

Tavaliselt on varasemate geoloogiliste tööde alusel teada mingi lähteandmestik, mis võib olla esitatud näiteks sellisel kujul:

Tabel 43 Lähteandmestiku näide, aluseks on Kurevere dolokivimaardla

PA	Koordinaadid m		Suudme kõrgus m	Lasundi tunnused			
	L-Est			Lasundi paksus h	Kvaliteeditunnused %		
	y (N)	x (E)	z			CaO	MgO
	m	M	m	m	%	%	%
...
3	6496907,51	474751,21	11,44	4,70	29,97	20,68	...
4	6496547,11	474029,43	7,47	3,70	30,41	19,31	...
5	6496907,42	473807,62	7,48	1,10	27,78	20,36	...
...

Lähteandmete alusel uuritakse peamiste uuritavate tunnuste trendi. Analüüsi tulemused saadakse edasiste arvutuste lähteandmed: standardhälve, variatsioonitegur, jääkstandardhälve, mis loovad aluse uuringu võrgu tiheduse ja tüübi valimiseks. Sellekohane näide tuleb järgnevas.

Trendi tüüp ja tunnused

määravad uuringuvõrgu tüübi, milleks võib olla:

- ruutvõrk,
- ristkülik- ehk käikude võrk,
- hajavõrk, s.h kontsentriiline võrk.

Trendi analüüsi alusel, kui:

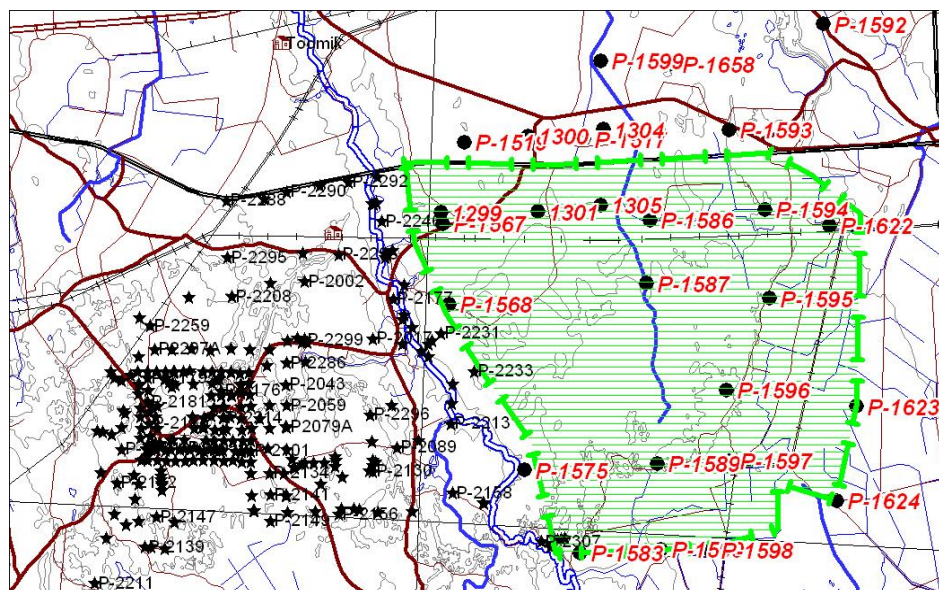
- trend puudub, siis valitakse ruut- või ühtlane hajavõrk,
- on mittelineaarne trend, siis saab selle alusel hinnata, kus on maardla parim ala et kujundada sellel kas ruutvõrk või kontsentreeritud hajavõrk,
- on lineaarne trend siis on soovitatav orienteerida käigud piki gradiendi suunda.

Kui uuring tehakse käikudega, siis suhe: käikude vahe / mõõtmiskohtade vahe leitakse valemiga

$$k / b = \Delta F^2 / s_0 = 1 / \mu$$

kus: k – käikude vahekaugus, km, b – mõõtmiskohtade vahe käigul, km, ΔF – mõõdetava kvaliteeditunnuse gradiendi pikkus, 1/km, s_0 – mõõdetava kvaliteeditunnuse jääkstandardhälve

Näide 13. Uuringuvõrgu arvutamine Ida-Kabala fosforiidialal



Pilt 2.40 Ida-Kabala (Sonda) fosforiidiala skeem

Huvi pakkuv ala on pildil kaetud rohelse viirutusega. Mustad tärnid pildil on Lääne-Kabala uuringuvälja puuraukud, mustad punktid punaste tähistega on selles näites kasutatud puuraukude asukohad. Puuraukude andmed on tabelis:

Tabel 44 Ida-Kabala fosforiidiala mõningad puuraukud

Lähteandmed									
Puurauk	Kohalikud koordinaadid, km		Toimaine sisaldus, %	Lineaarne tootlus, %·m	Kihindi paksus, m	Toimaine tootlus, t·P ₂ O ₅ /m ²	Mg moodul	Raua-moodul	
	x	y							P ₂ O ₅ %
P-1517	3.240	12.107	7.1	17.8	2.5	0.38	0.09	0.10	
P-1519	0.730	11.936	10.9	43.6	4.0	0.92	0.08	0.13	
P-1567	0.334	10.453	11.2	44.6	4.0	0.95	0.07	0.10	
P-1568	0.530	9.008	19.0	138.5	7.3	2.94	0.04	0.05	
P-1573	1.837	8.995	15.0	86.7	5.8	1.84	0.02	0.06	
P-1575	2.229	6.085	8.8	53.5	6.1	1.13	0.07	0.08	
P-1583	3.459	4.646	4.0	14.0	3.5	0.30	0.27	0.21	
P-1584	4.372	15.109	8.2	19.7	2.4	0.42	0.16	0.22	
P-1586	4.686	10.710	11.3	54.9	4.8	1.16	0.05	0.11	
P-1587	4.669	9.567	11.3	21.0	1.2	0.44	0.04	0.06	
P-1589	5.017	6.329	12.2	40.1	3.8	0.85	0.00	0.00	
P-1590	5.154	4.780	7.3	50.9	7.0	1.08	0.04	0.09	
P-1591	6.366	15.602	3.9	5.4	1.4	0.12	0.15	0.44	
P-1592	8.180	14.411	4.3	10.0	2.3	0.21	0.35	0.38	
P-1593	6.281	12.412	8.9	18.6	2.1	0.39	0.18	0.31	
P-1594	7.102	11.009	6.7	28.6	4.3	0.61	0.04	0.08	
P-1595	7.259	9.416	10.4	52.1	5.0	1.11	0.07	0.07	
P-1596	6.414	7.719	10.9	59.9	5.5	1.27	0.08	0.08	
P-1597	6.518	6.443	12.0	40.9	3.4	0.87	0.03	0.05	
P-1598	6.201	4.817	7.0	28.8	4.1	0.61	0.15	0.08	
P-1599	3.527	13.538	7.7	29.8	3.9	0.63	0.13	0.29	
P-1622	8.455	10.791	4.3	13.4	3.1	0.28	0.10	0.27	
P-1623	9.165	7.551	8.7	38.1	4.4	0.81	0.08	0.12	
P-1624	8.821	5.829	7.3	27.7	3.4	0.59	0.09	0.11	
P-1658	5.019	13.549	5.5	1.7	0.5	0.03	0.27	0.43	
1299	0.291	10.649	15.4	78.7	5.1	1.67			
1300	2.071	12.110	11.7	19.9	1.7	0.42			
1301	2.326	10.755	11.0	38.3	3.0	0.81			
1304	3.635	12.300	8.1	39.8	4.9	0.84			
1305	3.644	10.934	17.7	38.4	1.6	0.81			
	Keskmine		9.6	38.5	3.7	0.82	0.11	0.16	
	Standardhälve		3.8	27.6	1.7	0.58	0.09	0.13	
	Variatsioonitegur		0.4	0.7	0.5	0.72	0.81	0.80	

Tabel 45 Arvutuskäigu näide

Trendi analüüs

Faktor - toimaine tootlus

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.600
R Square	0.359
Adjusted R Square	0.312
Standard Error	0.485
Observations	30

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	2	3.557583	1.77879142	7.575832	0.002446
Residual	27	6.339551	0.23479817		
Total	29	9.897134			

	Coefficient	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	2.031253	0.36	5.71709869	4.47E-06	1.302249	2.7602574	1.302249	2.760257
x - ida X Variable 1	-0.115893	0.034888	-3.3218745	0.002574	-0.187477	-0.044309	-0.187477	-0.044309
y - põhi X Variable 2	-0.068437	0.028849	-2.3722017	0.025068	-0.127631	-0.009243	-0.127631	-0.009243

Selgitused trendi analüüsi juurde

Tootlus väheneb x-suunas	-0.12 t/km
Tootlus väheneb y-suunas	-0.07 t/km
Tootlus kasvab lõuna-edela suunas:	
Gradient	F = 0.13 t/km
Direktsiooninurk	φ = 211 kraadi
Juhusliku ja süstemaatilise suhe μ =	2.6
Optimaalne varuploki külje pikkus	8 km
Varuploki pindala võiks olla	59 km ²
Maršruutide ja puuraukude vahe suhe	2.6

Uuringupunktide (puuraukude) arvu määramine

Vajalik uuringupunktide arv	$n = (t v / \rho)^2$		
Trendi arvestav variatsioonitegur	v	0.44	
Ette antud suhteline viga	ρ	0.1	
Vajalik uuringupunktide arv	n	32	
Uuringuvälja pindala, km ²	S	50	
Punktiühik	1/km ²	δ	0.6

Studenti teguri sõltuvus mõõtmiskohtade arvust

f	t _{85%}	Aukude arv	
		Eelnev	Lõplik
4	1.48	5	41
9	1.37	10	36
19	1.32	20	33
29	1.31	30	32
39	1.30	40	32
59	1.30	60	32

Proovimise teel leitud sobiv arv

Tulemus

Kui võtame aluseks kihindi tootluse, kui kõige suurema variatsiooniga tunnuse ja nõuda, et

see määrav kvaliteeditunnus ei tohi olla ette antud piirist väiksem kui

ja seda tõenäosusega 90%, siis proovikohti (puurauke) peaks olema

Kui sobiv puurimistihedus (punktiühik) on

siis esialne uuringuala võiks olla kuni

Kui puuriks ridadena (käikudena), aukude vahe käigus

Kusjuures käigud oleksid orienteeritud kirde-loode suunas direktsiooninurgaga

10%

32

0.6 1/km²

50 km²

0.5 km

211 kraadi

0.2 km, siis käikude vahe oleks

Toodud näide on võetud TTÜ mäeinstituudi rakendusuuringute varamust.

2.5.5. Uuringuala valimine

on kompleksülesanne, mille lahendamisel tuleb käsitleda kõiki geoloogilisi, geograafilisi ja keskkonnakaitselisi aspekte. Kuigi kaasaegne programmvarustus ja eriti internetiteenused võimaldavad suure osa tööst teha arvuti taga, tuleb projekteerijal tingimata ja mitte üks kord käia looduses uuringuala üle vaatamas. Uuringuala valimise peamised tegevused lavamaardlas on:

- hinnatakse uuringuala geograafilist situatsiooni: sobivust uuringuks, kaevandamiseks jne; eriti tuleb kaaluda looduskaitseaspekte, maakasutust, juurdepääsu jms,
- visandatakse esmane uuringuala (otsinguala) ja määratakse selle ligikaudne pindala, kas kaardistamisprogrammi või mõne muu meetodi abil,
- hinnatakse maavara potentsiaalset maht ala pindala ja varasemast teada oleva maavaralasundi tootluse korrutisena,
- kui maavara potentsiaalset maht alal ületab oluliselt (üle kahe korra) lähteülesandes nõutavat, asutakse esialgselt visandatud uuringuala vähendamaks; arvutil tehakse seda ala piiripunktide järkjärgulise väljajätmise teel, alustades kõige madalama kvaliteediga ja/või ebasobival alal paiknevatest punktidest,
- kui uuringuala varu maht osutub ebapiisavaks või ala andmestik on ebasobiv mõnel muul põhjusel (on kaevandatud, on looduskaitsealal jms) otsitakse trendianalüüsi abil ala laiendamise võimalusi ja jätkatakse samade protseduuridega

2.6. Uuringu aruanne

Mistahes geoloogilise uuringu kohta koostatakse ja esitatakse aruanne. See on dokument, milles peavad olema kajastatud kõik uuringul tehtud tööd. Samuti kui uuringu projekt, koosneb ka uuringu aruanne seletuskirjast ja lisadest. Ka aruande iga osa, leht ning lehekülg peavad olema identifitseeritavad maardla, uurija ja taotleja järgi. Tiitellehel peavad olema samad andmed, mis projektilgi. Kuna aruanne on informatiivsem dokument kui projekt, siis lisandub mõningaid olulisi osi:

- lühikokkuvõtte eesti keeles ja selle tõlge tellijale sobivas keeles,
- eessõna, kus iseloomustatakse töö objekti ja eesmärki.

2.6.1. Aruande sisu

- uuringuala ja selle ümbruse geograafiline üldiseloomustus, rõhuasetusega taristule ja looduse ning kultuuriväärtusega objektidele,
- varasem geoloogiline uuritus, selle hinnang, koos vajalike jooniste või graafilise lisaga,
- uuringuruumi ja selle ümbruse geoloogilise ehituse iseloomustus nii varasemate geoloogiliste tööde kui ka tehtud uuringu alusel,
- uuringu tööde: mõõtmise, proovimise, sondeerimise jne meetodika ning maht,
- uuringu käigus saadud andmestiku ja tulemuste usaldusväärsuse analüüs ning hinnang,
- maavara omaduste ja võimalike kasutusala hinnang,
- uuringuruumi ja selle ümbruskonna hüdrogeoloogiliste ning hüdroloogiliste tingimuste hinnang ja kaevandamisest tulenevatele võimalikele muutuste prognoos,
- mäendustingimuste hinnang,
- uuringu keskkonnamõju hindamise tulemused,
- varu(de) arvutus, mille juurde kuulub varu piiritlemise kriteeriumite: tootsa lasundi paksus ja omadused, häiritus jne, vastavalt uuringuülesandes nõutule,
- plokkide suuruse määramise ning arvutuse meetodi(te) selgitus,
- kokkuvõtte: tulemused, soovitused, järeldused,
- lähteallikad: fondimaterjalid, aruanded jne.

2.6.2. Aruande tekstilisad:

- uuringuloa koopia.
- mõõtmis- ja proovimispunktide (puuraukude, kaevandite ja kaeveõõnte) kataloog, mis sisaldab nende koordinaate, sügavusi, erimite paksusi, proovide indekseid, mõõdetud veetaset, mõõtmise aega jne,
- proovimise kirjed (žurnaalid),
- laboratoorsete määrangute ning tehniliste katsetuste tulemused (protokollid),
- laboratoorsete määrangute sise- ja väliskontrolli tulemused,
- maavara(de) lasundi(te) ja katendi (muld eraldi !) keskmiste paksuste ning laborimäärangute ja tehniliste omaduste keskmiste ja variatsioonitunnuste arvutuse tabelid (väljatrükid) plokkides ja maardlas,
- plokkide pindala, mahu ja maavara(de) koguse arvutuse sisend- ning väljundtabelid (väljatrükid),
- varu koondtabel,
- hüdrogeoloogiliste, hüdroloogiliste ja teiste uurimistööde tulemused,
- geodeetiliste tööde kirjeldus (seletuskiri),
- õiend (akt) originaalmaterjali hoiustamisele andmise kohta,
- õiend (aktid) uuringuala korrastamise kohta, sh uuringupuuraukude ja -kaeveõõnte likvideerimise aktid või koondakt,
- koopia keskkonnamõju hindamise dokumentidest,
- uuringu tellija hinnang tööle,
- maardla registrikaardi või selle täienduste projekt.

2.6.3. Aruande graafilised lisad:

- uuringuala asukoha kaart, tavaliselt mõõtkavas 1 : 100 000,
- uuringuala ja selle lähiümbruse geoloogiline kaart (aluspõhja ja puistesetete kaart); need on nõutavad, kui uuringualal avanevad erivanuselised aluspõhja või vanuselisel ja geneetiliselt erinevad kvaternaarisetted,
- uuringuala plaan, kuhu on kantud kõik uuringu käigus rajatud mõõtmis- ja proovimiskohad: puuraugud, kaevandid, paljandid, geofüüsikaliste, hüdrogeoloogiliste-hüdroloogiliste ja muude mõõtmiste, proovimiste ning katsetuste kohad; plaanile kantakse ka kõik varasemate tööde teadaolevad mõõtmis- ja proovimiskohad,

- varu arvutuse ehk plokkide plaan ja vastavad lõiked, mida võimalusel võib ühildada uuringuala plaaniga ja lõigetega; varu arvutamise kirjeldamiseks kantakse plaanile puuraugud, kaevandid ja paljandid, märkides nende juurde suudme kõrgus koos katendi ja tootsa kihi (kihindi, vajadusel erimite lõikes) paksustega; plaanil peavad olema tootsa lasundi samapaksuse ja lamami samakõrgusjooned, varuplokkide piirid, läbilõigete asukohad jm vajalik,
- geoloogilised lõiked, vajadusel ka iseloomulikud geoloogilised tulbad; lõigetel näidatakse põhjavee tavaline ja kõrgveetase,
- vastavalt tellija nõuetele ja lähteülesandele lisatakse täiendavat graafilist materjali, nagu katendi samapaksusjoonte plaan, lasundi tootsa osa kvaliteeditunnuste jaotuste plaanid, põhjavee samakõrguse plaanid, karotaažidiagrammid jne.

