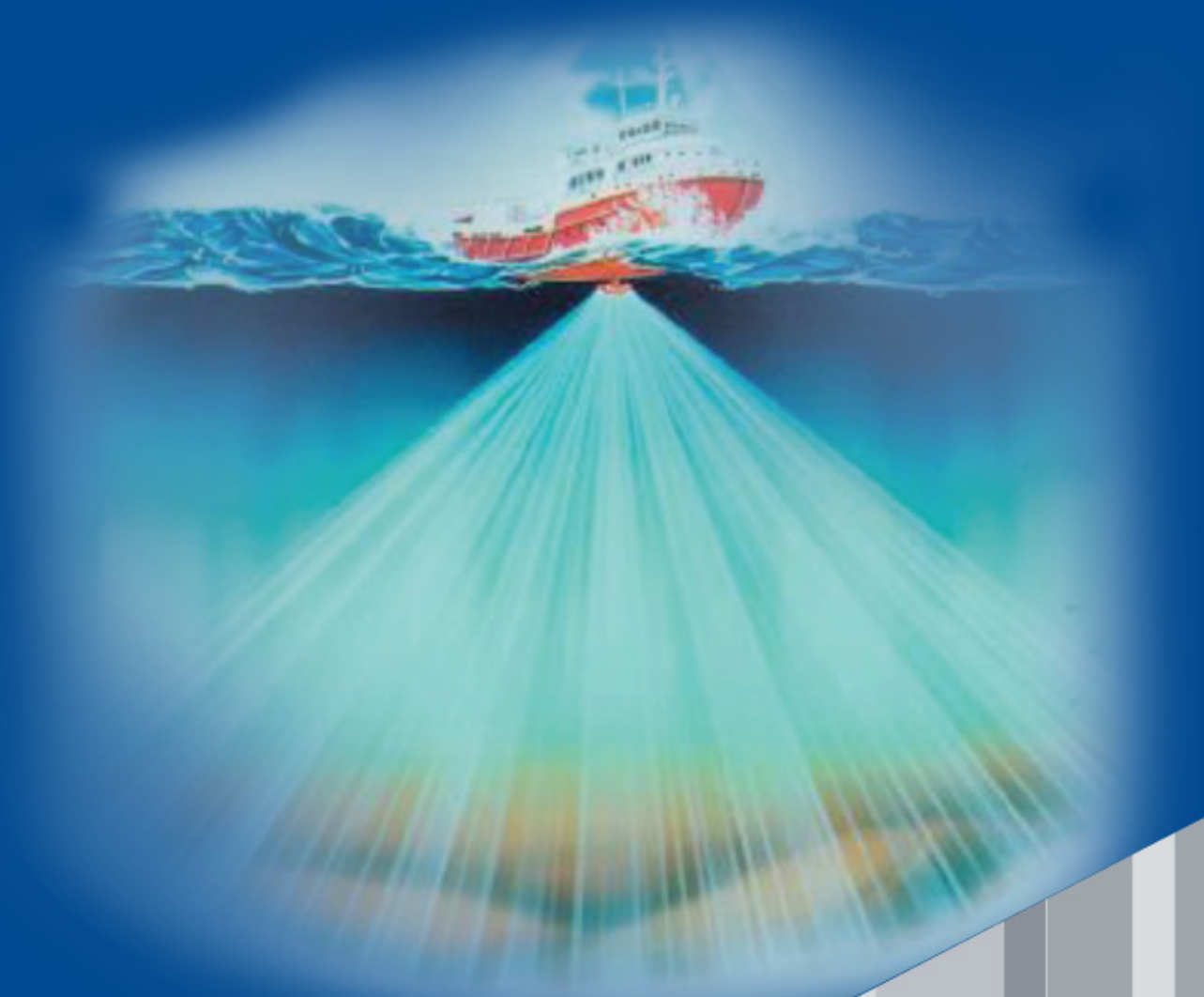
Vello Kala

HÜDROGRAAFIA ALUSED



TTÜ
EESTI MEREAKADEEMIA

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Eesti Mereakadeemia
Merenduskeskuse veeteede lektoraat

VELLO KALA

HÜDROGRAAFIA ALUSED

TTÜ KIRJASTUS

Tallinn 2018

Ilmunud riikliku programmi
“Eestikeelsed kõrgkooliõpikud 2013–2017” toetusel

Käesoleva õpiku väljaandmist toetas

Keelekorrektuur Eda Kauksi
Küljendanud ja kujundanud Tiia Eikholm

Autoriõigus: Vello Kala, 2018
ISBN 978-9985-808-64-1
ISBN 978-9985-808-59-7 (PDF)

SISUKORD

Sagedamini kasutatud tähistusi ja lühendeid 7
Eessõna 9
SISSEJUHATUS 10
Hüdrograafia ajaloost 10
Hüdrograafia partnerlusalad 17

I OSA: ALUSTEADMISED 19
1. HÜDROGRAAFIA PÕHIMÕISTEID 19
1.1. Hüdrograafia olemus 19
1.2. Hüdrosfääri, maailmamere ja maakoore lühiiseloomustus 20
1.3. Siseveekogud 21
1.4. Geomorfoloogia, pinnamood ja pinnavormid 28
1.5. Hüdrograafia ülesanded 31
1.6. Merepõhja pinnamoe moodustumine 31
1.7. Merepõhja reljeefivormid 36
1.8. Mererand ja rannik 39
1.9. Merepõhja pinnamoe näitajate esitamise viise 43
1.10. Eesti vete jääolud 46
2. HÜDROGRAAFILISTE TÖÖDE EESMÄRK JA SISU 50
2.1. Tööde eesmärk 50
2.2. Tööde sisu 50

II OSA: HÜDROGRAAFIA RUUMIANDMED 53
3. MEREGEODEESIA 53
3.1. Uurimisaine ja ülesanded 53
3.2. Meregeodeesias (hüdrograafias) kasutatavad koordinaatide süsteemid . 54
3.3. Plaanilise aluse rannapunktid 62
3.4. Plaanilise aluse merepunktid 64
4. HÜDROGRAAFILISTE TÖÖDE KÕRGUSELINE ALUS. MÕÕDETUD SÜGAVUSTE TAANDAMINE NULLSÜGAVUSELE 67
4.1. Kõrguseline alus 67
4.2. Nullsügavused 69
4.3. Merepinna kõikumise vaatlused. Keskmise veetaseme määramine tasemevaatluspostides 71
4.4. Loodenähtused 83
4.4.1. Maailmamere loodete üldmõisted 83
4.4.2. Loodete harmoonilise analüüsi alused 87
4.4.3. Madalaima teoreetilise taseme määramine ajutistes tasemevaatluspostides 92
4.5. Tasemevaatluspostide tegevusulatus 92

4.6. Parandite leidmine sügavuste taandamisel nullsügavusele 97
4.6.1. Parandite leidmine loodetega meres ühe tasemevaatlusposti piirkonnas 97
4.6.2. Üldmõisted tasemeparandite leidmisel mitme taseme-vaatlusposti järgi 100
4.6.3. Interpoleerimise analüütiline meetod 101
4.7. Parandite leidmine sügavuste taandamisel nullsügavusele loodeteta meres 102
4.8. Kajaloodi kõrguse saamine RTK GNSSi abil 104