3. MÄENDUSANALÜÜS

3.1. Analüüs kui loomingu protsess

3.1.1. Põhimõisted

Analüüs

kr. *analysis* – lahutamine, liigendamine, koostisosadeks lahutamine, eritelu, on teadusliku uurimise meetod, mis seisneb uuritava objekti kui terviku käsitlemises erinevate tunnuste ja omaduste ning nende vaheliste seoste jälgimise, mõõtmise, võrdlemise, modelleerimise jne kaudu.

Analüüsi lahutamatu paariline on süntees

Süntees

kr. *synthesis*, ühendamine, liitmine on teadusliku järeldamise meetod, mis seisneb analüüsi käigus saadud teadmise alusel objektist uue kuvandi loomises.

Inseneriteadustes on analüüs ja süntees suunatud objekti täiustamisele, töö tõhustamisele, paremale kasutamisele, uute insenerilahenduste otsingule, uute paremate objektide leidmisele ja loomisele. Projekt on süntees ⁷⁵.

Mäendusanalüüsi objektid

on:

- maapõu ja maavarad,
- mõjutatav keskkond kui loodus- ja sotsiaalkooslus,
- mäemasinad ja -seadmed,
- kaevandamise ja allmaaehitamise tehnoloogia.

3.1.2. Loomingulise ülesande kavandamine

Inseneri töö on loomingu

Probleemi sisse elamine

Saanud ülesande ja asudes seda lahendama, tuleb kindlasti tutvuda taustaga: valida ja uurida kõikvõimalikke probleemiga seonduvaid kirjallikke ja elektroonilisi allikaid: juhendmaterjale, raamatuid, artikleid, uuringuaruandeid, seadusi, määruseid, dokumente jne. See kõik on eelinfo kogumine.

Tingimata tuleb tutvuda analoogidega – varem või teistes tingimustes tehtud sarnaste projektidega, uuringutega, töödega. Seda mitte selleks, et neid kopeerida, vaid ikka selleks, et leida oma ülesande parim lahendus. Üks võtte sel teel on vigade otsimine varem tehtud ja teiste autorite töödes, nende leidmine ja analüüs ⁷⁶.

Sisseelamist hõlbustab internetiotsing, raamatukogude kataloogide ja bibliograafilistes teatmeteostes tuhnimine. Juba materjali otsides tuleb koostada teemakohase kirjanduse täielik bibliograafilise kirje nõuetele vastav nimistu ja edasise töö vältel täiendada seda pidevalt. Kirja tuleb panna allikaandmed: pealkiri ja autorid (tiitellehelt, raamatu puhul ka pöördelt), veebiaadress ja tingimata ka selle poole pöördumise aeg, sest internetiallikad pole püsivad. Loomulikult tuleb üles tähendada kõik teema suhtes

⁷⁵ Seoses sellega vaatleme käesolevas analüüsi, reserveerides sünteesi kaevanduse projekteerimise kursusele

⁷⁶ Ärge korrake vanu vigu vaid tehke uusi, et neist õppida.

olulised andmed, meetodid, põhiseisukohad, tsitaadid jne. Üles tuleb märkida kogu läbi vaadatud materjal, mitte ainult see, mis esmapilgul kasulik näib ⁷⁷. Sisseelamise staadiumis on abiks:

- tudengil – juhendaja
- projekterijal – projekti peainsener
- teaduril – vanemteadur
- vanemteaduril – professor
- professoril – kogemus

Küsimustiku koostamine

Tutvunud ülesande taustaga, tuleb koostada küsimustik, nimistu **Mida teha**. Kirja tuleb panna kõik mis pähe tuleb, loomulikult seonduvalt projektiga, ülesandega. Nii tekib tegevuskava algend, mis esialgu näib üsna kaootiline.

Eraldumine ehk haudumine

Tutvunud taustaga ja koostanud tegevussuundade ning vajalike tegevuste nimistu, tuleb hetkeks aeg maha võtta, eemalduda probleemist, et küsimused laagerduks. Mõned autorid soovivad mõneks ajaks eralduda ka projekti meeskonnast, et tegutseda mõjutusvabalt. Nii mõnigi projekti juht kasutab 'sunderaldamist' ehk "külvikorda".

Õpetlik lugu sunderaldumisest

Maailmakuulus tehisintellekti eriteadlane, Edinburghi Ülikooli professor Donald Michie kirjutab ⁷⁸: „Kunagi tuli mul töötada rakendusuringute osakonnas, kus muude kummastavate asjade seas praktiseeriti ka „külvikorda“. Perioodiliselt, (ei mäleta, kas kord kuue, seitsme või kaheksa nädala jooksul) saadeti iga töötaja nädalaks omaette tillukesse tuppa, kus tema ainsaks ülesandeks oli istuda ja mõelda. Nädala lõppedes ei küsinud temalt keegi: „Noh, ja mida sa siis välja haudusid?“, sest juba sellise küsimuse ootamine võib hävitada kalduvuse järelemõtlemisele. Igaühelt nõuti vaid täielikku väljalülitumist rutiinsest tööst. See-eest võis ta aresti alt väljudes nõuda nii abilisi kui ka ruume, et kontrollida ideid, kui neid oli tekkinud. Tuleb rõhutada (nende juhtide jaoks, kes soovivad seda enda juures rakendada), et inimesse, kes terve nädala veetis, jalad laual koomikseid lugedes, suhtusid meie ülemused samasuguse austusega, kui sellesse, kes vabadusse saades soovitas teha kuus katset ja formuleerida uuesti termodünaamika teine seadus. Muidu poleks ideel mõtet.“

Probleemi teadvustamine

alustab loominguilise töö. Üldiselt, mida vähem probleemist (objektist, projektist) teatakse seda lihtsam see tundub. „See on ju lihtne,“ ütleb inimene, kes asja tundmata tahab näidata, et on asjatundja. Ta nimelt ei tea, et ühelgi tõelisel probleemil pole ühest ega lõplikku lahendust. Ta ei tea *Smithi* seadust *Murphi* seaduste kogust.

Mida sügavamale probleemi üksikasjadesse tungitakse, seda keerulisemaks kõik muutub. Enamasti nihkub lahendus üha kaugemale. Tuntumad näited, mis algusest peale on lubanud uut ja helget tulevikku, on:

- termotuumaprotsess ehk fusioon-energeetika, millest juba üle poole sajandi loodetakse uut energiaallikat, kuid mis vaatamata panustatud rahasse ja vaimujõusse pole lahendusele viinud
- imetajate, sh inimese kloonimine, protsess, mille võimalikkus uute faktide ilmumisel üha küsitavamaks muutub

Käesoleva hetkel (2013) kuulub näidete hulka *Higgsi bosoni* otsimine.

Seega, tutvunud lähteandmetega, võimaliku allikmaterjaliga, visandanud tegevuskava ja järele mõelnud, võib endale tunnistada, et oled küps probleemi lahendamiseks. See on **probleemi tunnustamine**. Kindlasti tuleb selles staadiumis kogu lähtematerjal korrastada, mõneti vormistada ja paljud asjad uuesti sõnastada. See oleks **probleemi viimistlemine**.

⁷⁷ Ei või iial teada (*never say never*)

⁷⁸ *Физики продолжают шутить, 1968, Мир, Москва, 147...151, viitega Discovery, June, 259, 1959.*

3.1.3. Tegevuskava koostamine

Esmalt formuleeritakse töö eesmärk.

Eesmärk

on see, mille nimel tööd tehakse, milleni tahetakse lõpuks jõuda. Mõnikord, peamiselt tellitud tööde puhul ja eriti, kui tellija on ülesande põhjalikult kavandanud, nähtub eesmärk juba teemast ⁷⁹.

Eesmärgiks võib olla näiteks:

- uus tehniline lahendus,
- tuntud tehnilise lahenduse uus kasutusmoodus või -ala,
- uue geoloogilise objekti kirjeldus,
- protsessi reglement, tehniline skeem, juhend, lahendustele viiv soovitude kogum või mõni muu normatiivdokument,
- teoreetiliste seisukohtade uute järeldesteni viiv mudel.

Eesmärgiks ei saa seada probleemi käsitlemist, ükskõik, kui tähtis ka probleem oleks või näiks ⁸⁰.

Ülikooli kursuse-, lõpu-, magistri- ja doktoritöö koostamine ei ole eesmärk, eesmärk on kursus või kool lõpetada

Töö eesmärgi võib püstitada nii, et seatakse

tööhüpotees,

see tähendab, sõnastatakse, ükskõik, kas verbaalselt või matemaatiliselt see, mida tahetakse tõestada või ümber lükata.

Tööhüpoteesi võib püstitada kas ainsa oletusena või siis alternatiivide valikuna. Näiteks kui maavarageoloog üritab tõestada, et uuritav lasund on maavara ja uuringu tulemusel tekib maardla, siis seni kuni tulemus pole aktsepteeritud, on see vaid tema üks ja ainus tööhüpotees.

Teine lähenemisviis käsitleb (teineteist välistavaid) alternatiive. Ühe ja sama geoloogilise objekti uurimisel oleksid need:

- lasund on kaevandamisväärne ehk saab määrata tarbevaru ja tekitada aktiivse varuga maardla,
- lasund ei ole kaevandamisväärne ehk tuleb läheb kirja kui passiivse reservvaruga maardla või olemasoleva maardla osa,
- lasundi puhul ei saa olla juttugi kaevandamisest, näiteks uuringu tulemusel selguva keskkonnakahjustusi tekitava kaevandamismõju tõttu.

Kõik tööhüpoteesid tuleb ükskõik tõestada. Kahjuks enamikul juhtudest seda ei tehta, sest ühe/ainsa tööhüpoteesiga on kergem töötada. Kuid, kui see ei pea paika ehk kui hüpoteesi ei saa tõestada, näib tegu läbikukkumisena. Eriti kui tööhüpoteesiks seati eesmärk. Ja isegi juhul, kui ainus hüpotees saab tõestatud, võib tekkida raskusi, kui arukad vastased (maavara puhul – keskkonnakaitsjad ja kohalikud elanikud) pakuvad välja alternatiive, mida pole käsitletud.

Mitme tööhüpoteesiga on tööd rohkem, sest isegi, kui nad on alternatiivsed, jääb nende vahele alati määramatu, nn „hall tsoon” ⁸¹. Hall tsoon kui väljund kõlab tavaliselt uuringu vastaste, kuid ka läbi kukkunud uuringu autorite väidetena:

- seda või teist aspekti on vaja edasi uurida,
- võimalikud on veel teisedki lahendused (mida te pole uurinud),
- seda käesolevas töös ei käsitletud jms.

⁷⁹ Kui uuringu tellijaga on hea tööeelne suhe, tuleb teema ja eesmärgi ühildamisele kasuks uurimistöo meetodiliste ja laboratoorsete võimaluste ja erisuste tutvustamine läbirääkimiste käigus

⁸⁰ Eriti halb on, kui ei tehta vahet eesmärgil ja protsessil – nauditakse protsessi ning unustatakse eesmärk

⁸¹ Monoteistlikus kultuuris on probleemil, kas Jumal on olemas, kaks tööhüpoteesi: ON ja EI OLE. Kumbagi pole tõestatud ja seda võib käsitleda kui kolmandat olekut. See on kirjas nii Vanas Testamendis kui ka Koraanis – JUMAL ON TUNNETAMATU.

Hüpoteeside tõestamisest möödahiilimise elegantne ja teaduslik võte on püstitada

vastandhüpotees.

Sel juhul seatakse töö eesmärgiks hüpoteesile vastupidise väite kummutamine, selle kehtetuse tõestamine. Enamasti siiski vastandhüpoteesi kummutada ei õnnestu ja selle asemel määratakse tema vähene usaldatavus. Vastandhüpoteesi kasutatakse tihti just suure määratusega objektide puhul. Tuues näiteks maavara uuringu, kohtame järgmisi vastandhüpoteese:

- maardlas ei ole võimalik kaevandada,
- ei ole teada, millised on kaevandamise tagajärjed jms.

„Ei tea” tüüpi argumentatsiooni kasutavad nappide teadmistega oponendid. Mäendus on nendeks ühekülgse loodusteadusliku haridusega keskkonnakaitsjad. Sestap on „me ei tea” -tüüpi väited võetavad kui **teadmatus põhine argumentatsioon**, sest valdavalt on vastuväidete aluseks just oponentide puudulikud või väärastunud teadmised.

Vastandhüpoteese kummutavad peamiselt ohutusanalüütikud. Üldtuntud **ohutusseisundid** on riiklik iseseisvus, majanduslik ja poliitiline turvalisus, keskkonna puhtus, säästlik areng jms. Ohutuse vastand on risk ja oht ning need lubavad formuleerida vastandhüpoteese, mis on: ründe-, katastroofi-, pankroti-, terrori-, vandalismi-, maavärina-, meteoriidi-, vulkaanipurske oht jne. Nende paikapidavuse ning tõenäosuse hindamine on vastava ala spetsialistide ja ametkondade töö eesmärk.

Riske hinnatakse selleks, et sünteesida **minimaks strateegia**, mille eesmärgiks on tegutseda nii, et maksimaalne risk ehk kahju oleks minimaalne.

3.1.4. Uurimisülesanded

Tööhüpoteesidest peaksid tulenema töö ülesanded, mis näitavad, mida tuleb teha probleemi lahendamiseks, hüpoteesi tõestamiseks ja eesmärgi saavutamiseks. Ülesanded peavad olema konkreetsed, reaalselt teostatavad, võimalikult uudsed ja olulised.

Uurimisülesanne määrab sageli ka tunnused (parameetrid), mida on vaja fikseerida ja analüüsida. Siit omakorda tuleneb konkreetsete uurimismeetodite ja -vahendite (mõõdikud, tarvikud, arvutid, programmid, ankeedid jne) aga samuti analüütiliste protseduuride vajadus.

Paljudel juhtudel koostatakse just selles staadiumis juriidilised ja normatiivsed dokumendid nagu lepingud, meetodika ja ajakava, juhendid jne. Selles staadiumis algab vajalike seadmete hankeprotsess.

3.1.5. Metoodika ja ajakava

Metoodika

on meie mõistes formaliseeritud tegevusjuhend, milles on kokku võetud kõik eelmistes punktides kirjeldatu ja millega fikseeritakse töö, uuringu, projekti teostamise põhimõtteline kulg.

Siiski, mistahes projekti ja töö puhul metoodikat ei koostata. Tunnustatud inseneribüroos ja/või laboratooriumis, kus projekteerimine, testimine, konstrueerimine jm selline töö on rutiinne, asendab metoodikat kvaliteedikäsiraamat või mõni analoogiline dokument. Suure kogemusega inseneriettevõttes võib metoodikat asendada ja toetada (hea) tava.

Teadusuuringu puhul, kuna töötatakse uudse probleemi kallal, on metoodika hädavajalik.

Metoodikas jaotatakse töö etappideks, näiteks, sõltuvalt töö iseloomust: välitöö, katsetöö, teoreetiline analüüs, korduskatsed, pilootseadme ehitamine, analüüs, korduskatsed, ..., vahetulemuste aprobeerimine (kolleegidele ja tellijale tutvustamine) jms

Metoodika lahutamatu osa on ajakava ehk kalenderplaan. Ajakava tuleb koostada isegi siis, kui töö on rutiinne, tavapärane ega nõua metoodikat. Ajakavas, sõltumata sellest, kas formaalne metoodika on koostatud või ei ole, nähakse ette uuringuetappide teostamise ajavahemikud. Peale selle ja ilmtingimata plaanitakse juurde tavapäraste tööde, nagu aruande, seletuskirja ja jooniste koostamise, esitlusmaterjali kujundamise, vormistamise, trükkimise (plottimise, tiražeerimise...) artikli kirjutamise jms aeg ⁸².

⁸² Võidakse küsida, milleks analüüsi käsitlevas osas selline teadusbürokraatia. Aga selleks, et analüütik/teoreetik teaks, kui palju aega ja vaeva nõuab tema töö tasustamist tagav tulemuste turustamine.

Akadeemilise tava kohaselt tutvustatakse meetodikat avalikult laiemale ringile ja kinnitatakse (teadus)nõukogu otsusega.

Info kogumine ja hoidmine

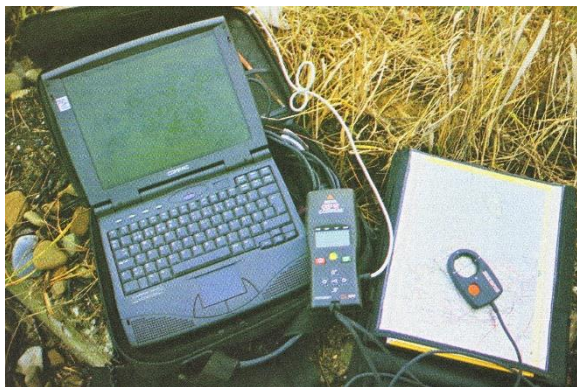
on käesoleva punkti mõistes alanud töö esimene etapp – meetodikaga ette nähtud mõõtmised, katsed, anketeerimine jms. Geotehnoloogilise info kogumise eriline vorm on välitöö. Info kogumisel pikemalt peatumata panen kirja olulise reegli:

Nii vähene, kui ka liigne info pole hea

Miks info vähesus on halb, peaks olema selge. Kogemus näitab, et pahatihti ilmneb infovähesus alles pärast katse lõppu. Nii mõnigi kord pärast objekti hävimist katse käigus. Infovaegus ilmneb pea alati ka pärast välitöölt naasmist. Mis on eriti halb, kui välimõõtmised on võimalikud vaid mõnel kindlal aastaajal. Sellest ka välitöö kuldreegel:

Mõõda kõike, mida mõõta annab, sest ei või iial teada, mida hiljem vaja läheb

mis sellest, et nii tekib **info**, mis pole siiski sama, mis **liigne info**.



Kasutades digitaalsalvestustehnikat – foto-, video- ja helisalvestusaparatuuri, on välitööl üsna lihtne tekitada üldiselt kasulik info, mis tihti on hiljem kasuks tulnud mõõtmistulemuste ajastamisel, sidumisel ja täpsustamisel.

Pilt 3.1 Sülearvuti, sellega seotud GPS-seade ja digiplanšett kunagisel välitöö.

Liigne info on nobe tekkima, kui uurimisrühmas on inimesi, kelle huvidega uuring kattub. Siis üritatakse rahuldada oma (teaduslikku) uudishimu projekti arvelt. Üldiselt ei ole see teaduse jaoks halb, kuid üksikjuhul võib see hajutada tähelepanu, hägustada eesmärgile viivaid teid ja kulutada aega ja raha. Siin tuleb projekti juhil leida optimaalne tee.

On veel teist laadi liigset infot. Seda kultiveerivad paljuteadvad, erudeeritud isikud. Teadus- ja inseneritegevuses kohtab igal nõupidamisel neid, kes kordavad: „Seda ei saa (pole mõtet) teha, sest...(järgnevad üsna asjalikud põhjendused)”. Kuigi sellise suhtumise taga võib olla laiskus, soovimatus jagada oma teadmisi, mõnikord ka oma küündimatuse (ala)teadlik tunnetamine, on enamikel juhtudel siiski põhjuseks liigne dogmaatiline teave. See on üsna tavaline nähtus. Kaasaegsed füüsikud tsiteeriva mõnuga korüfeede sada aastat vana seisukohta, et füüsika on ennast ammendanud, selles pole enam mitte midagi teha. Selline suhtumine, kui see tuleb juhendajalt, võib lüüa loovuse ⁸³. Praeguse kontekstis tuleb hoiatada, et liigne info võib pärssida uue info kogumist – uusi katseid, uusi mõõtmisi.

Alates esimesest etapist peab igal tegijal olema uuringu- ehk tööpäevik, kuhu tuleb päevade kaupa kanda kõik tehtu. Kuigi klassikaline metodoloogia soovib kasutada köidetud kaustikut, kuhu märgete kõrvale jäetakse piisavalt ruumi hilisemate täienduste ja kommentaaride jaoks, kasutatakse viimasel ajal ka nn kiirkõitjat, kuhu on hõlpsam kogunevat materjali lisada. Moodne on elektrooniline päevik. Kahjuks on uuringupäeviku moodsatel vormidel kasutamisel suur oht, et andmed ja kronoloogia hävivad. Samuti ei õpeta moodne andmesäilitus meetodilise töö võtteid.

Teaduse ajaloost on palju näiteid, kuidas ammused uuringupäevikud on andnud uut informatsiooni

⁸³ Sellistele juhendajate ja projektijuhtide juurde jäävad just põhjalike teadmistega, nn head õpilased. Nood teavad kuidas „on vaja” ja väldivad tabuallasid, mida „ei ole mõtet teha”. Jaapani ja Hiina kultuur tugineb põhjalikel teadmistel, seepärast ei soodusta sealne keskkond esiletungivat originaalsust. Küll aga on idast tulnud õpilased teinud suuri tegusid läänemaades tänu töökuusele ja kahtlemata ka sellele, et sattusid keskkonda, kus paljudest nende teadmistest polnud enam kasu.

Õpetlik lugu pealiskaudsest välitööst

Kuulsin seda lugu kuuskümmend aastat tagasi. Kaupmehe õpipoiss päris peremehelt, millal ta võiks hakata palka saama. Teatavasti sai õpipoiss ainult süüa, peavarju ja riided selga. Peremees vastas, et eks siis, kui poiss juba midagi oskab. „Ma ju midagi ikka oskan,“ julges poiss vastu öelda. „No eks me vaata,“ porises kaupmees, vaatas tänavale ja näitas: „Näed, vana Saueaugu Rein läheb hobusega ja midagi on tal vankris. Jookse vaata, ehk on tal miskit meile müüa.“ Poiss hüppas välja, tormas tagasi ja hõiskas peremehele: „Kartulid! Reinul on koormas kartulid!“ „Kui palju?“ küsis peremees. „Ma ei vaadanud, aga ma kohe!“ vastas poiss ja lippas tänavale. Kohe oli ka tagasi ja teatas: „Neli vakast kotti!“ „Ja mis ta neist tahtis?“ küsis kaupmees. „Seda, et... ma ei küsinud,“ kokutas poiss, „aga ma kohe. Rein pole veel kaugel.“ Ja läks. Veidi aja pärast oli poiss tagasi. „Rubla vakast...“ lõõtsutas poiss. Aga peremees ei olnud ikka veel rahul: „Kas kartulid olid ka seda väärt? Et kas suured ja puhtad ja mis sort, seda peaks ikka ka teadma.“ Poiss pani jooksuga Reinule järele. Nüüd läks juba rohkem aega, enne kui ta tagasi lõntsis ja nutuselt seletas: „Rein oli juba Kalle Kusta poe hoovis ja pani seal kotte maha. Vana Kusta tõmbas mulle luuavarrega...“ „No näed siis,“ muigas peremees, „Aga pole viga, ehk sell teab, mis Reinul oli. Tõnis! Tule siia!“ Sell astus sisse: „Jah, peremees!“ Kaupmees küsis: „Nägid, Saueaugu Rein läks kartulitega mööda, panid tähele?“ „Ikka, peremees! Tal oli vankris neli vakka väikeverevaid. Küsis rubla kotist. Vaatasin - mullased. Ei hakanud isegi hinda alla tingima, meil neid veel pool vakka keldris, võtad juurde, tohletavad kätte ära.“ „Vaata nii...“ ütles kaupmees õpipoisile.

3.2. Analüüsi meetodid

3.2.1. Andmete töötlemise põhitõed

Eelmiste punktide loomuliku jätkuna käsitleme, kuidas kogutud teabe abil kontrollida püstitatud hüpoteese. Inseneri- ja teadustöös kasutatavaid andmetöötlusmeetodeid on rohkesti ja nende arv kasvab. Üldiselt jaotuvad

uurimismeetodid

- empiirilise-teoreetilisteks (vaatlemine, mõõtmine, katsetamine...) ja
- loogilise-teoreetilisteks (statistiline analüüsimine, võrdlemine, modelleerimine, prognoosimine, sh intra- ja ekstrapoleerimine).

Andmete töötlemise eesmärk

on:

- tulenevalt uurimisülesandest üldistada saadud faktilist materjali,
- saada võimalikult palju teavet tulemustest ja nende omavahelistest seostest,
- määrata leitud seoste vorm ja usaldatavus,
- teha tööhüpoteesi paikapidavuse esmane kontroll või näidata selle mittevastavust tegelikkusele.

Analoogide kopeerimine ei ole andmete töötlemine⁸⁴

Bakalaureusetöös valdavad tavapäraselt empiirilise-teoreetilised meetodid. Loogilise-teoreetilised meetodid rakenduvad kas töö üldistavas staadiumis või kõrgema taseme uuringutes ehk magistri- ja doktoritöös. Millist meetodit kasutada ühe või teise ülesande lahendamisel, oleneb eeskätt käsitletavast küsimusest ja selle lahendamiseks leiduvast informatsioonist.

Geotehnoloogia objekt on looduslik ja seepärast üsna hägune. Sestap ongi mäenduses andmestiku analüüsimisel levinud mitmesugused matemaatilise statistika meetodid, matemaatiline modelleerimine jms. Tavalised on tabelarvutuse, näiteks *Exceli* baasil tehtud regressiooni, korrelatsiooni ja variatsiooni analüüsid.

Analüüsi esmane eesmärk

on tulemuste tõlgendamine, lahti mõtestamine. Analüüsi käigus tuleks samm-sammult leida võimalikult veenev seletus:

- mida mõõtmistulemused tegelikult näitavad,
- kas tulemused on usaldusväärsed, arvestades võimalikke lähteandmete, meetodika ja mõõtmise viga,

⁸⁴ Levinud kui *copy-paste* meetod ja tuntud kui plagieerimine

- mil määral on saadud tulemused kooskõlas varem teada olevaga, varasemate uurimuste tulemustega,
- mil määral on tulemused vastuolus varasematega ja millest see võiks olla tingitud,
- kas tööhüpotees / vastandhüpotees leidis kinnitust või mitte; õigemini, kui suur on selle usaldatavus,
- milles seisneb sedastatud faktide uudsus ja väärtus,
- milliseid järeldusi tuleks teha?

Uuringuala hindamine ⁸⁵

Hüpoteeside püstitamisel ja/või nende kontrollimisel tuleb kindlasti endale ette kujutada, kuidas uuritav objekt käitaks väljaspool mõõdetavat (modelleeritavat) ala, piirkonda, teisisõnu – rajade taga. Näiteks, mõõtes üheaegselt kahte tunnust, millest üks (mõjur, argument, x) mõjutab protsessi kulgu ja teine (tulem, funktsioon, y) on protsessi väljund, on kasulik teada, kuidas protsess käitaks piirtingimustes $x = 0$; $x = \infty$. Parim võimalus seda teada saada oleks laiendada mõjuri muutumisala. Praktikas ei ole see aga enamasti lihtne. Uurides mõnd masinat või seadet, on eksperimentaator pandud raamidesse, sest mõjuri väga suur hälve võib objekti rikkuda, läbi põletada, panna plahvatama. Maailma tuntuim näide on katastroof *Tšornobõli* tuumajaamas, mis sai alguse liiga julgust katsetamisest.

Üks võimalustest objekti üldisema käitumise uurimiseks on

teoreetiline mudel.

Kõige lihtsam oleks esmalt üritada protsessi kirjeldada (diferentsiaal)võrrandiga või võrrandite süsteemiga ning leida nii katse- kui ka piirtingimuste jaoks selle lahendid. Teadustöö kogemustega inimesed aga teavad, et lihtsad, nn esimese lähenduse mudelid ei ole kunagi täpsed ja mida keerukamaks mudel arendada, seda kaugemale lükkub lahendus.

Näiteks üks lihtsamaid, nn kasvu~kahanemise mudel lähtub eeldusest, et muutumise kiirus (intensiivsus) on võrdeline saavutatud tasemega

$$dy / dx = b y,$$

kus b on intensiivsuskordaja. Võrrandi lahend on elementaarfunktsioon

$$y = \exp (b x)$$

mis $b > 0$ puhul kasvab piiramatult ja $b < 0$ puhul läheneb nullile.

Kõik optimistlikud majandusprognoosid lähtuvad just eelpoolmainitud mudelist – mida kõrgemale tasemele jõuame, seda edukamalt edasi areneme ($b > 0$). Kuid tegelikkus seab piirid ja kõik piiramatut kasvu hüpoteesid on kummutatud ⁸⁶. Seepärast võib palju tõepärasemale tulemusele jõuda, kui käsitleda funktsiooni vahemikus $A < 0 < B$ ja konstrueerida mudel

$$dy / dx = b y (1 - y / B) + A,$$

kus A ja B on vastavalt alg- ning lõpptasand. Lahendiks on juba varasemas kasutust leidnud logistiline funktsioon

$$y = B / (1 + \exp (b - ax)) + A$$

mis kirjeldab protsessi, mis lähtub (alg)tasandilt A , toimub algul kiirenevat, kuid hiljem, lähenedes (lõpp)tasandile B aeglustub kuni kasvu seiskumiseni. Funktsioon sobib maardlate ammendamise kirjeldamiseks, muu hulgas ka väljatava varu (B) prognoosimiseks kaevandamise käigus.

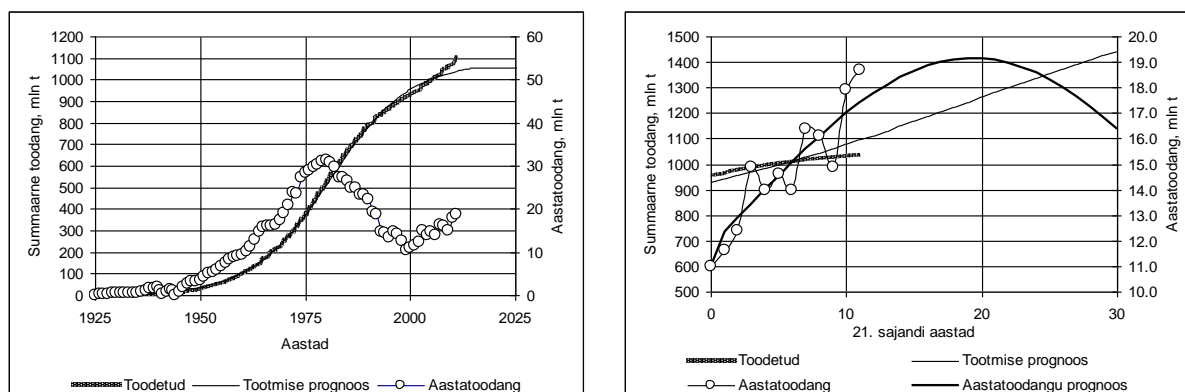
Näiteks Eesti põlevkivimaardlast kaevandatud põlevkivi mahtu saab kirjeldada valemiga

$$T = 1082 / (1 + \exp (4,36 - 0,107(t - 1940))),$$

⁸⁵ Ei ole mõeldud geoloogilise uuringu ala

⁸⁶ Üks Eesti poliitikute tuntumaid hüpoteese on "viieteistkümne aastaga viie rikkama riigi hulka..."

kus T on summaarne, tegevusaja jooksul müüdud põlevkivi kogus ja t aasta. Mudeli aluseks on II maailmasõja järgne periood ja argumendiks $x = t - 1940$ ⁸⁷. Seda arengumudelit kirjeldavad Pilt 3.2, vasakpoolsed graafikud, kus logistilise funktsiooni esimene tuletisena on pildil aastatoodangu graafik.



Pilt 3.2 Põlevkivi summaarse ja aastase toodangu graafikud prognoosidega

Vasakul mudel baasiga 1940...2011, paremal – baasiga 2000...2011 aastat.

Esimese mudeli kohaselt, kui baasiks oli toodangumaht pärast II maailmasõda, saanuks Eesti põlevkivimaardlast kaevandamise lõpetamiseni 1082 mln t põlevkivi. Tegelikult ületati see maht juba 2011. a, mis näitab, et põlevkivitööstuses on toimunud oluline muutus. Seepärast sai koostatud mudel, mis baseerub 21. saj toodangunäitajatel, kujuga:

$$T = 1021 / (1 + \exp(1,41 - 0,75(t - 2000))) + 730,$$

Selle mudeli kohasel toodetakse kaevandamise lõpetamiseni $1021 + 730 = 1751$ mln t põlevkivi. Aastatoodang jõuab maksimumini (20 mln t) 2020. a ja hakkab seejärel langema.

3.2.2. Lihtsad mudelid

Lineaarne mudel

on kõige lihtsam, et mitte öelda primitiivne. Lineaarne mudel ja trend iseloomustavad küll funktsiooni (y) kasvu ($a > 0$) või kahanemist ($a < 0$) argumendi (x) kasvades, kuid kasv on konstantne argumendi igas piirkonnas. Lineaarset mudelit on lihtne ette kujutada, joonestada ja tavaprogrammide abil välja arvutada. Kuid vähe on objekte, mille käitumise (väljundi) kirjeldamiseks vähegi laiemas piirkonnas lineaarne funktsioon sobib.