III OSA: HÜDROGRAAFILINE MÕÕDISTAMINE JA MÕÕTEMÄÄRAMATUS 106
5. KOHAMÄÄRANGU MEETODID HÜDROGRAAFILISTEL TÖÖDEL 106
5.1. Kohamäärangu teoreetilised alused 106
5.1.1. Kohamäärangu põhinõuded 106
5.1.2. Kohamäärangu viisid ja vahendid 107
5.2. Kohamäärangu andmetöötluse analüütiline meetod 109
5.2.1. Üldised alused 109
5.2.2. Samajooned 112
5.3. Kohamäärangu täpsuse hindamine 113
5.4. Kohamäärang vahetu vaatlusega 119
5.4.1. Kohamäärang nurgalise otselõikega 119
5.4.2. Kohamäärang polaarmeetodil 121
5.4.3. Kohamäärang kauguste järgi ehk joonlõike meetod 123
5.5. Satelliitgeodeesia (GNSS-) meetodid 124
5.5.1. Üldmõisted 124
5.5.2. Absoluutne kohamäärang 126
5.5.3. Diferentsiaalne koodmõõtmine 126
5.5.4. Reaalajas kinemaatiline mõõtmine 127
5.5.5. Staatiline mõõtmine 129
5.5.6 Kiirstaatiline mõõtmine 130
5.5.7. GNSS ja inertsiaalsüsteemid 130
5.6. Veealune akustiline kohamäärang 131
5.6.1. Pikkade baasjoonte meetod 131
5.6.2. Lühikeste baasjoonte meetod 132
5.7. Liitsihijoone arvutus Mercatori (normaal-) projektsioonis 133
5.8. Kiirtevõrgu arvutamine ja joonestamine 135
5.9. Üleminek ortodroomilt loksodroomile Mercatori projektsioonis 137
6. MEREPÕHJA PINNAMOE MÕÕDISTAMISE SEADMED 141
6.1. Üldmõisted 141
6.2. Ühekiirelised kajaloodid 142
6.3. Helikiire (impulsi) suuna ja laiuse reguleerimine 147
6.4. Mitmekiirelised kajaloodid 149
6.4.1. Kiiremoodustajad süsteemid 149

6.4.2. Interferomeetrilised süsteemid 155
6.4.3. Kajatraalid 161
6.5. Külgvaatesonarid 162
6.6. Mere hüdrograafilise mõõdistamise metoodika 164
7. SÜGAVUSE MÕÕTEMÄÄRAMATUSE ALLIKAD 168
7.1. Hälvete põhjused 168
7.2. Heli tegeliku vertikaalkiiruse ja arvutusliku väärtuse erinevustest tingitud sügavuse hälbed 168
7.3. Refraktsioonist tingitud hälbed 169
7.4. Aja ebatäpsest mõõtmisest ja nulliaseme hälbest tekkiv sügavushälve 171
7.5. Akustilistest antennidest tingitud sügavushälbed 172
7.6. Merepõhja kaldest tingitud sügavushälve 175
7.7. Laeva kõikumisest tekkiv sügavushälve 176
8. KAJALOODIGA MÕÕDETUD SÜGAVUSTE PARANDITE MÄÄRAMINE JA TÄPSUSE HINDAMINE 180
8.1. Üldise sügavusparandi määramine 180
8.2. Kajaloodi parandite määramine tareerimisega 180
8.3. Kajaloodi parandite määramine osaparandite summeeri-mise teel 182
8.4. Kajaloodiga mõõdetud sügavuse mõõtemääramatus 196
8.5. Kaardil märgitud sügavuste mõõtemääramatus 199
8.6. Lehvikkajaloodide antennide kalibreerimine 200
8.6.1. Kohamäärangu hilistuse test 201
8.6.2. Pikiõõtsumise hälbe test 201
8.6.3. Asimuudilise hälbe test 202
8.6.4. Rullumise hälbe test 204
8.6.5. Lehvikkajaloodide antennide kalibreerimise kokkuvõte 205
9. MEREPÕHJA RELJEEFI MÕÕDISTAMINE 207
9.1. Mõõdistamise viisid 207
9.2. Mõõdistamise üksikasjalikkuse kavandamise printsiibid 211
9.3. Geomorfoloogiline printsiip 213
9.4. Tõenäosusprintsiip 216
9.5. Halsside rajamine 219
9.6. Halsside rajamise viisid ja täpsus 221
9.7. Mõõdistusplanšetid 226

IV OSA: ANDMETÖÖTLUSE ALUSED 236
10. MÕÕDISTUSTULEMUSTE TÖÖTLEMINE 236
10.1. Andmetöötluse üldmõisted 236
10.2. Kajaloodi antenni ja kohamäärangu punkti erinevustest tingitud parandite *dx* ja *dy* leidmine 238
10.3. Üldmõisted andmetöötlusest automatiseeritud mõõdistussüsteemi abil 239
10.4. Digitaalse reljeefimudeli üldmõisted 242
10.5. Digitaalkaardi üldmõisted 246

11. MEREPÕHJA RELJEEFI KUJUTAMINE 249
11.1. Merepõhja reljeefi kujutamine väikese mõõtkavaga kaartide koostamisel 249
11.2. Šelfi reljeefivormide tuvastamine planšetil 251
11.3. Reljeefi kujutamise moonutused ja nende kõrvaldamine 256
11.4. Reljeefi lõplik kujutamine 256
11.4.1. Struktuurijoonte moodustamine 256
11.4.2. Lõplike isobaatide moodustamine ja nende jooniste tüpiseerimine 258
11.5. Mõõdistamise kvaliteedi hindamine 260
11.5.1. Mõõdistamise kvaliteedi näitajad 260
11.5.2. Mõõdistamise kvaliteedi näitajate hindamine 264
V OSA: ERITÖÖD 269
12. MEREPÕHJA RELJEEFI AERO¬MÕÕDISTAMINE 269
12.1. Aerofotomõõdistamine 269
12.2. Aerolasersondeerimine 271
13. HÜDROGRAAFILINE TRAALIMINE 273
13.1. Hüdrograafilise traalimise eesmärgid ja vahendid 273
13.2. Traalimise plaaniline põhitamine 276
13.3. Traalimise kõrguslik põhitamine 278
13.4. Oletatavate navigatsiooniohtude otsimine 280
14. MEREPÕHJA PINNASE MÕÕDISTAMINE 282
14.1. Merepõhja pinnaste iseloomustus ja liigitus 282
14.1.1. Üldmõisted 282
14.1.2. Merepõhja pinnaste iseloomustus 282
14.1.3. Merepõhja pinnaste liigitus omaduste järgi 284
14.2. Merepõhja pinnase mõõdistamise meetodid 284
15. JÕEPÕHJA RELJEEFI MÕÕDISTAMINE 289
15.1. Jõgede morfoloogilised iseärasused 289
15.2. Mõõdistustööde koosseis 290
15.3. Mõõdistamise kõrguslik põhitamine 294
15.4. Jõgede hüdraulika uuringud 302
15.4.1. Üldmõisted 302
15.4.2. Ristprofiilid vesiehitiste juures 304
15.4.3. Ristprofiilide mõõdistamise täpsusnõuded 305
Kasutatud kirjandus 306
Aineregister 310

Sagedamini kasutatud tähistusi ja lühendeid

AIS – automaatne tuvastussüsteem (*automatic identification system*)

ALS – aerolasersondeerimine

AMS – automaatne mõõdistussüsteem

AUV – autonoomne allvee-uurimisaparaat (*autonomous underwater vehicle*)

DGNSS – diferentsiaalsed globaalsed satelliit-navigatsioonisüsteemid

DGPS – diferentsiaalne globaalne kohamäärangu süsteem

ECDIS – elektronkaartide kuva- ja infosüsteem (*electronic chart display and information system*)

EGNOS – Euroopa geostatsionaarne navigatsiooni tugisüsteem (*European Geostationary Navigation Overlay Service*)

ELS – eesmine liitsihimärk

ETRS89 – Euroopa Terrestriline Referentssüsteem (*European Terrestrial Reference Frame*)

GIS – geoinfosüsteem (*geographic information system*)

GLONASS – globaalne satelliitnavigatsioonisüsteem Venemaal

GNSS – globaalsed satelliitnavigatsioonisüsteemid (*Global Navigation Satellite Systems*)

GPRS – GSM-võrgu raadioside teenuse üldpakett (*General Packet Radio Service*)

GPS – globaalne kohamäärangu süsteem (*Global Positioning System*)

GRS-80 – geodeetiline taustsüsteem, kehtestatud 1980 (*Geodetic Reference System*)

HHW – kõrge kõrgvesi (*Higher High Water*)

HLW – kõrge madalvesi (*Higher Low Water*)

IHO – Rahvusvaheline Hüdrograafiaorganisatsioon (*International Hydrographic Organization*)

IMO – Rahvusvaheline Mereorganisatsioon (*International Maritime Organization*)

IMU – inertsiaalne mõõtmismoodul (*Inertial Measurement Unit*)