Seepärast sobib lineaarse mudeli puhul esitada mõningaid

küsimusi enesekontrolliks

- Kas funktsioon jätkab kasvu sama tempoga argumendi pideval suurenemisel? Näiteks – kui imik võtab ööpäevas juurde 100 g, kui palju ta siis kaalub 20 aastaseks?
- Kas funktsioon (objekti väljund) võib muutuda negatiivseks? Näiteks – kui ma kuu ajaga võtsin kaalust maha 5 kilo ja jätkan samas vaimus, kas siis kahe aasta pärast olen $5 \times 24 = 120$ kilogrammi võrra kergem?
- Kas objekt on kirjeldatav argumendi negatiivsetel väärtustel? Näiteks – kui ma 20 aastaseks saan ära juua pool liitrit viina, 30 aastaseks sama koguse vaid kahe peale, siis võimalik, et 40 aastaseks ma enam üldse suudan juua. Aga mida ma suudan 50 aastaseks?
- Või näiteks – tudengitena (1957) arutasime, kui madala välistemperatuuri juures peab mees kandma pikki aluspükse. Tuletasime valemi

$$\text{välistemperatuur } \tau = \text{vanus aastates} - 40 \text{ } ^\circ\text{C},$$

mis lahtiseletatuna tähendab, et 20 aastane mees peab pikad aluspüksid jalga tõmbama kui välistemperatuur on $20 - 40 = -20$ °C ja kolmekümneaastane, kui õues on -10 °C. Edasi arutasime, et neljakümneselt peaks piki aluspükse kandma juba 0-kraadi juures, mis tundus naljakas.

⁸⁷ Mudelites, kus argumendiks on aeg, pole soovitatav, mugav ja tihti ka võimalik kasutada tavalise ajaarvamise aastanumbreid

Mõttekäigu arendamine suuremate vanuste suunas ajas meid toona naerma. Praegu enam mitte nii väga.

Lineaarset mudelit saab muuta paindlikumaks. Lihtne on teha

pöördlineaarne mudel

$$y = a / x + b$$

mis on tavaprogrammide abil sama hõlpsalt töödeldav kui lineaarne. Vaja on vaid argument (x) asendada pöördväärtusega ($1 / x$).

Kui lineaarne mudel kirjeldab püsivat kasvu või kahanemist, siis pöördlineaarne mudel kirjeldab funktsiooni (y) alanemist lõpmatult kõrguselt (lõpp)tasandile (b) argumenti vahemikus $0 < x < \infty$.

EkspONENTMudel

on tuntud ka kui varem mainitud kasvu-kahanemise mudel, tavaliselt kujul

$$y = a \exp(b x)$$

Kasv / kahanemine algab kohalt, kus argument $x = 0$, see tähendab väärtuselt $y = a$. Kuid kasv ja kahanemine käituvad erinevalt. Kui muutumise intensiivsust iseloomustav kordaja $b < 0$, siis argumenti kasvades väljund (funktsioon) läheneb nullile, kuid ei saa sellega iialgi võrdseks. Sel juhul on tegu hääbumise, väljasuremise mudeliga. Kui $b > 0$, siis argumenti kasvades funktsioon kasvab üha kiirenevalt ja tegu on nn piiramatul kasvu mudeliga.

Kasvu kirjeldamiseks sobib eksponentmudel ainult seni, kuni juurdekasv on võrdeline objekti väljundiga. Nii näiteks võib eksponentfunktsiooniga kirjeldada sellise ettevõtte lühiajalist tegevust, kuhu investeeritakse võrdeliselt müügi mahuga ja kus müük kasvab tänu investeringutele. Reaalses äris selline tegevus ei saa kaua kesta, sest müüki piirab turg. Ebarealistlike piiramatul kasvu mudelite näideteks ajaloost on NSVL möödunud sajandi kuuekümnendate aastate ultraoptimistlikud majandusprognosid ($b > 0$). Nendele sekundeerisid samal ajal tehtud Rooma Klubi pessimistlikud globaalse katastroofihoiatused ($b < 0$).

EkspONENTfunktsiooni saab täiendada, lisades võrrandisse konstandi c .

$$y = a \exp(b x) + c$$

Kui kahanev ($b < 0$) eksponentfunktsioon läheneb nullile, siis see funktsioon läheneb argumenti kasvades konstandile c .

Astmemudel

on paindlik ja sobib seetõttu paljude protsesside kirjeldamiseks. Alati, kui argument $x > 0$ on funktsioon $y > 0$ ja kui $x = 1$ siis $y = a$. Kasvu ja kahanemist juhib kordaja b . Kui $b > 0$, siis funktsioon kasvab ja juhtudel $b < 0$ ta kahaneb. Astmefunktsiooni eriline omadus on, et b näitab, mitu protsenti kasvab või kahaneb funktsioon argumenti üheprotsendilise kasvu puhul. Seepärast kasutatakse teda majandusanalüüsid ja -mudelites nn tootmisfunktsioonidena. Majandusanalüüside üks tuntumaid on nn *Nelsoni* seadus, loodud keemiatööstuse seadmete maksumuse ligikaudseks hindamiseks:

$$C = a T^{0,6}$$

mille kohaselt 1 % võrra võimsama (T) reaktori kapitalikulu (C) on 0,6 % võrra eelmisest suurem. Analoogilisi seoseid kasutatakse massiliselt.

Ka astmefunktsiooni saab täiendada. Näiteks

$$y = a x^b + c$$

saame mudeli, mis argumenti kasvades ei lähene nullile vaid väärtusele c .

Küsimusi enesekontrolliks

- Nüüd, teades ka teisi mudeleid peale lineaarse, võiks teha varem esitatud küsimusi keerukamaks:
- Kui ma kuu ajaga võtsin kaalust maha 5 kilo ja jätkan samas vaimus, kas mu kehakaal väheneb eksponent- või astmemudeli kohaselt?

- Kui imik võtab ööpäevas juurde 100 g, kas siis tema kaalu kasvu kirjeldab eksponent- või astmemudel?
- Kas alanev suutlikkus viina juua või välistemperatuuri taluda on kirjeldatav eksponent- või astmemudeliga? Abistav vihje – milline oli minu alkoholisuutlikkus sünnimomendil, 0-aastasena.
- Ja veel: 16. aprillil 2007. a laskis Virginia tehnoloogiaülikooli tudeng maha 33 kaasüliõpilast. Kohe järgmisel päeval hukkus Egiptuses koolibussi katastroofis 16 koolilast. Hukkunute erines kaks korda. Kas ka ajakirjanduse ning üldsuse huvi taseme, nende sündmuste kajastamise, tähistamise, kommenteerimise mahu vahe (ülemaailmses mastaabis) oli kahekordne? Kui ei, siis mis vahemikus on astmenäitaja? Viimasele küsimusele aitab leida vastust järgnev tabel.

3.2.3. Lihtsate mudelite lihtsad graafikud

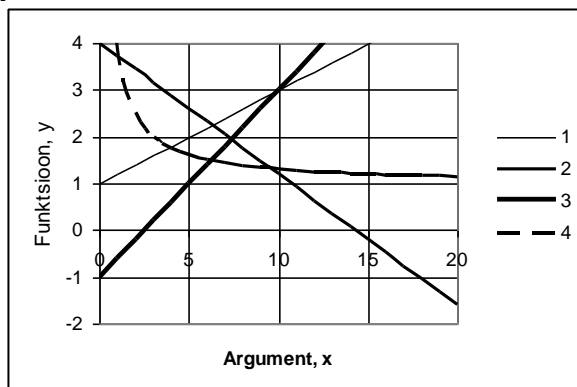
Lineaarne mudel (1, 2 ja 3)

$$y = a x + b$$

Pöördlineaarne mudel (4)

$$y = a / x + b$$

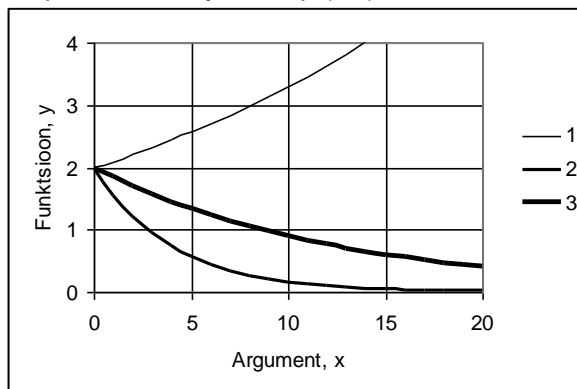
nr	a	b
1	0,2	1
2	-0,3	4
3	0,4	-1
4	3	1



Pilt 3.3 Lineaarse mudeli graafikud

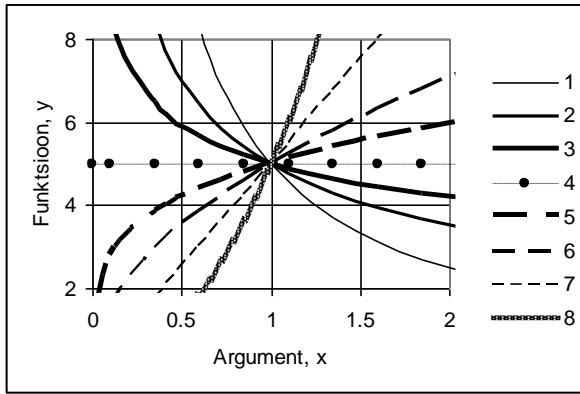
EkspONENTMudel $y = a \exp(b x)$

nr	a	b
1	2	0,05
2	2	-0,25
3	2	-0,08



Pilt 3.4 EkspONENTmudeli graafikud

Astmemudel $y = a x^b$



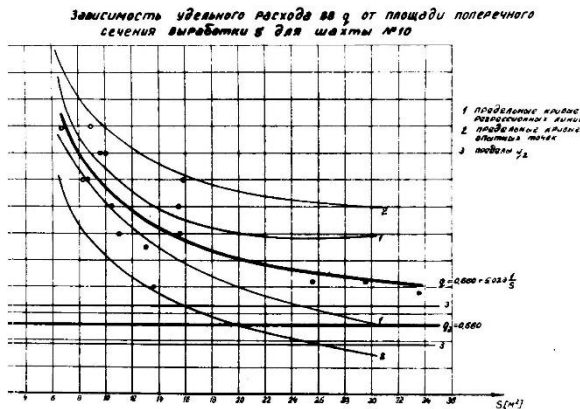
nr	a	b
1	5	-1
2	5	-0,5
3	5	-0,25
4	5	0
5	5	0,25
6	5	0,5
7	5	1
8	5	2

Pilt 3.5 Astmemudeli graafikud

3.2.4. Näiteid mudelite kasutamisest

Pöördlineaarne mudel – lõhkeaine erikulu

A

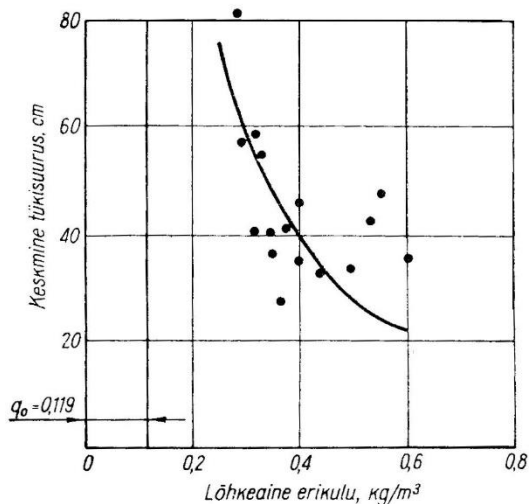


Kõrval joonisel (graafik A) on põlevkivi allmaakaevandajatele tuntud lõhkeaine erikulu sõltuvus kaeveõone ristlõike pindalast, sellisena nagu ma ta 1968. a mõõtmistulemuste alusel väljatöötatuna esitasin ja vastavalt võimalustele vormistasin:

$$q = 5 / S + 0,75, \text{ kg/m}^3.$$

Siin q on lõhkeaine erikulu ja S kaeveõone ristlõike pindala, m^2 . Tegu on pöördlineaarse funktsiooniga, mis eelpool oli kujul $y = a / x + b$.

B



Selle valemi $b = 0,75 \text{ kg/m}^3$ on tollaegse lõhkeaine minimaalne erikulu igalt poolt vaba pinnaga ümbritsetud kivimi(tüki) lõhkamisel. Pildil on erikuju graafikul ja konstanti b kirjeldaval sirgel usalduspiirid üleval ja all.

Pöördlineaarset mudelit saab teisendada ka selliseks, et funktsiooni kahanemine lõpmatuses ei hakka mitte kohalt ($x = 0$) vaid nihutatud kohalt ($x = z$)

$$y = a / (x - z) + b$$

Näiteks põlevkivikarjäärides katendi lõhkamisel tekkinud kaevisse keskmise tükisuuruse sõltuvus lõhkeaine erikulust (graafik B)

$$x = 10,7 / (q - q_0), \text{ cm}$$

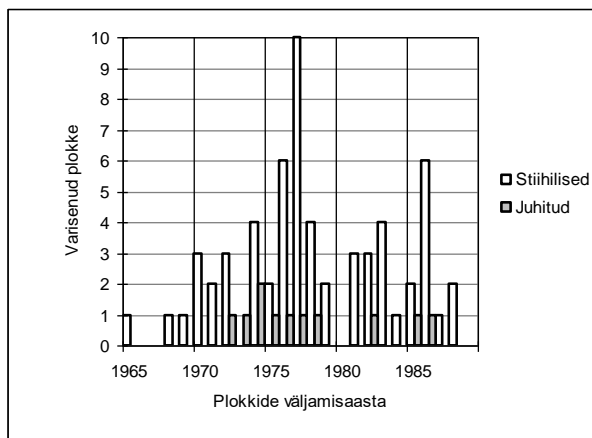
kus x on keskmine tükisuurus, cm ja $q_0 = 0,119 \text{ kg/m}^3$ on selline lõhkeaine erikulu, mille puhul kivim ei tükeldu.

Pilt 3.6 Näiteid mäendusanalüüsi ajaloost – katsetulemuste kirjeldamine lihtsate matemaatiliste mudelitega

Need valemid tuginevad katsetöödel andmestiku alusel. Kaasajal, seoses uute lõhkematerjalide ja meetodite kasutuselevõtuga on valemi kordajate arvvaartused teised, kuid füüsikalist protsessi kirjeldav mudeli kuju on sama.

Neli mudelit kambriplokkide varingu ennustamiseks

Eesti põlevkivimaardla kamberkaevandamisega käideldud alal on tuvastatud 62 kambriploki stiihilist varingut ja 11 juhitud langetamisjuhtu⁸⁸. Küsimustele, kui kaua läheb aega, et kambriplokk variseks ja millest see aeg sõltub, ei ole ühest vastust. Üldiselt ei sõltu kambriploki iga kaevandamise sügavusest, sest maad hoidvad tervikud arvutatakse vastavalt lasumi paksusele. Küll aga võimaldas andmestiku graafiline analüüs (järgmine pilt) kirjeldada varisenud kambriplokkide tekkimise (väljamise) aja jaotust.



Pilt 3.7 Varisenud kambriplokkide väljamisaja jaotus

Graafikult paistab, et varisenud plokkide väljamisaeg koondub eelmise sajandi seitsmekümnendate aastate teise poole ja kaheksakümnendate keskele. Varisemisohtlike plokkide tekkis tollal seepärast, et nõuti maavara kao vähendamist. Sel eesmärgil katsetati kambriplokkide lae langetamise tehnoloogiat ja tervikuid pisendati. Hiljem, kui levisid varingutekkelised lohud, tekkis maa langetamisele tugev vastuseis ja kaevandajad hakkasid tervikuid jällegi suurendama. Alates kaheksakümnendate keskpaigast, kui keskkonnakaitset ja põllu- ning metsamajandust tähtsustav hoiak muutus poliitiliseks, sai valdavaks kaevandamine suurte tervikutega, ja varingud muutusid harvaks.

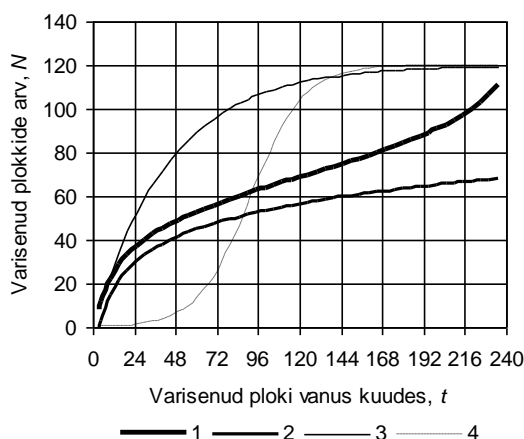
Kahjuks pole teada, kui paljudes plokkides omal ajal tervikuid vähendati, sest seda tehti üsna omavoliliselt. Seepärast, isegi kui võtta appi plokkide plaanid, millele on kantud kõigi tervikute mõõtmed, ei ole täielikku veendumust et need on objektiivsed. Kuid peamine – tervikute purunemine ja kambrite lae ning maa vajumine võib tihti olla initsieeritud maapõues peituvast, avastamata jäänud geoloogilisest häirest – karstist. Seepärast on kambriplokkide varisemine üsna juhuslik protsess.