ITRS – Rahvusvaheline Terrestriline Referentssüsteem (*IERS Terrestrial Reference System*)

KRH – keskmine ruuthälve ehk standardhälve

LAT – madalaim astronoomiline tase (*Lowest Astronomical Tide*)

LHW – madal kõrgvesi (*Lower High Water*)

LLW – madal madalvesi (*Lower Low Water*)

MBES – mitmekiireline kajalood (*Multi Beam Echo Sounder*)

MBSS – mitmekiireline sonarisüsteem (*Multi Beam Sonar System*)

MTS – maksimaalse tundlikkuse suund

MSL – keskmine meretase (*mean sea level*)

MWL – keskmine veetase (*mean water level*)

NM – meremiil (*nautical mile*)

OTF – RTK GPSi algtundmatute kiirlahendamine „lennult“ (*On-the-Fly*)

PDBS – faasimõõtja kajalood ehk interferomeetriline mitmekiireline kajalood (*Phase Differencing Bathymetric Sonars*)

PDOP – asukoha määramise täpsuse vähenemine (*Positional Dilution of Precision*)

RINEX – vastuvõtjast sõltumatu vahetusformaat (*Receiver Independent Exchange Format*)

RNS – raadionavigatsioonisüsteem

RTCM – Mereteenistuse Raadiotehniline Komisjon (*Radio Technical Commission for Maritime Services*)

RTK GPS – reaalajas kinemaatiline GPS

SAS – sünteesapertuuriga kajalood

SBES – ühekiireline kajalood (*Single Beam Echo Sounder*)

SNR – signaali-müra suhe (*Signal to Noise Ratio*)

SOLAS – rahvusvaheline konventsioon inimelude ohutusest merel

(*International Convention for Safety of Life at Sea*)

TIN – trigonaalne korrapäratu võrk (*Triangular Irregular Network*)

TKM – täielik kõrguslik määramatus (*Total vertical uncertainty*)

TLS – tagumine liitsihimärk

TPM – täielik plaaniline määramatus (*Total horizontal uncertainty*)

TVP – tasemevaatluspost

TUV – pukseeritav allvee-uurimisaparaat (*Towed Underwater Vehicle*)

UNCLOS – ÜRO mereõiguse konventsioon (*The United Nations Convention on the Law of the Sea*)

USGS – USA geoloogiainspektsioon (*U.S. Geological Survey)*

VRS – virtuaalne referentsjaam (*Virtual Reference Station*)

VTS – laevaliiklusteenindus (*vessel traffic service*)

VTSP – veetaseme sidumispunkt

WAAS – USA lai-ala satelliidipõhine GPSi tugisüsteem (*Wide Area Augmentation System*)

WGS-84 – ülemaailmne geodeetiline süsteem (kehtestatud 1984. a)

(*World Geodetic System*)

ПЗ90 – Maa parameetrid, sätestatud Venemaal 1990. a (*Параметры Земли 90*)

Eessõna

Käesolev õpik on mõeldud Tallinna Tehnikaülikooli Mereakadeemia veeteede ohutuse eriala üliõpilastele, kuid see võib olla kasulik ka laevajuhtimise õppesuuna üliõpilastele. Iseseisva töö hõlbustamiseks on mitmeid näidisülesandeid. Olulisemate terminite puhul on lisatud nende ingliskeelsed vasted. Arvutusülesannetes on kasutatud viiteid Windows 10-le. Õpiku kirjutamisel on silmas peetud hüdrograafiaspetsialistidele esitatavaid IMO (*International Maritime Organization)* ja IHO (*International Hydrographic Organization)* nõudeid.

Kajaloodidest on õpikus valdavalt käsitletud ühekiirelisi, kuna nende puhul on sügavuste mõõdistamise teoreetilised alused arusaadavamad.

Arvestades ekspertkomisjoni otsust õpiku kohta (nr 020316) on käsikirjas tugevasti vähendatud kiiresti muutuvate tehniliste teemade osa (konkreetsete mõõdistusinstrumentide kirjeldused ja töö nendega ning andmetöötlusprogrammide kasutamine) eeldusel, et neid vaadeldakse õppepraktika käigus selleks spetsiaalselt koostatud õppematerjalide abil. Lisatud on Eesti ja Läänemere piirkonna iseärasusi kajastavaid teemasid.

Tänapäeva tähtsaimast kohamääranguviisist GNSS on tutvustatud ainult kõige olulisemat, sest Mereakadeemia kõrgema geodeesia kursuses käsitletakse seda teemat laiemalt. Ka on saadaval Andres Rüdja ja Janika Sanderi väga põhjalik digiõpik „Globaalne asukohamääramine" (2013).

Käesolev õpik võib olla abiks ka praktiseerivatele insener-hüdrograafidele ja teistele laevasõidu ohutuse vallas töötavatele spetsialistidele, samuti vesiehitiste projekteerimise, rajamisega ja ekspluatatsiooniga tegelevatele ehitusinseneridele.

Autor avaldab sügavat tänu retsensentidele professor Jüri Elkenile TTÜ meresüsteemide instituudist, doktor Peeter Välingule Veeteede Ametist ja kõigile teistele asjalike märkuste ja heade soovituste eest õpiku koostamisel.

SISSEJUHATUS

HÜDROGRAAFIA AJALOOST

Vanaaegseid purjetamise juhendeid nimetati *periplus*eks. Vanim säilinud juhend on nn Euthera (vanade kreeklaste Punase) mere *periplus*, mis koostati aastatel 95...130 ja mis hõlmas Punast merd ning kogu tollel ajal tuntud India ookeani osa. Algul oli see juhend vajalik laevade jaoks, millega transporditi elevante Punase mere rannikult Egiptuse pealinna Memphisesse, et varustada Ptolemaioste armeed sõjaelevantidega. Edaspidi, kui Egiptus oli muutunud Rooma provintsiks, kasutasid seda juhendit kaubalaevad, mis sõitsid kuni Gangese suudmeni. Gangsest kirjeldati nii: „India suurim jõgi ja sellel on kaubanduskeskus, mis ekspordib aromaatilisi õlisid, pärle ja väga head musliini. Jõest allpool ookeanis on saar, viimane asustatud maa idas, seda kutsutakse Khruse ja seal on parimad kilpkonnakilbid Euthera meres."

Meremehed on kasutanud graafilisi kaarte (papüürus, pärgament, paber) juba 700 aastat. Esimesed teated pardakaardist on aastast 1270. Nimelt märgitakse Prantsuse kuninga Louis IX (Püha) eluloos, et sõites 8. ristisõtta, kandnud torm ta laeva kaugesse sadamasse. Seal, soovides teada laeva asukohta, näidanud meremehed talle kaarti, mille järgi olid nad Cagliaris.

Vanim säilinud kaart on nn Carte Pisane (Pisane'i perekonna järgi, kelle valduses see oli), mis on joonistatud pärgamendile 13. sajandi lõpul tõenäoliselt Genuas ja kujutab endast portolaani.[1]

Hiina admiral Zheng He sooritas alates 1405. a mitu suurt mereekspeditsiooni Hiinasse, Malaisiasse, Sri Lankale, Indiasse, Pärsia lahe ja Aafrika idarannikule ning tõenäoliselt purjetas vähemalt korra ümber Hoorni neeme. Mõnedel andmetel avastanud ta ka Austraalia ligi 100 aastat enne eurooplasi. Tema ekspeditsiooni materjalide põhjal koostati suur ribakaart (pikkusega 6 m ja laiusega 20 cm) Nankingi ja Aafrika vahel (7500 miili), millel oli kujutatud rannajoont, madalaid, sadamaid ja rannikumägesid navigatsiooniorientiiridena.

Pärast trükikunsti leiutamist Euroopas avaldas Pierre Garcie Rouenist 1502. a esimesed trükitud purjetamisjuhised, sisuliselt midagi lootsiraamatu taolist, mis olid illustreeritud lihtsate puulõigetega.

---

[1] Portolaan – kompasskaart, kujutab võimalikult täpselt eeskätt rannajoont. Kaardivõrguna kasutati mitmest suvalisest punktist kantud (igaühest) 32 rumbijoont, mis olid orienteeritud kompassi järgi. Karid olid näidatud ristidega (nagu tänapäevalgi), aga sügavusi kaardil ei olnud. Portolaani miil vastas umbes 5830 m.

1555. a anti Roomas välja Uppsala peapiiskopi Olaus Magnuse Skandinaavia ajalugu, milles muuhulgas käsitleti sadamaid ja navigatsiooni.

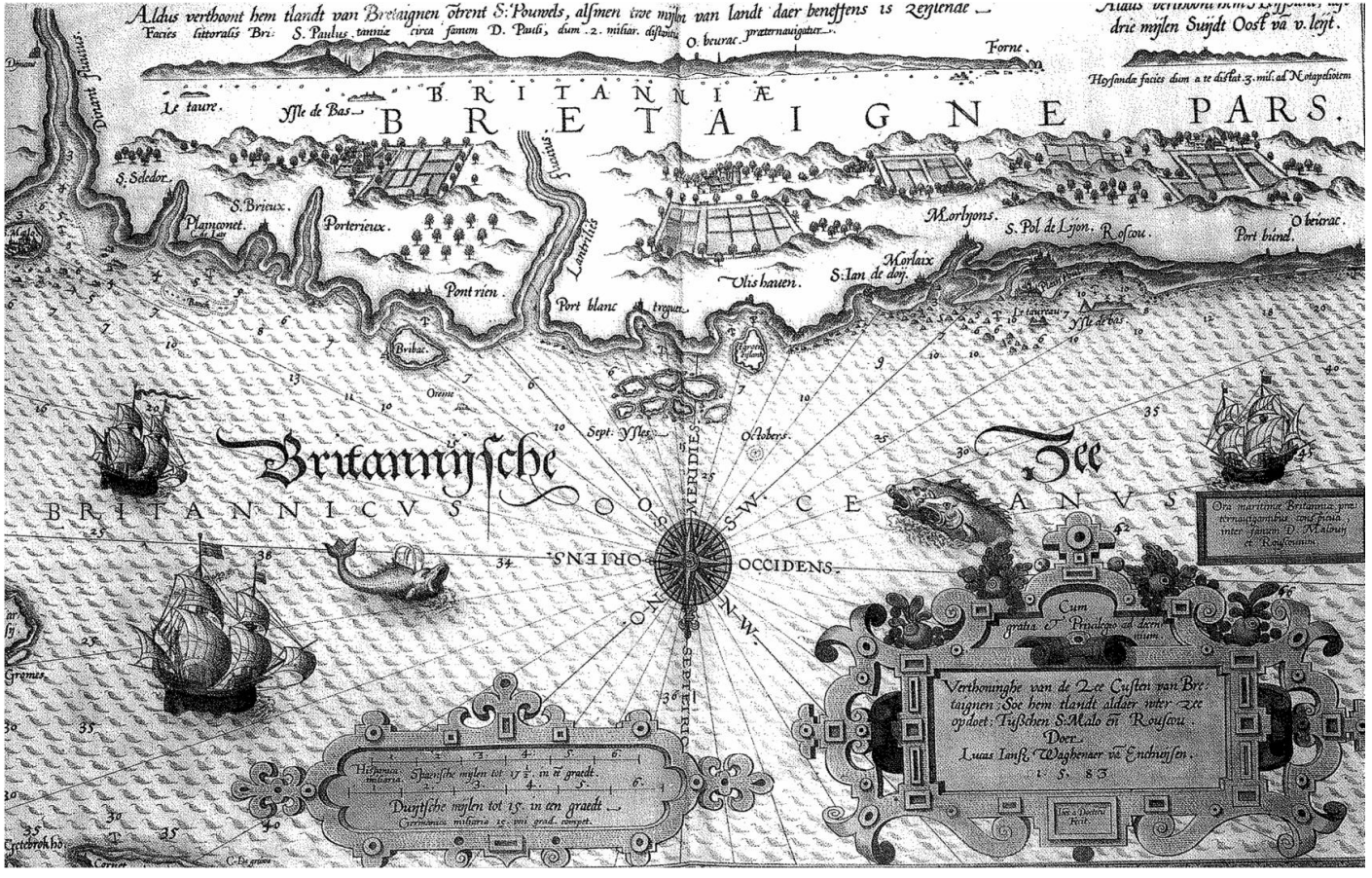
Seal kirjeldati küll ka olematuid merekoletisi nagu leviaatan, kuid jagati ka vajalikke õpetusi meremeestele, näiteks kuidas valida ankrupaika. Teos koosnes 22 raamatust ja sisaldas portolaani *Carta Marina Scandinavia* (vt joon. 1).

16. sajandil oli tähtis hüdrograafiakeskus Prantsusmaa sadamalinn Dieppe. Alates 1530. a töötas seal laevajuhina šoti emigrandi poeg Jean Rotz. Hiljem koostas ta üheksa piirkondlikku merekaarti (portolaani), millel oli märgitud rannajoon, saared, rahud ja madalad. Väikeste skitsidega oli näidatud ka tegevusalasid, tööstusi ja asulaid.

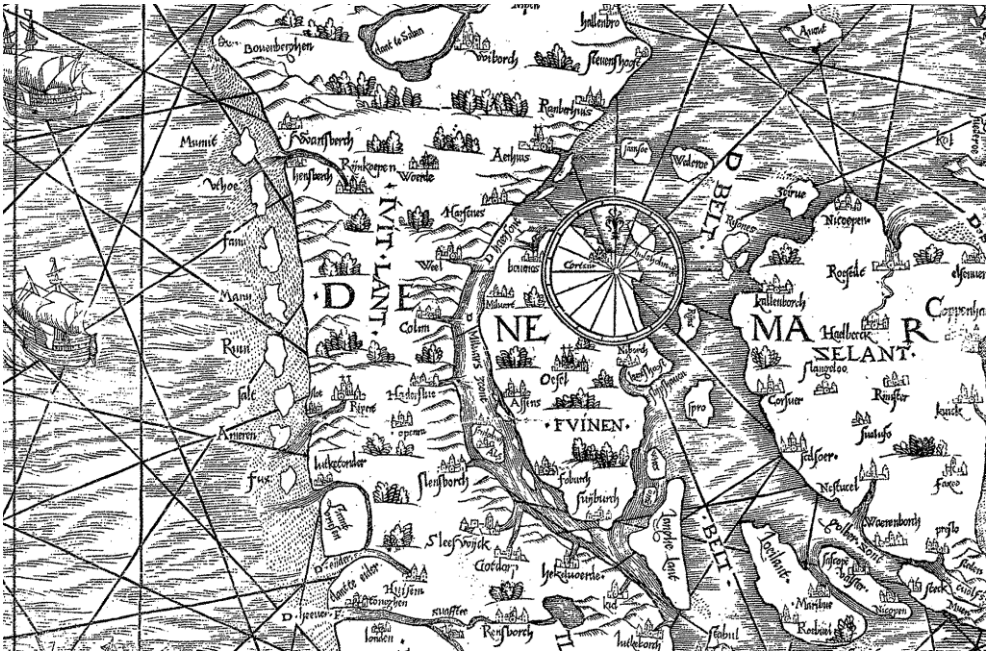
Kaardid, millel oli kujutatud kõik tollel ajal tuntud mered, koondati atlasesse *Boke of Idrography*, mis lisaks sisaldas ka purjetamisjuhiseid. Kaartide iseärasuseks oli see, et lõunakaar oli ülal. 10 laiuskraadi võrdus kaardil 123 mm. 1540. aastal õppis Rotz Pariisis navigatsiooni, kuid paari aasta pärast lahkus ta Inglismaale, kus kuningas Henry VIII oli hakanud arendama oma laevastikku. Viimane nimetas Rotzi Kuninglikuks Hüdrograafiks. Tema ülesandeks jäi Lõuna-Inglismaa sadamate kaardistamise järelevalve. Henry VIII surma eel pöördus Rotz Prantsusmaale tagasi.