Pilt 3.7 näitab, et graafiku ajaline ulatus on 156 kuud ehk 13 aastat. Kui lähtuda levinud arvamusest, et tervikute nõrgenemine jätkub ja kambriplokkide varisemise tõenäosus säilib, siis pakub huvi, kas andmestik ja mõneti lühikene vaatlusvahemik sobivad pika-ajaliseks prognoosiks, et vastata küsimustele:

- kas kambriplokkid jäävad seisma või varisema ja
- kui varisema, siis millise intensiivsusega: kasvava, konstantse või kahaneva?

Selle ülesande lahendamisel võis püstitada mitu hüpoteesi. Järgmine pilt kirjeldab neis nelja.

⁸⁸ Reinsalu, E., Toomik, A., Valgma, I. 2003. Kaevandatud maa, TTÜ mäeinstituut, 97 lk.



Pilt 3.8 Kambriplakkide ea mudelid: 1 - kollapsi, 2 - pideva kasvu, 3 – stabiliseerumise ja 4 - S-mudel.

Valemid vastavalt:

$$1 : N = a - b \ln(c / (t + z) - 1)$$

$$2 : N = a + b \ln(t + z)$$

$$3 : N = c - a \exp(-bt)$$

$$4 : N = c / (1 - \exp(a + bt))$$

Kus: a , b , c ja z - mudeli kordajad (parameetrid)

Ülesande lahendamiseks ei sobi *Exceli* pakutav *Trendline*-meetod, sest mudelitel on kordajaid rohkem kui kaks ja mõnda neist funktsioonidest polegi *Exceli* arsenalis. Seepärast tuleb kasutada varem korduvalt mainitud *Solver*-menetlust. Selle arvutusmeetodi põhimõte on optimeerimine. *Excel*-tabelisse, milles on veerud argumendi t ja funktsiooni, tuvastatud varingute arvu N_{teg} jaoks, lisatakse valemi abil arvutatud varingute arvu N_{arv} veerg. Arvutamiseks kasutatakse kordajate ($a...z$) oletatavaid väärtusi. Veel lisatakse tegelike ning arvutatud varisenud plakkide arvu vahede ruutude veerg $(N_{teg} - N_{arv})^2$. Kriteeriumiks võetakse vahede ruutude summa, mida minimeeritakse protseduuri *Solver* abil. Piirangutena antakse *Solver*'i aknasse ette kordajate ($a...z$) oletatava varieeruvusvahemiku alumine ja ülemine raja. Kui tulemuseks saadud tegelike ja arvutatud tulemuste vahede ruutude summa jagada vabadusastmete arvuga, saame kvaliteedi hinnanguks dispersiooni.

Mudelite kordajate võimalike väärtuste oletamisel *Solver*-menetluse rakendamisel on kasulik teada, mida nad mõõdavad, kirjeldavad, tähendavad. Näiteks antud juhul on need järgnevas tabelis.

Tabel 46 Kambriplakkide ea prognoosimudelite kordajate tähendused

Kordaja	Mudel			
	1	2	3	4
a	Vabaliige			
b	Iseloomustab protsessi intensiivsust			
c	Aeg varisemiseni	-	Varisevate plakkide maksimaalne arv	
z	Aeg tervikute deformeerimise alguse ja vaatluse vahel		-	

Varasem uuring andis tulemuseks, et parimal moel sobivad kambriplakkide varisemise kasvu kirjeldama mudelid 1 ja 2, mille kohaselt varisenud kambriplakkide arv kogu aeg kasvab. Seejuures kollapsi mudeli (1) kohaselt on varisemisohtlikke plakke 267 ja need varisevad 671 aasta jooksul. Nende hulgas on ka mudeli aluseks olnud 62 stiihiliselt varisenud plakki.

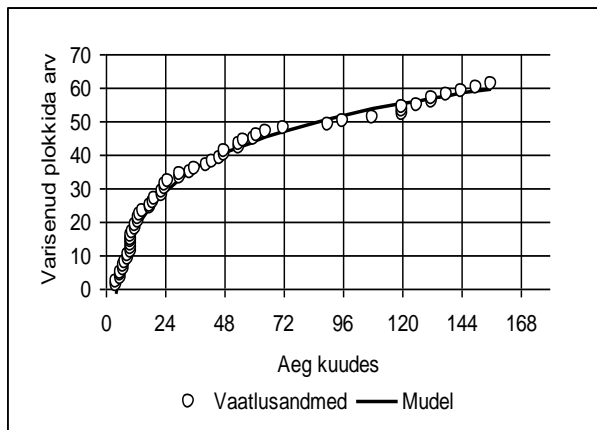
Kollapsi mudeli (1) kohaselt osa plakke variseb üsna pea pärast väljamist. Seisma jäänud plakkide tervikute ja lae nõrgenemine jätkub, hakates tulevikus kiirenema kuni mingiks ajaks on kõik varisemisohtlikud plakid kokku kukkunud. Kollapsi mudel sobib, kui kambrite tugitervikud on projekteeritud lühiealistena.

Varingute arvu pideva kasvu mudeli (2) kohaselt tuleb neid kogu aeg juurde, kuigi juurdekasv aja jooksul aeglustub. Selle mudeli kohaselt varingud ei lakka enne kui kõik plakid on varisenud.

Stabiliseerumise mudel (3) kirjeldab levinud arvamust, et plakid, mis mingil põhjusel on määratud varisema, varisevad, ja need, mis pole seda teinud, jäävadki seisma.

S-mudeli (4) kohaselt plakkide varisemise intensiivsus ei ole suur mitte kohe pärast väljamist, vaid veidi hiljem⁸⁹. Analooiliselt mudeliga 3 variseb osa plakke mõne aja jooksul, osa jääb igavesti seisma.

⁸⁹ S-mudel võiks kirjeldada protsessi intensiivistumist pärast kaevanduse uppumist. Selle hüpoteesi uurimine võib saada teoks alles siis, kui on tuvastatud uusi vajumeid veega täitunud kaevanduste peal.



Pilt 3.9 Varisevate kambrite arv pideva kasvu mudeli kohaselt

Pideva kasvu mudeli (mudeli 2) kohaselt on varisemisohtlikke plokkide vähem, ainult 166 ja nende varisemist on oodata kümne tuhande aasta jooksul (Pilt kõrval)

Üldse oli käesolevaks ajaks (2007) Ahtme, Estonia ja Viru kaevandustes väljatud umbes pooltuhat kambriplokki. Seega ei kinnita arvutustulemused varingute arvu olulist kasvu lähitulevikus.

Prognoos kehtib tingimusel, et kaevandused ei ole uppunud.

Näide 14. Kambriploki varinguhetke prognoosimine logistilise funktsiooniga

Hüpotees – koristuskambri lae ja põranda vaheline kaugus (konvergens δ) algul kasvab, siis stabiliseerub ja hiljem hakkab kasvama, kuni lagi variseb (vt Pilt 3.8, kollapsi mudel). Järgnev Pilt 3.10 on väljavõte Exceli arvutuslehel. Ülesanne on lahendatud *Solver*-menetluse abil. Algandmeteks on kaheveeruline valim (aegrida) milles on mõõtmispäevad ja mõõtmistulemid. Mõõtmine algas kohe, kui kambri lakke ja põrandasse olid pandud kohakuti paiknevad reeperid. Siis sai hakata nende vahet mõõtma ja fikseeriti 0-konvergens. Järgmine mõõtmine toimus 20. päeval. Päev-päevalt kaeveõhne lae ning põranda vahe vähenes. Kuid, nagu mäeinsenerid peaksid teadma, mäerõhu mõjul tõuseb ka põrand. Seepärast ei saa lae ja põranda üha vähenevat vahet nimetada lae vajumiseks vaid konvergensiks, lae ja põranda lähenemiseks. Konvergensit üritati kirjeldada joonisel nähtava valemiga, milles on neli tegurit: a , b , k ja z , mille väärtus tuli leida. *Solver*-menetluse esimene samm on nende tegurite keskvaartuste ja muutumisrajade suuruse ette andmine. Arvutuslehe pesadesse, kus nüüd on nähtaval tegurite arvutatud väärtused, pandi esialgu oletuslikud suurused. Nende abil arvutati tabeli kolmandasse veergu esialgsetele teguritele vastav arvutuslik konvergens – tabelis 'Arvut'. Parema arusaamise huvides tekitati ka pildil nähtav graafik (punane joon), mis esialgu jäi väga kaugele mõõtmistulemusi illustreerivatest punktidest. Seejärel arvutati tabeli järgmine veerg, mis koosnes iga üksiku mõõtmistulemi ja vastava arvutatud tulemi vahe ruutudest. Näitlikkuse huvides on see tehe joonisel kahes veerus – enne leiti vahe ja seejärel arvutati vahe ruut. Et teadaolevalt on vahede ruutude summa läheduse kriteerium, siis arvutati see tabeli lõppu. Seejärel aktiveeriti protseduuri *Solver* aken ja seati ülesanne: minimeerida vahede ruutude summa, muutes tegurite esialgseid väärtusi nii, et nad jääksid ette antud rajadesse. Tulemuseks olid järgneval pildil nähtavad arvud ($a = 31,2$ mm, $b = 3,79$, $k = 1007$ päeva ja $z = 15,7$ päeva) ja mõõtmispunkte palju paremini kirjeldav graafik.

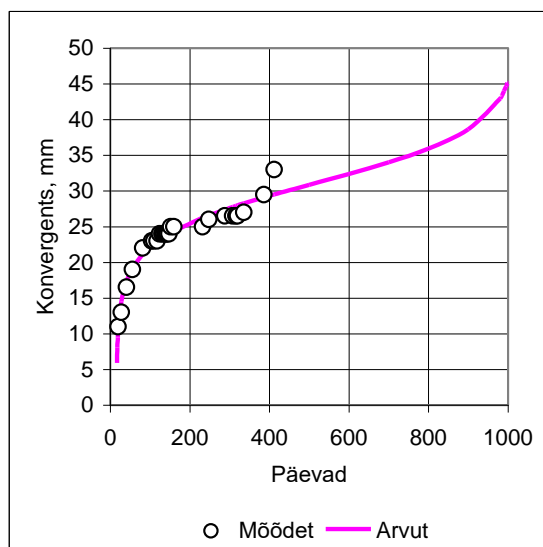
Tulemust uurides, võib märgata, et valitud mudel ei ole protsessi kirjeldamiseks piisavalt hea. Mõõtmispunkte vaadates võib arvata, et lagi kukkus varsti pärast viimast, 400. päeval tehtud mõõtmist, mitte 1007. päeval. Üsna usutavaks võib pidada, et lagi varises, kui konvergens ületas $2 \times 31,3 = 62$ mm raja, mis, kui sellest maha arvutada põranda tõus, oleks selle kaeveõhne lae piirvajum. Seda, et konvergens algas 16 päeva enne esimest mõõtmist, mis toimus 20. päeval, annab ka mäetehniliste üksikasjade abil seletada. Miks aga varisemise prognoos (mitte enne 1000 päeva möödumist) optimistlikuks osutus, võib seletada külgkivimite survetugevuse vähenemisega aja jooksul, mida lage ja põrandat iseloomustav valem ehk arvutusmudel ei arvesta.

See on protseduuri üsna pealiskaudne kirjeldus. Tegelikult nõuab nelja teguri ja kapriiselt käituvat logaritmifunktsiooni raamidesse surumine *Solver*-menetluse abil üsna suurt arvutamisoskust. Tunduvalt hõlpsam on selle arvutusmeetodi kasutamine maapinna vajumise kirjeldamiseks, mille kohta on toodud Näide 15. Maapinna vajumiskõvera kirjeldamine logistilise funktsiooniga.

Konvergensti mudel $\delta = a - b \ln(k / (t - z) - 1)$

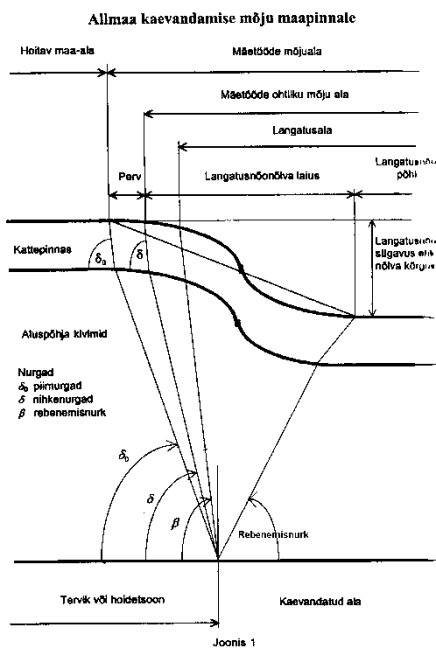
Mudeli parameetrid:	Parametrite rajad				
	Arvutatud		vähim	suurim	
Pool lõplikust konvergenstist	a	31.2	mm	0	500
Tegur	b	3.79		0	10
Protsessi kestus	k	1007	päeva	0	2000
Aeg konvergensti mõõtmise ja protsessi alguse vahel	z	15.7	päeva	0	20

Päev	Konvergenst (δ) mm		Vahe	Vahe ruut
	Möödet	Arvut		
17		5.90		
18		8.10		
19		9.48		
20	11	10.50	0.50	0.254
28	13	14.52	-1.52	2.311
41	17	17.30	-0.80	0.647
56	19	19.13	-0.13	0.016
82	22	21.12	0.88	0.783
104	23	22.29	0.71	0.504
110	23	22.56	0.44	0.190
118	23	22.91	0.09	0.009
124	24	23.15	0.85	0.729
130	24	23.38	0.62	0.389
134	24	23.52	0.48	0.227
138	24	23.67	0.33	0.111
140	24	23.74	0.26	0.070
144	24	23.87	0.13	0.016
148	24	24.01	-0.01	0.000
152	25	24.14	0.86	0.745
160	25	24.39	0.61	0.375
232	25	26.25	-1.25	1.563
248	26	26.60	-0.60	0.357
288	27	27.40	-0.90	0.810
308	27	27.77	-1.27	1.620
316	27	27.92	-1.42	2.010
320	27	27.99	-1.49	2.218
336	27	28.27	-1.27	1.614
386	30	29.11	0.39	0.155
412	33	29.52	3.48	12.107
500		30.87	Summa:	29.831



Pilt 3.10 Vasakul - lähteandmed. Konvergensti (kambri lae ja põranda lähenemise) mudel

Näide 15. Maapinna vajumiskõvera kirjeldamine logistilise funktsiooniga



Pilt 3.11 Maa vajumise skeem allmaakaevandamisel

Kui tekib vajadus kirjeldada kaevandamisest põhjustatud vajumi nõlva kuju, mis aitaks prognoosida allmaakaevandamise mõju ulatust, võiks kasutada logistilist funktsiooni. Kõrval pildil on asjakohasest juhendist võetud pilt, mis näitab, kuidas maa kaevandamise tulemusel vajub ülemiselt tasandilt alumisele. Nõlva kuju saab kirjeldada logistilise funktsiooni erimiga

$$z_i = z_0 + h / (1 + \exp(b - a x_i))$$

Kus z_i on maapinna kõrgus nõlva läbival käigul (profiilil, trassil) kohas (i), z_0 on maapinna kõrgus vajumi põhjas, h on vajumi sügavus, a ja b on mudeli kordajad ning argument x_i on kaugus lähtereeperist vajumi põhjas piki käiku, suunaga vajumata maa poole.

Mudelit vaadates näeme, et vajumist eemal, kus $x = \infty$, on maa kõrgus $z_0 + h$ ja kohas, kus $x = b/a$ on nõlva keskvöö. Selline mudel võimaldab arvutada, kui kaugemale vajumist levib maapinna langus. Mudeli kontrollimiseks soovitatakse huvilisel leida ja kasutada vajunud maa nivelleerimise andmeid.

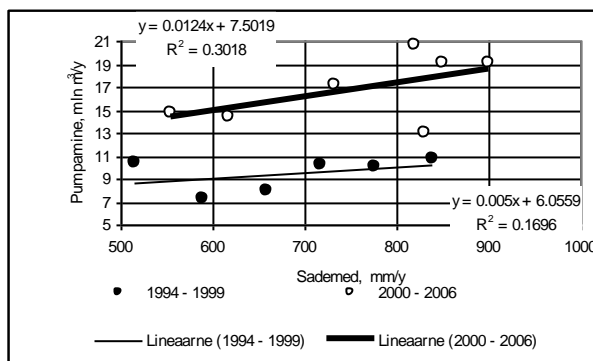
Näide 16. Lineaarne mudel - kaevandustest pumbatava vee päritolu

Tööhüpotees. Kaevandusest välja pumbatava vee (=kaevandusvee) kogus koosneb: 1) sademete veest, 2) põhjaveest ja 3) sekundaarsest sissevoolust ehk veeärastussüsteemist tagasi imbunud (retsirkuleerivast) veest. Seega, kui uurida kaevandusvee ja sama ajavahemiku sademete koguse vahelist seost, siis see peaks kajastama asjaolu, et üks osa ärastatavast veest sõltub sademete hulgast, teine ja kolmas ei sõltu. Sademetest moodustuva kaevandusvee kogus võiks olla võrdeline sademete kogusega. Seepärast kasutame lineaarset mudelit ⁹⁰

$$Q = a W + b, \text{ mln m}^3 / \text{y},$$

kus: Q – välja pumbatud vee kogus, mln m³/y, W – sama aja sademete kogus, mm / y; a – kordaja ühikuga mln m³/mm, mis näitab, kui palju kaevandusvett annab üks mm sademed, b – sademetest mittesõltuv vee kogus ehk see, mis tuleb põhjaveest ja sekundaarsest sissevoolust, mln m³/y sest kui $W = 0$, siis $Q = b$.