14. ja 15. sajandil purjetasid Loode-Euroopa laevakaptenid piki randa, järgides magnetkompassi abil kurssi ühelt neemelt või maaninalt teisele. Neid kursiandmeid koos loodimisinfoga pärandati isadelt poegadele või koguti kaaskaptenitelt. Väga sageli jäädvustati need andmed isiklikus märkmeraamatus, merekaarte ei tuntud. Kui Vahemere laevasõitjad tulid 14...15. sajandil Flandriasse ja Inglismaale villa ostma, nimetasid kohalikud laevamehed nende portolaane kasututeks lambanahkadeks. Andekas Amsterdami joonestaja Cornelius Anthonisz koostas ja avaldas 1544. a *Caerte van die Ostersee,* mis kujutas endast veel nn lugemiskaarti, st midagi tänapäevase lootsiraamatu taolist. Saanud informatsiooni sadamalootsidelt ja laevakaptenitelt, kes sõitsid Hansa Liidu sadamate vahel, avaldas Antonisz hiljem esimese väikesemõõtkavalise merekaardi *Caerte van Oostland* (vt joon. 2). Ta võttis portolaanidelt rumbiringid, kasutas Ptolemaiose projektsiooni algmeridiaaniga läbi Kanaari saarte ja kandis kaardiraamile laiuskraadid. (Ptolemaios oli kasutanud pseudokoonilisel projektsioonil põhinevat kaardivõrku.)

Ligikaudu samal ajal, kui ilmus *Caerte van Oostland*, alustas Hollandis tegevust noor laevajuht Lucas Jansz(oon) Waghenaer. Käies kaugsõitudel nii Arktikas kui ka Vahemeres, kohtus ta ka kohalike navigaatoritega, tutvus nende navigatsioonimeetodite ja portolaanidega. Lõpetanud 1579. a meresõidud, jäi ta sadama maksukogujaks ja töötas ühtlasi ka kaardivalmistajana.



Joonis 1. Väljavõte Olaus Magnuse Skandinaavia ja selle ümbruse merede portolaanist [Ritchie, 2003]

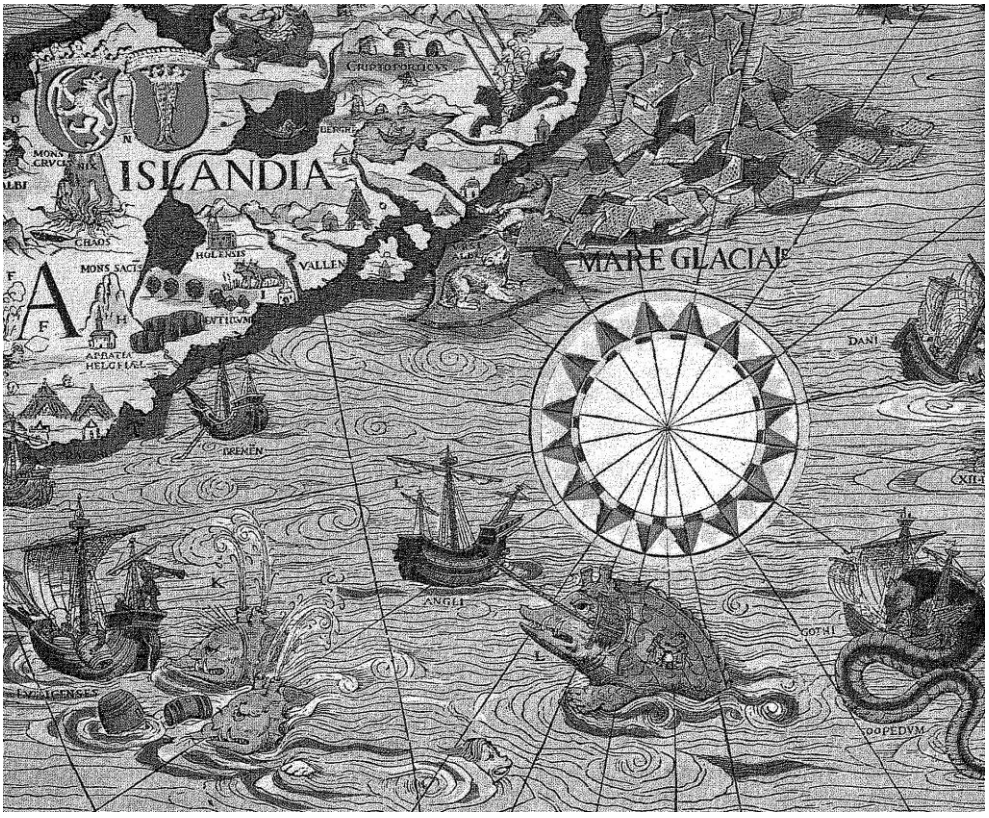


Joonis 2. Väljavõte C. Anthonisze merekaardist *Caerte van Oostland* [Ritchie, 2003]

1584. a andis Waghenaer välja esimese osa oma mereatlasest *Spieghel der Zeevaerdt* (Mere peegel), mis koosnes 23 portolaanist. Atlase sissejuhatus sisaldas 33 lehekülge navigatsioonikunstist. Portolaanid olid mõõtkavas ligikaudu 1:370 000, ilma laiuskraadide skaalata, kuid neile oli märgitud Taani, Hispaania ja Inglise kolmikmiilide (*league*) arv (vastavalt 15, 17,5 ja 20) ühe laiuskraadi kohta (vt joon. 3).

L. J. Waghenaeri kaartidel_oli uudne see, et neil oli näidatud ranna iseloom, rannanõlva ohtlikud karid (ristid tähistasid veealuseid karisid) ja madalad ning leetseljakud (punktiir), mere sügavus, sadamad (ankur). Samuti kasutas ta meremärkide, tuletornide, tuuleveskite ja kirikute leppemärke. Waghenaeri kaardid olid esimesed, mille oli koostanud elukutseline meremees teistele meremeestele, ja neid trükiti ümber ka Inglismaal ja Saksamaal, kusjuures need olid nõutud veel 100 aastat hiljemgi.

1569. a avaldas saksa geograaf Gerhard Kremer (Gerardus Mercator) oma maailmakaardi, mille projektsioon hakkas kandma tema nime – Mercatori projektsioon. Kahjuks ei osanud meremehed mõista projektsiooni eeliseid ja nii lükkus selle kasutamine edasi peaaegu 120 aastat, kuni Prantsusmaal avaldati 1689. a Mercatori projektsioonis suur mereteede atlas *Le Neptune Françiois*.



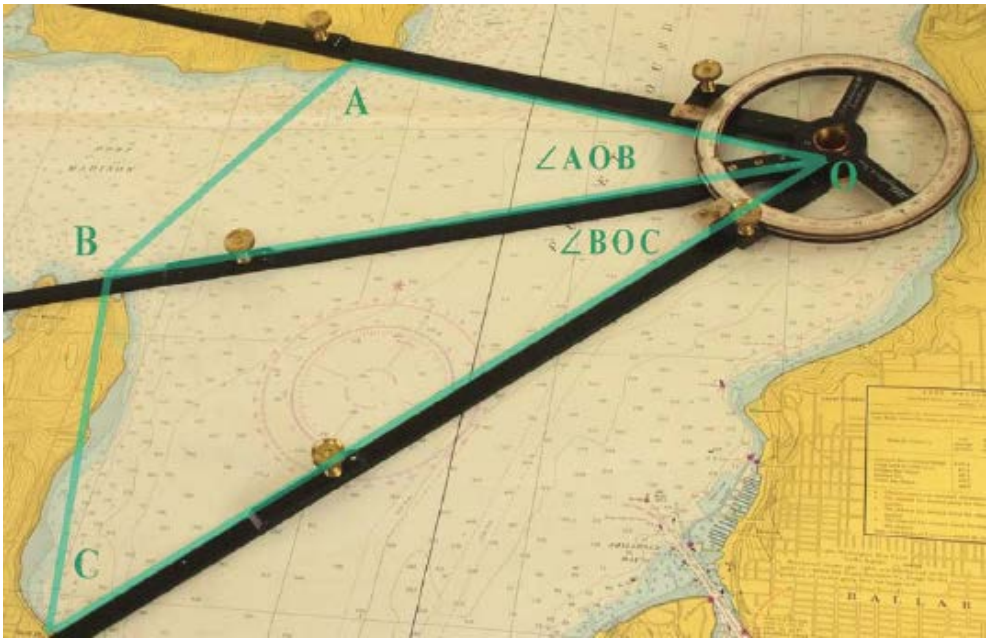
Joonis 3. Väljavõte L. J. Waghenaeri mereatlasest. Prantsusmaa rannik St. Malo saarest ja linnast lääne suunas. NB! tüüpiliselt portolaanidele on ka siin põhja suund all. [Ritchie, 2003]

Atlas koosnes 29 rannamere kaardist alates Norrast kuni Gibraltari väinani. Kaartidel oli märgitud rannajoon, sadamad, soovitatavate mereteede sügavus, madalad, ohtlikud kaljud ja muu ohutuks navigatsiooniks vajalik teave. Võrreldes varasematega olid need kaardid palju täpsemad tänu mitmele asjaolule. Esiteks oli Pariisi observatooriumi direktor J. D. Cassini avastanud meetodi geograafilise pikkuse määramiseks Jupiteri kaaslaste varjutuste järgi, koostades selleks 1668. a ka efemeriidid. Nende abil määras astronoom J. Picard paljude rannapunktide geograafilised koordinaadid. Teiseks oli hulk rannapunkte seotud riikliku triangulatsiooniga, mida sooritasid J. D. Cassini ja tema poeg J. Cassini de Thury. Sel moel koostatud kaardid näitasid Prantsusmaa Atlandi ookeani ranniku tugevat taanet. Kuningas Louis XIV märkis, et tema astronoomid on läänes kaotanud rohkem maad, kui sõdurid on suutnud idas juurde võita. Kuna meremehed polnud Mercatori projektsiooniga harjunud, ei tahtnud nad algul seda atlast kasutada, seetõttu andis Prantsusmaa mereminister välja vastava määruse. Varsti muutus aga atlas populaarseks ja ilmusid isegi selle piraatkoopiad Hollandis, Inglismaal ja ka Prantsusmaal. Seega ei ole üllatav, et just Prantsusmaal asutati maailma esimene riiklik hüdrograafiaamet esi-

algse nimega *Le Depôt general des cartes et plans* (Kaartide ja plaanide peadepoo), mis 1886. a nimetati *Service Hydrographique de la Marine.* (Mere hüdrograafiateenistus).

Veidi hiljem tegi olulise uurimistöö tuntud astronoom Edmond Halley (tema järgi on nimetatud ka üks suur komeet), kes esimesena uuris (1698...1701) raataglasega kuunaril *Paramore* kompassi deklinatsioone Atlandi ookeanil. Kohe pärast seda sai ta ülesande uurida loodehoovusi Inglise kanalis. Uurimistöö tulemused jõudsid 1702. a vastavale portolaanile, millel oli märgitud hulk ida-ja läänesuunalisi loodehoovusi, kõrgvee ajad ja idahoovuse lõpp täis- ja noorkuu ajal. Nooltega oli tähistatud idasuunaliste loodehoovuste suund ja tugevus.

Inglismaa põhjatipus asuvate Orkney saarte karidel oli juhtunud palju laevaõnnetusi. Näiteks 1740. a uppus seal Ida-India Kompanii laev *Svecia*, kusjuures hukkus 60 meremeest ja hävis kaupu 200 000 £ eest. Kohalik maaomanik ja aseadmiral J. Douglas Mortoni krahv kutsus Edinburghi ülikooli professori C. Maclaurini soovitusel M. Mackenzie mõõdistama seda väga ohtlikku Orkney saari ümbritsevat mereala. Tööd algasid 1744. Selleks rajati esmalt saarte mägede tippudele triangulatsioonivõrk, mis oli tol ajal oluline uuendus rannamere mõõdistamisel (varem oli seda kasutanud ainult Cassini). Võrk kanti tõenäoliselt omaleiutatud **protraktori** (*station pointer*) (joon. 4) abil planšetile.



Joonis 4. Protraktor [van Poelje, 2013]

Navigatsiooniohtude asukohad määrati maismaalt teodoliidiga lõigete meetodil või merelt sekstandiga, viseerides triangulatsioonipunktidele. Sügavuspunktide asukohad määrati peilingutega triangulatsioonipunktidele. Protraktor ja **sekstant** (viimase leiutas 1730. a John Headly, varem tarvitati selle primitiivsemat prototüüpi **kvadranti**) olid kaks leiutist, mille tähtsust hüdrograafias võib võrrelda kajaloodi leiutamisega 20. saj algul, elektroonilise (raadiolainete abil) kohamäärangu süsteemi kasutuselevõtuga sama sajandi neljakümnendatel aastatel ja satelliitgeodeesia rakendamisega kaheksakümnendatel aastatel.

Nagu eespool mainitud, asutati esimene riiklik hüdrograafiaamet Prantsusmaal. Tänapäevane ülemaailmne hüdrograafiateenistuste juhtimine ei toimu sealt kaugel. Võib väita, et aluse pani sellele vürst Albert I, kes valitses Monaco vürstiriiki 1889–1922. Noorpõlves oli tulevane vürst läbinud mereteenistuse alamleitnandina Hispaania mereväes. 1873. a külastas ta Inglismaad ja ostis väikese kuunari *Hirondelle*, millele järgnesid *Princesse Alice, Princesse Alice II ja Hirondelle II*. Seilates nendega Vahemerel ja Põhja Atlandil, tegi ta okeanograafilisi uuringuid kuni 1915. a. Suur hulk tema kogutud okeanograafilisi eksponaate asub Albert I rajatud okeanograafiamuuseumis Monacos.

1899. a võttis ta osa VII rahvusvahelisest geograafiakongressist Berliinis, kus koostati kava mandrilavavälise ookeanideala kaardistamiseks. Vastav komisjon kogunes Wiesbadenis 1903. a vürst Alberti eesistumisel. Tema ettepanekul hakati organiseerima ja finantseerima ookeanide batümeetrilise üldkaardi koostamist. Selleks kasutati Admiraliteedi kaartide, transookeani kaablipaigalduslaevade, aga ka vürsti enda süvavee loodimise andmeid. Sügavused olid saadud F. Lucase või lord Kelvini konstrueeritud mehaaniliste loodidega. Kaart koostati mõõtkavas 1:10 000 000 Mercatori projektsioonis 20 lehel. Seitse joonestajat tegid seda kaarti seitse kuud. Kaart esitati VIII rahvusvahelisele geograafiakongressile Washingtonis 1904. a.

Juba enne Esimest maailmasõda olid paljude maade hüdrograafid jõudnud seisukohale, et rahvusvaheline kooperatsioon oleks kasulik erialasele informatsioonivahetusele ning kaartide standardiseerimisele. 1919. a juunis kutsuti Inglise ja Prantsuse hüdrograafide initsiatiivil Londonis kokku rahvusvaheline hüdrograafiakonverents, kus oli esindatud 22 riiki. Konverentsi lõppresolutsioonis otsustati hulk kaartide standardiseerimisga seotud küsimusi ja moodustada rahvusvaheline hüdrograafiabüroo (IHB). Riikide hüdrograafid koondusid rahvusvahelisse hüdrograafiaorganisatsiooni (IHO). Vürst Albert I annetas hüdrograafiabüroole hoone Monacos, mis on IHO keskuseks siiamaani.

HÜDROGRAAFIA PARTNERLUSALAD

Meretransport

Üle 80% rahvusvahelisest kaubandusest kasutab meretransporti, mistõttu merekaubandus on riikide majanduse alus. Paraku on palju sadamaid ja laevateid, mille kohta puuduvad adekvaatsed merekaardid.

Laevanduses on väga oluline tagada ohutu liiklemine. Puudulikult kaardistatud alad võivad põhjustada ümbersõitude tõttu vajalikust pikemaid reise ja takistavad suuremate laevade kasutamist, tõstes nii transpordi maksumust.