Rakendasime seda mudelit Viru kaevandusest välja pumbatud vee päritolu analüüsimiseks. Kasutades Exceli tööriistu leiidsime sademete (argument) ja välja pumbatud vee koguse (funktsioon) vahel lineaarse seose.



Ajavahemikus 1994...1999 välja pumbatud vee koguse ja sademete hulga vahel oli seos:

$$Q = 0,005 W + 6,055 \text{ mln m}^3 / \text{y}.$$

Korrelatsioon ei ole kõige parem, $R^2 = 0,17$ ja korrelatsioonikordaja $r = (R^2)^{0,5} = 0,41$.

Ajavahemikku 2000...2006 iseloomustab seos

$$Q = 0,0124 W + 7,5 \text{ mln m}^3 / \text{y}$$

⁹⁰ Lineaarne mudel on primitiivne, kuid, nagu näitab tema kasutamine kaevandusvee päritolu uurimisel, on tulemused üsna loogilised ja seletatavad.

Pilt 3.12 Viru kaevandusest välja pumbatud vee ja sademete koguste vaheline seos veidi parema korrelatsioonikordajaga $r = (R^2)^{0,5} = (0,3018)^{0,5} = 0,55$

Esimene periood (1994...1999) iseloomustab aega, mil naabruses töötasid ja pumpasid vett Somp ning Tammiku kaevandus. Teisel ajavahemikul olid naaberkaevandused juba uppunud ja Viru kaevandus pidi ka neist tulevat vett ärastama. Pumpamise maht oli kasvanud ligikaudu poolteist korda.

Esimese ajavahemiku andmeil saime kordaja $a = 0,005 \text{ mln m}^3/\text{mm} = 5,0 \text{ tuh m}^3 / \text{mm}$, mis näitab, et Viru kaevanduses annaks 1 mm sademeid 5 tuh m^3 vett aastas. Vabaliige $b = 6,055 \text{ mln m}^3 = 6055 \text{ tuh m}^3$ väljendab seda aastast veekogust, mis ei sõltu sademetest. See on põhjaveekihtidest tulev ja retsirkuleeriv vesi. Kahjuks ei luba käsitluses olev analüütiline meetod neid koguseid lahutada.

Tegelikult ei imbu mitte kogu sademete vesi maapõue ega jõua kaevanduse pumplatasse. Suurem osa sademetest aurustub või voolab ära, eriti talviste ja varakevadiste suladega. Kaevandusse imbuva vee osalust ei ole võimalik täpsemalt määrata. Hinnanguliselt on see 30...50 % piires, sõltudes sademete sesoonsusest, õhutemperatuurist, kaevandamismoodusest (ava- või allmaakaevandamine) ja -viisist (kamber- või lankaevandamine, vaal- või aukkaevandamine). Võtame toodud näites imbumisteguriks 0,4, korrutame sellega sademete koguseid ehk eeldame, et keskmiselt 40 % sadevett jõuaks pumplatasse ja võtame selle uueks argumendiks. Arvutame uuesti võrrandi kordajad ja saame veidi teistsuguse seose:

$$Q = 0,0012 W + 6,055 \text{ mln m}^3 / y,$$

kus kaevandusse imunud sademetevee kogus $W_i = 0,4 W$.

Tulemus on matemaatiliselt triviaalne: sademetest sõltumatu komponent $6,055 \text{ mln m}^3/y$ ei sõltu sellest, kui palju sadevett jõudis kaevandusse. Kuid sademetest sõltuv vee koguse tegur on nüüd väiksem: $0,00124 \text{ mln m}^3/\text{mm}$. Arvutustäpsuse piires on see eelmisel katsel saadud sademekordaja (a) ning imbumisteguri (0,4) korrutis ($0,005 \times 0,4 = 0,00125$).

Kontrollküsimused:

- Kui suur osa Viru kaevanduse veest tuli sademetest enne ja pärast naaberkaevanduste sulgemist?
- Kas sademete mõju Viru kaevanduse veeärastusele suurenes pärast Tammiku ja Somp kaevanduse sulgemist?
- Kui palju vett andis 1 mm sademeid esimesel ja teisel perioodil?

Näide 17. Kaks eksponentmudelit suletud kaevanduse vee isepuhastumise kirjeldamiseks

Kaevandusvee üks lisandeid on sulfaatioon, SO_4^{2-} , nn sulfaadid. Nad tekivad kivimeis sisalduva püriidi lagunemisel vee ja õhuhapniku toimel. Purunenud ja purustatud kivim on püriidi lagunemiseks soodus ja seepärast on kaevandusvees sulfaatide sisaldus kümneid kordi kõrgem kui looduslikus põhja- ja pinnavees. Sulfaadid ei ole ohtlikud ja veevaesemate riikide võimalusi arvestavalt peetakse Euroopa Liidu normide kohaselt joogiveele lubatavaks kuni 250 milligrammi sulfaate liitris⁹¹.

Sulfaadid tekivad kaevandusvette, kui imbu sademete vesi läbib nn aeratsioonivööndi - lõhenenud kivimite kihte, kus on nii püriiti, niiskust kui ka õhuhapnikku. Kui kaevandus täitub veega, siis põhjavee tase tõuseb, aeratsioonivöö aheneb, püriidi lagunemine aeglustub ja sulfaatide lisandumine väheneb. Uppunud kaevanduste vesi vahetub – voolab välja ja/või töötavatesse kaevandustesse. Kui esialgu, kohe pärast kaevanduse veega täitumist on vesi väga lisandirikas, siis hiljem, tänu vähem saastunud vee juurdevoolule vesi puhastub. Muu hulgas alaneb ka sulfaatide sisaldus. Protsessi kirjeldavat mudelit luues võib eeldada, et kui alguses oli vees mingi sulfaatide algkontsentratsioon $a \text{ mg/l}$, siis aja möödudes, puhtama vee lisandudes, on see kaks korda vähenenud ja kontsentratsioon on $a / 2 \text{ mg/l}$. Järgmise sama pika ajavahemiku jooksul väheneb kontsentratsioon jälle kaks korda ja siis on sulfaate juba $a / 4 \text{ mg/l}$. Ja nii edasi, kuid täiesti puhtaks ei saa vesi isegi mitte lõpmatult pika aja jooksul. Kõnealune ajavahemik on nn poolestusaeg ja lahjenemisprotsessi peaks iseloomustama eksponentmudel. Selle mõttekäigu alusel loodi

I tööhüpotees: suletud kaevanduste vesi muutub aja jooksul järjest puhtamaks.

⁹¹ Püriidi lagunemise kahe produkti, nii sulfaat- kui ka rauaiooni mõõtmine ning jälgimine on metoodiliselt lihtne, sestap on nad kaevandusvee seisundi indikaatorid. See, et neist kirjutatakse ja räägitakse on tekitanud väära mulje, et nad on mürgised.

Sellist protsessi kirjeldab lihtne eksponentmudel. Kasutades *Exceli* tavaprotseduure (*Trendline*-meetodit) tehti 2004. aastal vastavad arvutused ja saadi sulfaatide vähenemist kirjeldav eksponentmudel

$$\text{SO}_4^{2-} = 801 \exp(-0,386 t), \text{ mg/l},$$

kus t on aeg aastates. Mudelit iseloomustas korrelatsioonikordaja $r = (R^2 = 0,46)^{0,5} = 0,68$.

Nende arvutustulemuste kohaselt jõuab suletud kaevanduste vesi mõne aastaga joogivee kvaliteedi tasemele (sulfaatide sisaldus <250 mg/l ja rauasisaldus <0,2 mg/l)⁹². Leiti ka kontsentratsiooni langemise poolestuseajad: sulfaatidel 1,8 ja raual 1,4 aastat.

Aja jooksul tuli uusi andmeid ja 2006. a mõõtmistulemuste lisamine andsid tulemuse

$$\text{SO}_4^{2-} = 465,2 \exp(-0,24 t), \text{ mg/l},$$

Korrelatsioonikordaja oli juba väiksem, $r = (R^2 = 0,16)^{0,5} = 0,4$. Ka poolestusaeg osutus varem ennustatust suuremaks, sulfaatidel umbes kolm aastat. See sundis oletama, et lihtne eksponentmudel ei ole kaevandusvee lahjenemise prognoosiks mitte kõige parem. Nii tuli püstitada

II tööhüpootees: suletud kaevanduste vee lisandite sisaldus läheneb mingile lõplikule konstantsele väärtusele.

Selle hüpooteesi kohaselt ei saa kaevandusvesi sulfaatidest puhtaks isegi mitte väga pika aja jooksul. See on loogiline, sest seni, kuni naabruses on töötavaid kaevandusi, tuleb neist juurde mineraliseerunud vett. Kui naaberkaevandused suletakse, jääb ikkagi mingi aeratsioonivöö sulfaate tekitama, sest kaevandatud ala põhjavee tase ei tõuse kaevandamiseelsele tasemele.

Teist tööhüpooteesi kirjeldab laiendatud eksponentmudel

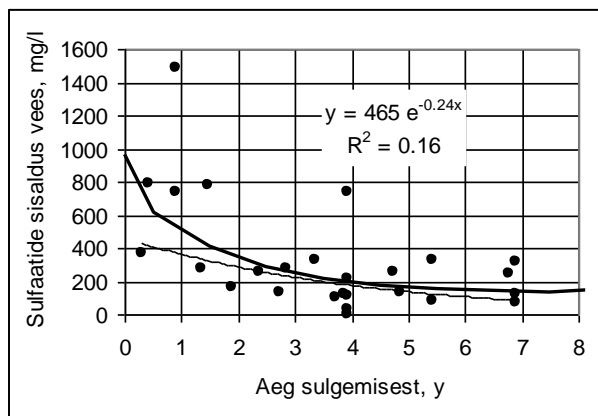
$$y = a (\exp(-b x)) + c, \text{ mg/l}$$

ehk teisiti kirjutatuna

$$y = a e^{-bx} + c, \text{ mg/l},$$

kus c on suletud kaevanduse vee lõplik sulfaatidesisaldus.

⁹² Reinsalu, Enno; Valgma, Ingo; Lind, Helena; Sokman, Kalmer (2006). *Technogenic water body closed oil shale mines //Oil Shale*, 23(1), p 15...28.



Laiendatud eksponentmudeli kordajaid ei saa leida Exceli tavaprotseduuride abil. Küll aga saab abi Exceli protseduurist *Solver*. Tulemus osutus selliseks

$$SO_4^{2-} = 845 (\exp (-0.00146 d)) + 119, \text{ mg/l,}$$

Selle mudeli kohaselt jääb suletud kaevanduste vee sulfaatidesisaldus prognoositavas tulevikus looduslikust kõrgemaks, 120 mg/l tasemele.

Pilt 3.13 Suletud põlevkivikaevandust vee sulfaatidesisalduse vähenemine aja jooksul.

I tööhüpotees – valem ja peen joon, II tööhüpotees – jäme joon

3.2.5. Monte-Carlo meetod

Olemus – juhuslikkuse modelleerimine

Iga mõtleval insener, olles kasutanud empiirilisi valemeid, on märganud, kui väga arvutustulem sõltub lähteandmete ja empiiriliste kordajate valikust. Kindlasti on ka neid, kes lähteandmetega manipuleerides on saanud soovikohaseid arvutustulemeid ja JOKK (= juhendipõhiselt on kõik korrektne).

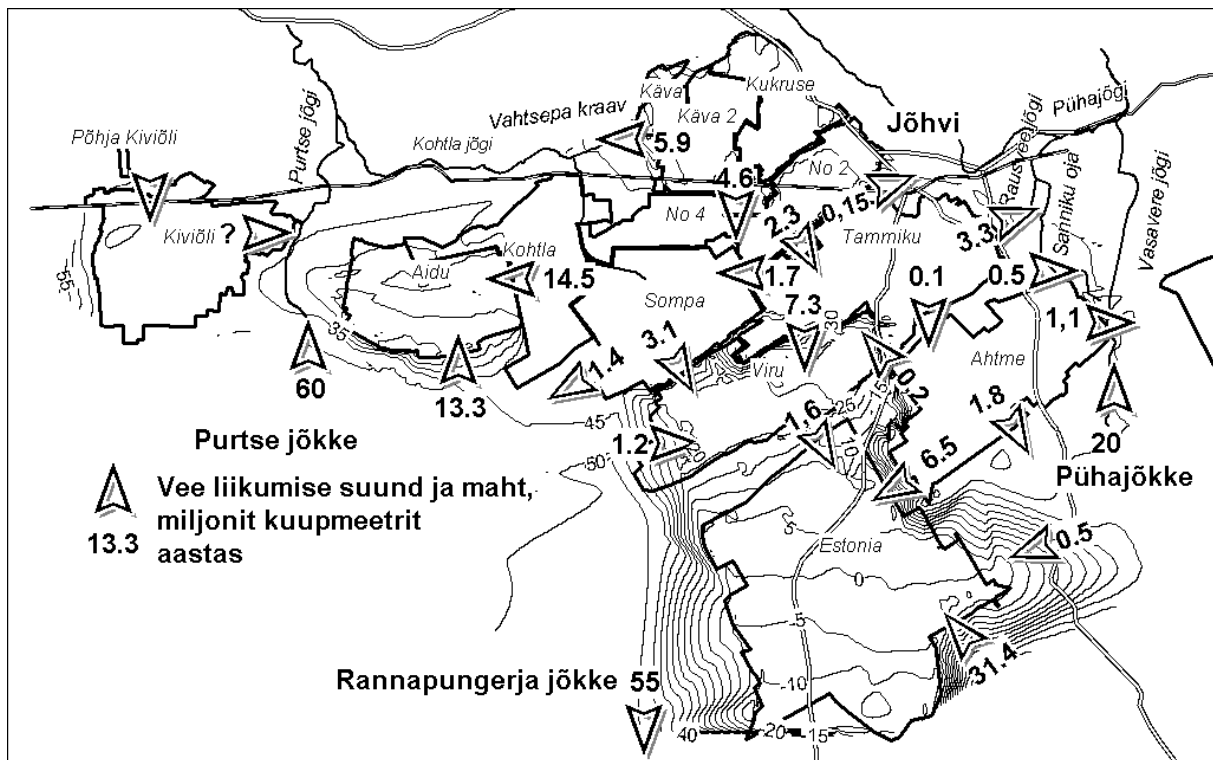
Asjaolu, et lähteandmetel ja empiirilistel kordajatel on nn lubatavad piirid, tähendab, et nad on juhuslikud. Kuid kui juhuslike arvude seast valida meelevärskeid, siis need ei ole enam juhuslikud. Sel juhul pole ka tulem juhuslik vaid meelevärske. Juhuslike arvude abil arvutusi tehes saab kõige tõepärasema tulemi, kui kasutada lähteandmete ja empiiriliste kordajate keskväärtusi. See oleks (suurte mõõndustega) juhusliku arvutustulemi mingi keskväärtus. Kuid paljudel juhtudel ei huvita meid mitte tulemi keskväärtus vaid tema hajumiskiirgus. Tihti, eriti riskiarvutustes, on just arvutustulemi minimaalne või maksimaalne väärtus olulisem kui keskväärtus.

Näiteks mäeprojektides määratakse arvutuste abil kaevanduse põhjavee taset alandav (mõju)raadius. Sellest lähtuvalt kas projekteeritakse ümbruskonna asumitesse uued kaevud või rahustatakse elanikke, et mõju nendeni ei ulatu. Kuid iga maapõuespetsialist teab, et arvutustulem sõltub raskesti mõõdetavatest teguritest – filtratsioonimoodulist, veejuhtivusest, mille arvuväärtus võib varieeruda mitme suurusjärgu piires. Peale selle on muutlik põhjavett toitev sademete hulk, maapinna külmumise kestus jne, mis kõik mõjutavad põhjavee taset. Nii on arvutustel üsnagi dekoratiivne iseloom.

Võiks ju arvutada sedalaadi tõenäosusliku iseloomuga suurusi kõige halvamate tingimuste kokkulangemise juhuks. Kuid vähegi mõeldes saadakse aru, et kõigi halbade tingimuste kokkulangemise tõenäosus on tühiselt väike ja kui sellest juhinduda, tuleb arvestada suurte, põhjendamatute kuludega. Seepärast tundub olevat mõistlik korrata arvutusi väga erinevate lähteandmete väärtusega ja vaadata, millises vahemikus arvutustulem üldse võiks olla. See ongi Monte-Carlo meetod – ühe ja sama arvutustehte kordamine, iga kord uute, ette antud piires varieeruvate juhuslike lähteandmetega. Arvutusi tehakse väga palju kordi ja nii saab väga palju juhuslikke arvutustulemusi, millel on oma keskväärtus, ja mis peamine – jaotus, varieerumistunnused (standardhälve jm). Meetod on vana, kuid laiemas käibesse tuli koos elektronarvutitega.