Rannatsooni haldamine

Rannatsooni haldamine tähendab uute sadamate ja kanalite rajamist ja olemasolevate rekonstrueerimist, oluliste laevateede süvendustöid, rannatsooni erosiooni kontrolli, kasulike kaeviste kaevandamist. Kõik nimetatud tegevused nõuavad projekteerimiseks vajalike lähteandmete saamiseks piirkonna suuremõõtkavalist mõõdistamist. Kuna rannatsoonis võivad toimuda kiired muutused, peab uuritavat piirkonda sageli üle mõõtma**.** Hüdrograafilist informatsiooni kasutavad enamasti meremehed, kuid seda vajavad ka riiklikud ametkonnad, rannaalade kinnisvaraga tegelejad, insenerid ja teadlased.

Mereressursside uurimine ja ekspluateerimine

Hüdrograafiaametite aastakümnete jooksul kogutud andmebaas on vajalik ohutu navigatsiooni tagamiseks, kuid sellel on ka väga suur majanduslik tähtsus mereressursside kasutamise juhtimisel. On selge, et ebaadekvaatne hüdrograafiateenistus tõkestab merekaubanduse kasvu.

Ranna- ja avameresetete alad võivad sisaldada vajalike mineraalide lasundeid, näiteks süsivesinikke (nafta, gaasid). Kui see on leidnud tõestust, tuleb merepõhja põhjalikult uurida (puurplatvormide ja torustike paigutuse jms seisukohalt). Hüdrograafiateenistuse kogutud batümeetrilised andmed, loodete iseloom, meteoroloogiline info on väga vajalikud süsivesinike uuringu jaoks.

Ka kalandusel on suur tähtsus rahvuslike majandusväärtuste loomisel. Kalurid ei vaja hüdrograafilist informatsiooni mitte ainult ohutuks laevasõiduks, vaid ka kalavõrkude panemiseks, püügialade määramiseks, et teada, kus kalastus on piiratud või keelatud.

Loodushoid

Ohutu ja täpne navigatsioon on oluline faktor loodushoiu jaoks. Reostuse majanduslik kahjum, mida põhjustavad laevavrakid ja õlilekked, võib ulatuda isegi ühe intsidendi puhul miljarditesse dollaritesse. 1992. a tunnistas ÜRO loodushoiukonverents, et „hüdrograafiline kaardistamine on navigatsiooniohutuse jaoks eluliselt tähtis“.

Mereteadus

Mereteadus oleneb suuresti batümeetrilisest teabest. Globaalsed, regionaalsed ja kohalikud loodete ja vee tsirkulatsiooni mudelid, meregeoloogia ja geofüüsika ning paljud muud mereteaduse aspektid olenevad hüdrograafiateenistuse sooritatud batümeetriast. Ka ruumiliste andmete infrastruktuuris on hüdrograafial tähtis koht.

Merepiiride määratlemine

Merepiiride õigeks määratlemiseks on vaja põhjalikke hüdrograafilisi andmeid, nagu on sätestatud ÜRO mereõiguse konventsioonis (UNCLOS III).

Riigikaitse merel

Sõjalaevastikud on üks suuremaid merekaartide kasutajaid. Mereteave, mille eest kannab hoolt iga riigi hüdrograafiaamet, peaks toetama kõiki laevastikuoperatsioone. Näiteks pealvee-, allvee- ja miinitõrjeoperatsioonid vajavad väga erinevat mereteavet. Hüdrograafiliste ja okeanograafiliste andmete saamiseks vajaminevad summad tuleks ette näha ka riigikaitse eelarves.

Turism ja hobilaevandus

Head merekaardid on asendamatud majanduslikult tähtsas turismitööstuses, sealhulgas nii kruiisilaevade kui ka väikelaevade turismis – moodustavad ju hobimeremehed suure osa meresõitjatest. Digitaalsed merekaardid koos mitmesuguse lisainformatsiooniga on suuresti kasvatanud väikelaevaomanike hulka.

Väga raske on määrata majanduslikku ja kaubanduslikku tulu, mis võib tulla riiklikust hüdrograafia programmist, kuid osa IHO liikmesriikide arvates on kulude ja tulude suhe umbes 1:10 [IHO, 2005, *corrections to* 2011]. Samuti vastab tõele, et maailma merekaubanduse maht on kasvanud pidevalt ja tulevikuski on meremajanduse ekspluateerimine ning jätkusuutlik areng riigi tööstuse tähtis tegevusala.

Samas tuleks märkida, et riiklikku hüdrograafia programmi peab suhtuma kui avalikku hüvesse. See tähendab, et neid avaliku huvi tõttu vajalikke teenuseid ei tagata ainuüksi turujõududega. Iga IHO liikmesriigi jaoks on hüdrograafiateenistuse kui rahvamajanduse olulise komponendi korraldus keskvalitsuse ülesanne ja sellele peab pöörama rohkem tähelepanu.

Esimene osa

ALUSTEADMISED

1. HÜDROGRAAFIA PÕHIMÕISTED

1.1. Hüdrograafia olemus

Terminil „hüdrograafia“ on kaks põhilist tähendust (on veel teisigi).

- Hüdrograafia on rakendusteaduste haru, mis tegeleb merede ja nende rannaalade (aga ka suurte siseveekogude) iseärasuste mõõdistamise ja kirjeldamisega eeskätt navigatsiooni tarbeks, aga ka teiste meremajanduse ülesannete jaoks, kaasa arvatud teadusuuringud, loodushoid ja prognoosid [IHO Manual, 2005. *corrections to* 2011].
- Hüdrograafia on hüdroloogia haru, mis uurib ja kirjeldab siseveekogusid.

Käesolevas õppevahendis vaadeldakse hüdrograafiat eeskätt termini esimeses tähenduses, st merede ja suurte siseveekogude navigatsiooniga seotud hüdrograafilisi töid, mida valdavalt tehakse hüdrograafialaevadel.[2]

Selles kontekstis on hüdrograafia tihedalt seotud geodeesia, kartograafia, topograafia, geoloogia, bioloogia, merefüüsika, matemaatika ja arvutustehnikaga, niisiis on tegu loodus- ja rakendusteaduste sidusalal kujunenud teadusharuga.

[2] Hüdrograafialaev – erikonstruktsiooniga ja -varustusega laev, mille ülesanne on ranniku ja merealade kaardistamine, ujuvmeremärkide (poide, toodrite) paigaldamine, kontrollimine ja hooldamine, merevee füüsikaliste ja keemiliste omaduste määramine ja põhjapinnase proovide võtmine.

1.2. Hüdrosfääri, maailmamere ja maakoore lühiiseloomustus

Hüdrograafia uurimisvaldkonnaks on **hüdrosfäär**, st Maa atmosfääri ja litosfääri vahel paiknev katkendlik veest ja jäärst kest, mille moodustab esmajoones maailmameri.

Maailmameri on 70,8% maakoore pindalast kattev katkematu veekiht, mille pind ligikaudu ühtib geoidi pinnaga. Vee ja maismaa jaotus Maal on ebaühtlane: põhjapoolkerast katab vesi 61%, lõunapoolkerast koguni 81%. Maailmameri jaguneb neljaks osaks: Vaikne, Atlandi ja India ookean ning Põhja-Jäämeri ehk Arktiline ookean (osa teadlasi peab Põhja-Jäämerd Atlandi ookeani osaks, osa peab aga ka Vaikse, Atlandi ja India ookeani lõunaosa omaette Lõunaookeaniks). Maailmamere keskmine sügavus on 3790 m, sügavaim koht 10 865 m asub Mariaani süvikus (andmed on vastuolulised, sest Mariaani süviku sügavuseks on mõõdetud ka 11 022 või 11 034 m). Maailmamere keskmine soolsus on 35‰, pinnakihi keskmine temperatuur 17,5 °C (ekvaatori piirkonnas 27...29, – polaarmeredes kuni – 1,9 °C), süvavee temperatuur 2...4 °C (polaarmeredes veidi alla 0 °C).

Vesi liigub maailmameres loodete, merehoovuste ja lainetena.

Maailmamere põhjareljeef ehk pinnamood on keerukas, ookeanide keskmäestikud moodustavad maakera pikimaid mäeahelikke. Maailmameri mõjutab oluliselt Maa soojus- ja veerežiimi ning sisaldab suuri mineraalide, toitainete- ja energiavarusid.