Näide 18. Suletud naaberkaevandusest sisse tungiva vee koguse hindamine Monte-Carlo meetodiga

Kaevandusest välja pumbatava vee kogus sõltub paljudest asjaoludest, kuid kui naaberkaevandus on vett täis, siis ka sellest, kui palju sealt juurde tuleb. Järgneval pildil näitavad noolepead, kuidas ja kui suurtes kogustes põhjavesi suletud ning töötavate põlevkivikaevanduste vahel liigub.



Pilt 3.14 Suletud ja töötavate põlevkivikaevanduste veevahetuse skeem

Ühest kaevandusest teise imbuva vee koguse arvutamiseks sobib valem

$$Q = km \Delta h L / d, \text{ m}^3/\text{d},$$

kus: km – kaevandustevahelise tõkketerviku veejuhtivus, m^2/d ; Δh – vee tasemete vahe ühel ja teisel pool tõkketervikut, m; L – tõkketerviku pikkus, m; d - tõkketerviku paksus, m.

Kõik arvutuseks vajalikud tunnused on juhuslikud, sest:

- veejuhtivus sõltub kivimi lõhelisusest, kohati esinevast karstist ning vee liikumise suunast, järelikult ka terviku suunast,
- veejuhtivus ei iseloomusta mitte ainult terviku veepidamatust vaid ka kaeveõõnte lae ning põranda (lasumi ja lamami) võimet vett juhtida ⁹³,
- vee tasemete vahe on sesoonne, sõltub sademetest,
- tõkketerviku pikkus, kuigi mäetööde plaani abil määratav, on mitmeti trakteeritav, sest mitte kuskil ei ole tervik sirgjooneline ega ühesuunaline,
- terviku paksus võib varieeruda suurel määral, ulatudes paarist meetrist (kohtades, kus tervikut läbib käik on „vettpidavalt“ tõkestatud) kuni sadade meetriteni asumite all ja karstivõõndite alal.

Monte-Carlo meetodi kasutamise näitena üritasime arvutada suletud Kohtla kaevandusest siis veel töötanud Aidu karjääri voolava vee kogust. Lahendamise aluseks võtsime mõjurite võimalikud väärtused ja üritasime hinnata, kui suurtes piirides nad võivad hälbida. Meetodi peamine töövahend on juhuslike arvude generaator, mis tekitab erineva jaotusega arvusid. Lähtume selles näites eeldusest, et kõik mõjurid on normaaljaotusega ⁹⁴, mille parameetriteks on teatavasti keskväärutus (keskmine) ja standardhälve. Genereerimiseks on vaja neid teada. Kuid enamasti me neid ei tea, või teame vaid mingeid umbkaudseid hinnanguid. Kuid kui on olemas hajuvusvahemikud ja eeldades normaaljaotust, võime statistilised tunnused panna paika ligikaudselt, rusikareeglite abil:

$$\begin{aligned} \text{keskväärutus} &= (\text{vähim} + \text{suurim}) / 2 \\ \text{standardhälve} &= (\text{suurim} - \text{vähim}) / 4 \end{aligned}$$

⁹³ Lasumi veejuhtivus sõltub vee kõrgusest uppunud kaevanduses – mida kõrgem see on, seda rohkem tuleb vett läbi lae ja põranda. Käesolevas näites jätame selle olulise asjaolu lihtsustamise huvides siiski kõrvale.

⁹⁴ Praktika alusel väidan, et enamiku kordajate jaoks on parem kasutada lognormaalset jaotust ja see ei ole ka arvutustehniliselt keerukas.

Esimene reegel lähtub hajuvusvahemiku sümmeetrilisusest, teine toetub teadmisele, et normaalselt jaotuv juhuslik arv on piires keskväärtus ± 2 standardhälvet. Juhul, kui hajuvusvahemik pole teada, võib kasutada ka mõnd muud tunnuse muutlikkuse hinnangut, näiteks variatsioonikordajat, mis teatavasti on standardhälbe ja keskväärtuse suhe.

Arvutusnäide on järgnevas tabelis. Excelis toimub juhuslike arvude genereerimine protseduuridega: Tööriistad (Tools) > Analüüsi tööriistapakett⁹⁵ (Data Analysis) > juhuslike arvude genereerimine (Random Number Generation). Käesolevas näites kasutame normaalselt jaotunud juhuslikke arve (Distribution > Normal)⁹⁶. Selles näites on juhuslikku suurust (Number of Variables) genereeritud 50 korda (Number of Random Numbers). Iga genereeritud numbrilise abil on arvatud kõigi nelja mõjuri (km , Δh , L ja d) juhuslikud väärtused (R_i) valemiga:

$$R_i = R_N \times s_i + p_i$$

kus: R_N on standardiseeritud normaaljaotusega juhuslik arv (standardiseeritud, s.o keskväärtusega = 0 ja standardhälbega = 1); s_i ja p_i on käesolevas näites osalevate arvutustulemit mõjutavate tunnuste (km , Δh , L ja d) standardhälve ning keskväärtus.

Mõjurite iga juhuslike väärtuste kombinatsiooni jaoks on arvatud vee sissevoolu juhuslik väärtus:

$$R_Q = R_{km} R_{\Delta h} R_L / R_d, \text{ m}^3/\text{d}.$$

Kui ei kasutaks juhuslikke arve, siis, nagu järgnevas tabelis näha, lähteandmete aritmeetiliste keskmiste alusel saaks tulemuseks 4410 m³/d. Kui arvutada kõigi lähteandmete minimaalväärtuste abil, saaks 2080 m³/d ja maksimaalväärtuste puhul 7667 m³/d. Millist neist uskuda?

Monte-Carlo meetod annab 50 juhuslikku tulemit vahemikus 1715...7445 m³/d. Tegemist on arvude kogumiga (valimiga), mida saab statistiliselt töödelda ja leida tõenäosuslik (maksimaalne) juurdevool, Exceli valemiga:

$$\text{Tõenäosuslik } Q_P = \text{NORMINVERT}(P, R_Q, s_{RQ}),$$

kus: P on tõenäosus; R_Q – saadud juhuslikest juurdevooludest koosneva arvukogumi keskväärtus ja s_{RQ} – sama kogumi standardhälve.

Kõik mainitud arvud on näitena lisatud tabelis ja selle all.

⁹⁵ Kui analüüsi tööriistapakett ei ole installeerides paigutatud, tuleb see avada aknast Tööriistad > Lisandmoodulid jne (Tools > Add-Ins...)

⁹⁶ Tegemist on juhuslike arvudega. Seepärast on loomulik siin toodud näidet korrates saab teised, kuid siiski ligilähedaselt samad tulemused.

Tabel 47 Monte-Carlo meetodi kasutamise näide

Vee juurdevool Kohtlast Aidusse Monte-Carlo meetodil

	Tunnus	Vee-juhtivus	Vee tasemete vahe	Tõkkesterviku pikkus	Tõkkesterviku paksus	Vee juurdevool
	Tähis	km	Δh	L	d	Q
	Ühik	m ² /d	m	m	m	m ³ /d
	Keskmine	14	3.5	3600	40	4410
	Vähim	8	2	2600	20	2080
	Suurim	20	5	4600	60	7667
	Standardhälve	3	0.75	500	10	1397
	Normaaljühuslikud arvud	R_{km}	$R_{\Delta h}$	R_L	R_d	R_Q
1	-0.024060682	14	3	3588	40	4376
2	-1.65360234	9	2	2773	23	2414
3	1.051744221	17	4	4126	51	6009
4	0.128140982	14	4	3664	41	4591
5	1.879452611	20	5	4540	59	7445
6	-1.038274604	11	3	3081	30	3081
7	1.230005182	18	4	4215	52	6305
8	0.148298795	14	4	3674	41	4620
9	-0.901159183	11	3	3149	31	3242
10	-2.423275873	7	2	2388	16	1715
11	-0.921202172	11	3	3139	31	3219
12	-1.962671377	8	2	2619	20	2115
13	-1.648518264	9	2	2776	24	2419
14	1.095299922	17	4	4148	51	6081
15	0.049017217	14	4	3625	40	4479
16	-0.061965011	14	3	3569	39	4324
17	0.483497615	15	4	3842	45	5114
18	0.735074082	16	4	3968	47	5501
19	-1.795888238	9	2	2702	22	2273
20	-0.82887027	12	3	3186	32	3329
21	0.61198989	16	4	3906	46	5310
22	0.693605671	16	4	3947	47	5436
23	-0.535590061	12	3	3332	35	3693
24	-2.064152795	8	2	2568	19	2022
25	0.57116381	16	4	3886	46	5247
26	0.964148512	17	4	4082	50	5866
27	1.612397682	19	5	4406	56	6964
28	-0.076150855	14	3	3562	39	4304
29	-1.76636604	9	2	2717	22	2302
30	-0.789286787	12	3	3205	32	3377
31	0.36050892	15	4	3780	44	4930
32	-0.898405688	11	3	3151	31	3246
33	0.087434273	14	4	3644	41	4533
34	0.537886535	16	4	3869	45	5196
35	0.090428784	14	4	3645	41	4538
36	0.023142093	14	4	3612	40	4442
37	-0.777433797	12	3	3211	32	3391
38	0.284264843	15	4	3742	43	4817
39	-1.05694653	11	3	3072	29	3060
40	-1.450293894	10	2	2875	25	2624
41	-0.858683507	11	3	3171	31	3293
42	-1.100893314	11	3	3050	29	3009
43	0.929301223	17	4	4065	49	5810
44	-0.107880851	14	3	3546	39	4260
45	-0.550660388	12	3	3325	34	3674
46	0.263059974	15	4	3732	43	4786
47	0.441862085	15	4	3821	44	5051
48	0.272575562	15	4	3736	43	4800
49	-0.193869027	13	3	3503	38	4143
50	-0.043273758	14	3	3578	40	4350

Genereeritud 50 jühuslikust arvust vee juurdevoolu koosneva valimi (m³/d)

keskmine	13.3	3.3	3490	37.8	4223
standardhälve	3.0	0.8	501	10.0	1332
vähim	6.7	1.7	2388	15.8	1715
suurim	19.6	4.9	4540	58.8	7445

Tõenäosuslik vee juurdevool:

tõenäosusega	90% alla	5929 m ³ /d
tõenäosusega	95% alla	6413 m ³ /d

Eesti Geoloogiakeskus prognoosis enne Kohtla sulgemist sealt vee juurdevooluks Aidu karjääri, vastavalt Kohtla täitumisele: algfaasis 832 m³/d ja lõpuks kuni 9000 m³/d. Prognoos vastas situatsioonile, kus toimivad mõjurite maksimaalväärtused, tõenäosust ei arvestatud. Pilt 3.14 märgitud vee juurdevool Kohtlast Aidusse (14,5 mln m³/y = 3973 m³/d) on hinnatud kõiki kaevandusi siduva bilansi alusel ja on veidi vähem kui Monte-Carlo meetodil arvatud keskmine.

Esitatud näide on mõistetavuse huvides ülimalt lihtsustatud. Kasvõi selle poolest, et kasutati normaaljaotust, mis enamikel juhtudel ei kehti. Igal juhul, kui mõne mõjuri variatsioonikordaja on 50 % lähedal või üle selle, tekivad juhusliku mõjuri negatiivsed väärtused. Ehkki selle näite puhul on negatiivsel veetasemete vahel mingi reaalne tähendus (näiteks Kohtlas on vesi madalamal kui Aidus ja tekib negatiivne vee juurdevool ehk äravool) siis ülejäänud miinusmärgid juhusliku mõjuri ees, mis kõik tekitavad „äravoolu“, puudub mõistlik seletus.

Kuna normaaljaotus kehtib vahemikus $\pm \infty$, siis põhimõtteliselt ei saaks seda üldse kasutada nende juhuslike suuruste genereerimiseks, millel saab olla vaid ainult positiivne väärtus. Juhuslike suuruste genereerimiseks vahemikus $0 = +\infty$ sobib piisava täpsusega lognormaaljaotus. Kogu arvutus toimub eelpoolkirjeldatud protseduuri kohaselt, kuid tunnuste keskvaartuste ja standardhälbe asemel kasutatakse nende (naturaal)logaritme. Viimaste abil genereeritakse logaritmade normaalselt jaotunud juhuslikud tunnused ($R_{i,\ln N}$), mis eksponeeritakse

$$R_i = \exp R_{i,\ln N}$$

ja saadud tulemustega teostatakse arvutus, saadakse juhuslike tulemite kogum. Enamasti olemegi nii teinud, kuid mitmel põhjusel siin mitte esitanud.

3.3. Optimeerimine kui analüüs

**Optimeerimine on parimate lahenduste leidmine paljude piirangute ruumis.
Ka loometöös tuleb leida parimaid lahendusi.**

3.3.1. Ühe argumendiga mudeli optimeerimine

... on suhteliselt lihtne miinimumi/maksimumi otsing.

Tihti tekivad sellised ülesanded siis, kui meid huvitav tulem on kahe funktsiooni summa, kusjuures argumendi kasvades üks funktsioon kahaneb, teine kasvab. Sedalaadi ülesannete lahendamisel otsitakse argumendi väärtust, mille puhul summa on minimaalne.

Mäenduses on ajast aega aktuaalne probleem: kaevise kvaliteeti tõstes kasvab kaevandamiskulu ja väheneb müügi maht. Mis on kasulik, kas müüa odavat ja palju või kvaliteetset ja vähe, eriti kui kauba kvaliteet ja hind pole proportsioonis. See on tüüpiline optimeerimisülesanne milles on üks argument, toodangu kvaliteet. Mäetöösturid üritavad leida sellist toodangu kvaliteeti, mille puhul müügitulu ja kaevandamiskulu vahe oleks maksimaalne. Lihtmoel on see saavutatav toodangu kvaliteedipõhise müügihinnaga. Samal ajal soovivad mineraaltoorme tarbijad toorme kvaliteeti, mille puhul ostetava toorme hind oleks minimaalne, kuid töötlemisprodukti saagis maksimaalne. Töötlemise saagis kasvab koos toorme kvaliteediga ja nii on tarbijate soov vastuolus kvaliteedipõhise hinnaskaalaga.

Kõige lihtsamad optimeeritavad ehk sihifunktsioonid on lineaarse ja mõne mittelineaarse funktsiooni summa. Näiteks

$$y = a_1 x + a_2 / x + b$$

$$y = a_1 x + a_2 \exp(-b x)$$

jne.

Sellisena on kirjeldatav ka nn lõhkamise-laadimise ülesanne: mida rohkem lõhkeainet kasutada, seda peenem saab kaervis ja seda tõhusam on laaduri töö. Lõhkeaine kulu kasvab ja laadimise hind kahaneb ning neid kokku liites aimame, et kuskil on optimum ehk selline lõhkeaine kulu, mille puhul kahe protsessi summaarne maksumus on vähim. Matemaatikast on teada analüütiline meetod – funktsiooni ekstreemväärtust kirjeldava lahendi leidmine funktsiooni esimese tuletise võrdsustamisel nulliga. Nii ongi siin mainitud lõhkamise-laadimise ülesanne lahendatud näitena siin tihti mainitud õpikus Mäemajandus, lk 118. Kaasaegsed laiatarbeprogrammid lubavad „matemaatilisest ilust“ mööda vaadata ja lahendada selliseid ülesandeid piisavalt täpselt ja piltlikult tabeli-graafiku meetodil.

3.3.2. Lineaarplaneerimine

mis on üks lihtsamaid optimeerimisalgoritme, on eelkõige projekteerimise tarkvara. *Excelis* on sobiv menetlus *Solver*, mis on teinud lineaarplaneerimise üsna käepäraseks. Optimeerimismenetluse teeb analüüsivahendiks lineaarplaneerimise oluline osa – piirangute hinna plokk, mida uurides saab teada, et

**kui piirangut lõdvendada ühe ühiku võrra,
muutub optimaalne lahend paremaks piirangu lõdvendamise hinna võrra**

Seepärast saabki lineaarplaneerimist kasutada piirangute rollis esinevate argumentide mõju uurimisel. Sellest kõigest on samuti kirjas raamatus Mäemajandus, p 3.2.1. Siin on toon huvi äratamiseks järgmise näite.

Näide 19. Tudengi toiduratsiooni optimeerimine

Sihi(funktsiooni)ks on minimaalne rahakulu toidule. Piirangud on kalorite⁹⁷, rasvade, valkude, süsivesikute, vitamiinide jm kogus, mille toit peab sööjale andma. Piiranguteks, mida igaüks võib panna, on üksikute toiduainete päevane kogus, sest mõnda toitu igaüks ei söö. Hoiatuseks olgu öeldud, et kui järgmises näites ei oleks mahupiiranguid, siis optimaalne päevaratsioon koosneks pooleteisest liitrist piimast ja kilogrammist juurviljast ning maksaks umbes 2,5 €.

Optimeerimise lähteandmed ja üks paljudest võimalikest optimumidest on alljärgnevas tabelis. Komponentide kogused on hektogrammides (100 g = 1 hg), hinnad on ligikaudsed, 2013. a alguse tasemel.

Tabel 48 Näide lineaarplaneerimisest – üks optimaalne toiduratsioon

KOMPONENDID:	SEALIHA	KALA	LAHJA KOHUPIIM	JUUST	MUNAD (65 g/ks)	PIIM	LEIB	KARTUL	PORGAND	TATAR	ÕUN	SEEN	VÕI	JÄÄTIS	SUHKUR	Tulem	Piirangute rajad
KALORID	587	0	50	157	0	347	448	525	100	390	0	140	101	0	75	2919 >	2500 < 3000
LOOMNE VALK	20.8	0.0	10.6	10.1	0.0	17.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	59 >	59
VALK	20.8	0.0	10.6	10.1	0.0	17.4	13.0	8.3	2.0	10.0	0.0	10.0	0.1	0.0	0.0	102 >	91
RASV	53.7	0.0	0.3	12.1	0.0	19.5	1.2	0.8	0.7	2.0	0.0	2.0	10.7	0.0	0.0	103 >	103
SÜSIVESIKUD	0.5	0.0	0.7	0.9	0.0	24.7	92.9	116.7	21.0	80.5	0.0	20.0	0.1	0.0	20.0	378 >	378
VITAMIINID C	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	0.0	62.5	14.0	0.0	0.0	16.0	0.0	0.0	0.0	100 >	100
mg/100g B1	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.6	0.3	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	2 >	2
B2	0.3	0.0	0.0	0.2	0.0	1.0	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2 >	2
PP	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	2.1	8.3	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20 >	15
A	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	0.6	0.0	0.2	25.5	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	27 >	2
D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0 >	0
MINERAALID Ca	12.0	0.0	68.6	441.0	0.0	0.0	0.0	83.3	170.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	800 >	800
mg/100 g P	282.2	0.0	108.1	229.0	0.0	0.0	0.0	483.3	183.3	372.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1658 >	1500
KOGUS	1.63	0.00	0.54	0.42	0.00	5.00	1.41	5.00	2.00	1.00	0.00	2.00	0.13	0.00	0.20	1.93 kg	toitu päevas
KULU TOIDULE	0.98	0.00	0.22	0.42	0.00	0.40	0.21	0.25	0.14	0.15	0.00	0.80	0.08	0.00	0.03	0.37 =	3.675 €/päevas
MIN.KOGUS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
MAX.KOGUS	3	3	2	2	1	5	2	5	2	1	10	2	0.2	2	0.2		

Tabelist võib välja lugeda, et tugev toiduratsioon, üle 2900 kcal, tuleb kokku kui tarbida päevas:

- sealiha 160 g
- lahjat kohupiima 54 g
- juustu 42 g
- piima 500 g
- leiba 141 g
- kartuleid 500 g
- porgandeid 200 g
- tatart 100 g
- seeni 200 g
- võid 13 g
- ja suhkrut 20 g

Kokku teeb see 1,93 kg ja maksab 3,68 €.

Kuid peamine ei ole mitte see tabel. Märksa olulisem, milleks enamik analüütikuid optimeerimisarvutusi üldse teeb, on teave, kui kalliks lähevad piirangud. Selleks vaatame järgmist tabelit, mis on saadud optimaalse ratsiooni hindamiseks *Exceli* protseduuridega *Tööriistad* ⇒ *Solver* ⇒ ...*Solve*⇒*Reports*⇒*Sensitivity*. .

⁹⁷ Toitlustamises nimetatakse toitvuse (kütvuse analoogi) arväärtust kaloriks, kuigi tegu on kilokalorigega.

Tabel 49 Näide lineaarplaneerimisest – eeltoodud optimaalse toiduratsiooni piirangute hinnad

Name	Final Value	Reduced Gradient	
KOGUS SEALIHA	1.63	0.00	
KOGUS KALA	0.00	0.01	
KOGUS LAHJA KOHUPIIM	0.54	0.00	
KOGUS JUUST	0.42	0.00	
KOGUS MUNAD (55 g/tk)	0.00	0.00	
KOGUS PIIM	5.00	-0.01	Tarbides piima 100 g rohkem, vähendame toidukulu 1 sendi võrra
KOGUS LEIB	1.41	0.00	
KOGUS KARTUL	5.00	-0.13	Tarbides kartuleid 100 g rohkem, vähendame toidukulu 13 sendi võrra
KOGUS PORGAND	2.00	-0.07	Tarbides porgandeid 100 g rohkem, vähendame toidukulu 7 sendi võrra
KOGUS TATAR	1.00	0.00	
KOGUS ÖÜN	0.00	0.00	
KOGUS SEEN	2.00	-0.05	Tarbides seeni 100 g rohkem, vähendame toidukulu 5 sendi võrra
KOGUS VÕI	0.13	0.00	
KOGUS JÄÄTIS	0.00	0.03	
KOGUS SUHKUR	0.20	-0.01	Tarbides suhkurt 100 g rohkem, vähendame toidukulu 1 sendi võrra

Miinusmärgiga piirangu hind (*Reduced Gradient*) näitab, kui palju võiks kokku hoida, kui süüa mõningaid odavamaid asja ühiku (100 g) võrra rohkem. Antud juhul piima, kartuleid, porgandeid, seeni ja suhkrut. Küsimusele, mida näitavad positiivsed gradiendid on samuti vastus. Näiteks kala selles ratsioonis ei ole (*Final Value* = 0). Kuid võime proovida, mis saab, kui lisada ratsioonile 100 g kala. Selleks paneme kala minimaalkoguseks 100 g = 1 hg ja optimeerime uuesti. Siin trükises seda varianti ei ole, tuleb lihtsalt uskuda: lisades ratsiooni 100 g kala, mille hind on meie näites 4 €/kg = 0,4 €/hg, saame uue optimumi hinnaga 3,78 €. Teisisõnu – päevane toidukulu kasvab 10 senti. Esmapilgul on see arusaamatu, sest ratsiooni lisatud 100 g kala maksab ju neli korda rohkem: 40 senti. Hämmeldumisest üle saamiseks tuleb teada optimeerimise ühte peamist reeglit

paljude piirangutega süsteemis ei kehti lihtsad asendused

sest, kui lisada päevaratsiooni 100 g kala (= 0,4 €), vähenevad teiste komponentide kogused ja seeläbi ka kulu muu söögikraami ostmiseks. Odavnemine teiste toiduainete koguse vähenemise arvelt on 40 - 10 = 30 senti.

3.3.3. Optimeerimine proovimise meetodil

Mistahes modelleerimine, ka optimeerimine, sõltub modelleerijast, operaatorist. Seepärast ongi üsna mõistlik ka selline optimeeriv tegevus, kus otsus langetatakse kas operaatori või ekspertide (grupi) poolt ja seda mitte ühe kriteeriumi, vaid üldisemalt, väljundi käitumise vaatlemise teel.

Näiteks klassikaline kvaliteedi-quantiteedi ülesanne: põlevkivikihendi võib väljata kihiti – osa kaubaks, osa kas kaoks või aheraineks. Mida paremaid kihte väljata, seda kõrgem on kaevis kvaliteet, kuid seda enam tuleb jätta kihendi osi maha. Kihiti väljamine on keerukam, seega, mida põhjalikumalt seda teha, ka kulukam. Ülesanne on formaliseeritav, kuid mitmed tehnilised nüansid (karjääris tuleb enne väljata pealmine ja siis alles alumine kiht, allmaakaevandamisel ei saa mõnda kihti eraldi väljata jne) teevad selle keerukaks. Seepärast saavutatakse hea ja näitlik lahendus variantide järkjärgulise läbiarvutamise ja tulemuste üldistamise teel.

Selline proovimismenetlusega optimeerimine on ka fosforiidi tootsa kihendi kujundamine - TTÜ mäeinstituudi bakalaureusetaseme üliõpilaste üks esimesi ülesandeid (vt Mäemajandus, joonis 1.1, siin õpikus Näide 11).

Näide 20. Põlevkivikihendi optimaalse väljamise valimine

Näitena on läbi arvatud varuplokk Seli 2. Arvutused tehakse samm-sammult:

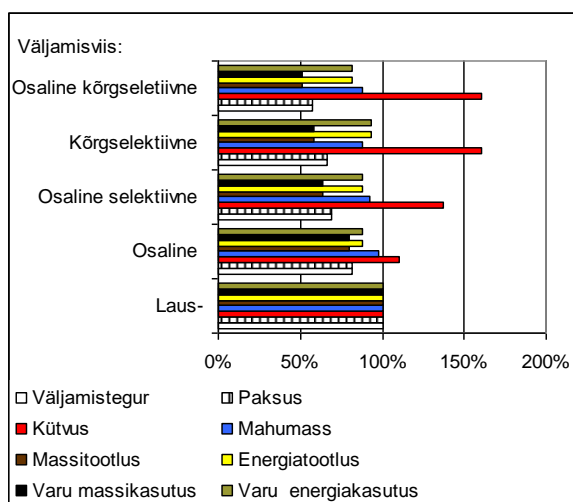
1. Koostatakse põlevkivikihendi tavalised tootlusarvutuste maatriksid (vt Näide 7. Põlevkivi varuplokkide usaldatavuse analüüs), selle erinevusega, et neisse on lisatud kõikides arvutustes osalev väljamis- ehk osalustegur, osalus. Osalus 0 tähendab, et seda kihti ei väljata ja kaevises ta ei osale; osalus 1 tähendab, et kiht väljatakse kaevisesse täies mahus. Ka iga üksiku kihi või vahekihi väljamine võib olla osaline, kui väljatakse vaid osa kihist, näiteks osalusega 0,9 = 90%.
2. Seejärel, „mängides“ eri kihtide ja kihtide kombinatsioonide osalemisega, saab mitmeid tulemusi, mis igal sammul korjatakse eraldi tabelisse. Väljatavate ja mahajäetavate kihtide valimine sõltub operaatori kogemustest ja teadmistest.

3. Saadud tulemused sorteeritakse mõne olulise tunnuse kasvamise või kahanemise järgi. Sedalaadi ülesannetes on tavaline, et üritatakse omavahelisse suhtesse viia kvaliteet ja kvantiteet. Antud näide kirjeldabki ülesannet, mille sihiks on kaevise kvaliteedi tõstmise kihindi osalise ja selektiivse väljamise teel.

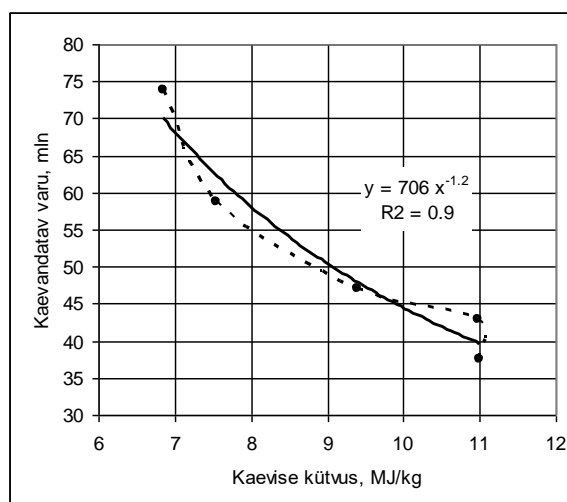
Tabel 50 Erinevate väljamisviisidega saadava kaevise kvaliteedi ja tootluse suhtelised näitarvud uuringuplokis Seli 2

Väljamine:	Väljamistegur	Paksus	Kütvus	Mahumass	Massitootlus	Energiatootlus	Varu massikasutus	Varu energiakasutus
Laus-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Osaline	0.81	0.81	1.10	0.98	0.79	0.87	0.79	0.87
Osaline selektiivne	0.69	0.69	1.37	0.92	0.64	0.87	0.64	0.87
Kõrgselektiivne	0.66	0.66	1.60	0.88	0.58	0.93	0.58	0.93
Osaline kõrgselektiivne	0.58	0.58	1.61	0.88	0.51	0.82	0.51	0.82

Arvud tabelis on lausväljamise suhtarvud (1 = 100%). Neist torkab kohe silma triviaalne asjaolu, et kaevise kvaliteedi tõstmise, maksimaalselt 1,61 korda vähendab väljatava varu kogust peaaegu kaks korda (1 ⇒ 0,51). Teisisõnu – maavara kaoks jääb 1 - 0,51 = 0,49 = 49%. Märksa rohkem informatiivne on see, et osaline kõrgselektiivne väljamine kui kaevise kvaliteedi tõstmise viimane samm ei oma mõtet, sest kütvuse tühisele kasvule, ühe protsendipunkti võrra (1,60 ⇒ 1,61) kaasneb varu koguse vähenemine seitsme protsendipunkti võrra (0,58 ⇒ 0,51). Arvutustulemusi saab illustreerida, interpreteerida ja edasi töödelda tekitades graafikuid (järgnevad pildid)



Pilt 3.15 Kaevise kvaliteet ja kogus erinevate väljamisvariantide puhul



Pilt 3.16 Kaevandatava varu vähenemine seoses kaevise kvaliteeti tõstmisega

Parempoolsele graafikule on lisatud trendijoon⁹⁸. Kuna tegu on astmefunktsiooniga, mille astmenäitaja kirjeldab protsessi elastsust, siis siit saab teha järelduse, et selektiivsel kaevandamisel kaasneb kaevise kütvuse üheprotsendilisele tõusule kaevandatava varu vähenemine 1,2%. Viimane samm ehk otsustamine toimub hiljem, saadud tulemuste alusel, sest kaevise kvaliteedi tõus tõstab järgmiste protsesside - veo, töötlemise, kütmise jm tõhusust.

3.3.4. Optimeerimise kogemus

mille olen saanud kolmekümneaastase tegevuse käigus, on kokku võetav ühe lausega

optimeerimise oluline tulemus ei ole mitte optimaalne lahend, vaid töö käigus ja tulemusel saadud ettekujutus objektist ning tema käitumisest

⁹⁸ Sellised graafilised seosed maagi koguse ja *cut-off-grade* vahel on maailma mäemajanduse tavavahend.

Põhimõtteliselt ja teoreetiliselt saadakse hea optimeerimistulemus rangete formaalsete meetoditega. Kuid hea tulemus, kui see vaevanõudva töö tulemusel lõpuks saadakse, võib osutuda aegunuks ja on enamikul juhtudest paljudele üsna arusaamatu. Ajapikku kogutud seisukohad ja arvamused olen kokku võtnud järgmises tabelis.

Tabel 51 Optimeerimisest

Väide	Optimisti ⁹⁹ arvamus	Pessimisti arvamus
Tegevust, mille sihiks on parima lahenduse saamine, nimetatakse optimeerimiseks ja parimat lahendit ennast optimaalseks	Mistahes juhtimine on optimeerimine	Juhtimisel optimeerimist ei kasutata ¹⁰⁰ , juhtidel pole selleks aega
Sihifunktsioon on see, mille vähimat või suurimat väärtust otsitakse	Optimeerimine viib sihile	Sihte võib olla mitu
Tunnust, mille abil mõõdetakse lahenduse headust, nimetatakse kriteeriumiks	Kriteeriumitega võib „mängida” – mistahes piirangule võib anda kriteeriumi rolli ja vastupidi	Alati on võimalik leida häid kriteeriume, kuid puuduvad juhendid hea kriteeriumi leidmiseks
Lihntne optimeerimine saab toimuda vaid ühe kriteeriumi abil	... mida võib teha palju kordi	Ei saa hõlvata hõlmamatut ¹⁰¹
Mitmeid kriteeriume on võimalik taandada ühele	... andes kriteeriumitele vastavad kaalud; näiteks lugeda keskkonnakulu n korda olulisemaks kui kaevandamiskulu	Pole üheseid, üheselt mõistetavaid ega üldaktsepteeritavaid kriteeriumite kaalumise juhendeid ega meetodeid
On olemas multikriteeriaalse (mitmese kriteeriumi) optimeerimise meetodid	... mis lubavad leida parima lahenduse kõikide võimaluste vektorruumis	Mitmese kriteeriumi komponentide ekstremaalseid väärtusi ei ole võimalik saavutada ühe korraga. Ja peamine – sellest ei saa mitte keegi aru

⁹⁹ Terminid optimist \Leftarrow optimeerimine lubab moodustada uue mõiste pessimist \Leftarrow pessimeerimine, mis oleks tegevus, mille sihiks on halvima lahendi otsimine. Minimaks strateegias tuleks kasutada just seda menetlust.

¹⁰⁰ *Katzi* seadus *Murphi* seaduste kogust: "Inimesed ja rahvad käituvad ratsionaalselt siis, kui kõik muud võimalused on ammendatud".

¹⁰¹ Omistatud suurele vene isemõttelejale Kozma Prutkovile