Hüdrosfääri mass on umbes $1{,}4 \times 10^{12}$ tonni, sellest ligi 97,0% moodustab maailmamere, 2,0% mandrijää ja 0,4% siseveekogude vee mass. Ülejäänu on litosfääris ja atmosfääris leiduv vesi. Hüdrosfääri vesi on pidevas liikumises ning hüdrosfäär on tihedas vastastikuses seoses atmosfääri, litosfääri ja biosfääriga.

Täpsemad andmed hüdrosfääri tekkeaja kohta puuduvad. Elu olemasolu umbes 3,5 miljardit aastat tagasi eeldab aga, et hüdrosfäär esines juba väga kauges geoloogilises minevikus. Esialgne ürgookean kujunes Maa varases atmosfääris olnud veeauru kondenseerumise tulemusena, kuid vett lisandus ka Maa vahevöö aine ümbersulamisel ja diferentseerumisel. Seda nn juveniilvett satub ookeanidesse riftilõhedest ja endogeensete protsesside (nt vulkaanipursete) tagajärjel ka tänapäeval.

Maa tahke kest ehk maakoor koosneb mitmest kihist, mis erinevad üksteisest nii kivimite vanuse, keemilise ja mineraalse koostise kui ka füüsikaliste omaduste poolest. Need kihid on – ülalt alla – settekivimite kompleks ehk stratisfäär, graniidikiht ja basaldikiht. Seismiliste lainete levimiskiirus on stratisfääris alla 5 km/s, graniidikihis umbes 6 km/s ja basaldikihis 6,5...7,2 km/s. Seismiliste lainete levikukiiruse hüppeline muutus (üle 8 km/s) maakoore alumisel piiril on tuntud Mohorovičiči eralduspinnana (moho). Edasi järgnevad Maa ülemine (kuni 900 km) ja alumine (kuni 2900 km) vahevöö ning Maa tuum. Viimases eraldatakse välis- (2900...5100 km) ja sisetuuma.

Maakoore ehitus ei ole planeedi eri piirkondades ühtlane, kusjuures suurimad on erinevused maismaa ja ookeanipõhja vahel. Maismaal on maakoor palju paksem (keskmiselt 35 km, maksimaalselt 70...80 km) ja sisaldab kõiki kolme kihti, kus-

juures settekivimite paksus on keskmiselt 2...4 km, graniidikihil 10...25 km ja basaldikihil 20...40 km. Ookeanipõhjas on maakoore keskmine paksus vaid 7 km, kusjuures koore ülaosa moodustavad vähetihenenud settekivimid keskmise paksusega 0,8 km (elastsuslainete levimiskiirus selles kooreosas on umbes 2 km/s). Edasi tulevad tihenenud kivimid keskmise paksusega 1,7 km (elastsuslainete levimiskiirus on 5,1 km/s). Graniidikiht ookeanipõhjas sageli puudub. Basaldikihi keskmine paksus ookeanipõhjas on kõigest 4,5...5 km (joon. 1.1).

Maakoore maismaast erinev ehitus ookeanide põhjas annab võtme ookeanide tekkeloo selgitamiseks. Ookeanid sünnivad, kasvavad, saavutavad oma maksimaalmõõtmed, seejärel aga vähenevad ja võivad lõpuks hoopis kaduda. Algstaadiumis olevaks ookeaniks on Punane meri, laienevaks Atlandi ookean, maksimaallevikuga ookeaniks Vaikne ookean ja kõduvaks Vahemeri kui endise Thetise ookeani jäänuk.

Kõige paremini seletab ookeanide kujunemist ja arengut laamtektoonika, mida tuntakse ka mobilismi ja mandrite triivi hüpoteesina. Hüpoteesi loojaks peetakse Tartu Ülikoolis töötanud saksa geoloogi Alfred Wegeneri, kelle 1912. a esitatud oletuse kohaselt triivivad basaldikihil **isostaatiliselt**[3] ujuvad graniidikihist mandrid (**mandrilaamad**). Loodete toimel liiguvad need idast lääne, tsentrifugaaljõu tõttu aga poolustelt ekvaatori suunas. Kui kaks ookeanilaama põrkuvad, sukeldub üks neist teise alla ja tekib süvik, mille kõrvale kerkib vulkaaniliste kaarsaarte vöönd (nt Kuriilid). Kui põrkuvad ookeani- ja mandrilaam, sukeldub ookeanilaam mandrilaama alla ja ka siin tekib süvik ja rannikualale kurdmäestik, kus sageli esineb vulkaane (Nasca laam ja Lõuna-Ameerika laam ning Andid ja Kordiljeerid). Tänapäeval ollakse seisukohal, et laamade horisontaalliikumise kiirus on kuni paarkümmend sentimeetrit aastas (joon. 1.2).

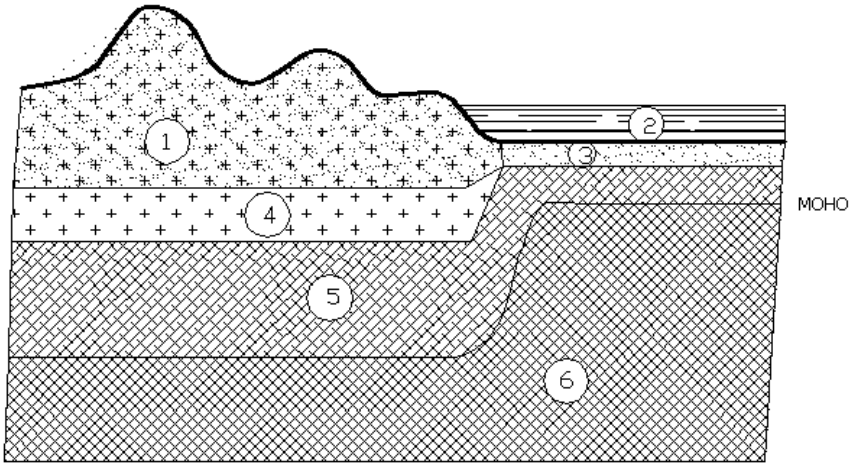
Erinevalt Wegenerist ei peeta laamade substraadiks praegu mitte basaldikihti, vaid Maa vahevööd, eeskätt selle ülaosa, nn astenosfääri. Laamade arvus ei ole uurijad üksmeelel. Osa eraldab vaid kuut laama – Euraasia, Aafrika, Ameerika, Vaikse ookeani, Antarktika ja India laam, teised aga hoopis rohkem. Laamade piirideks loetakse ookeanide keskahelikke, saarkaari, süvamurranguid, riftivööndeid ning mobiilseid mandrite kurrutussüsteeme. Kõik laamade piirid on seismiliselt aktiivsed vööndid, kus esineb rohkesti maa- ja merevärinaid.

1.3. Siseveekogud

Järvedeks nimetatakse looduslikke veekogusid, millel puudub vahetu ühendus ookeaniga. Järv koosneb kahest põhielemendist: nõost ja veemassist. Nõol on veepealne nõlv, vee kõrg- ja madalseisu vahele jääv kallas, veealune nõlv ja järve põhi. Eristatakse maismaalt pärineva veega järvi, mille algallikaks on sademed,

[3] Isostaatiline – maakoore kivimimasside ligikaudsele tasakaalule omane.

ja merest eraldunud jäänukjärvi. Nõo tekke järgi liigitatakse järvi tektoonilisteks, vulkaanilisteks, liustikutekkelisteks, lammi-, karsti- ja inimtekkelisteks. Esineb ka meteoriitse päritoluga järvi (nt Kaali järv Saaremaal). Vee aurustumise, setete ladestumise, maakoore tektooniliste liikumiste, järvede kinnikasvamise (soostumise) ja inimmõjutuse tõttu muutuvad järvede kuju, suurus ja sügavus erineva kiirusega. Üldiselt on need protsessid aeglased, kuid näiteks vee aurustumine kõrbelistes piirkondades koos inimtegevusega võib neid katastroofiliselt kiirendada. Näiteks Amudarja ja Sõrdarja jõevee laialdane tarbimine niisutamiseks ning vee aurustumine vähendasid Araali mere pindala 67500 km^2 (1960. a) niivõrd, et 1980. a oli tekkinud kaks järve, mille kogupindalaks 2007. a oli vaid 14000 km^2 (2007. a) [TEA entsüklopeedia, 2. kd].

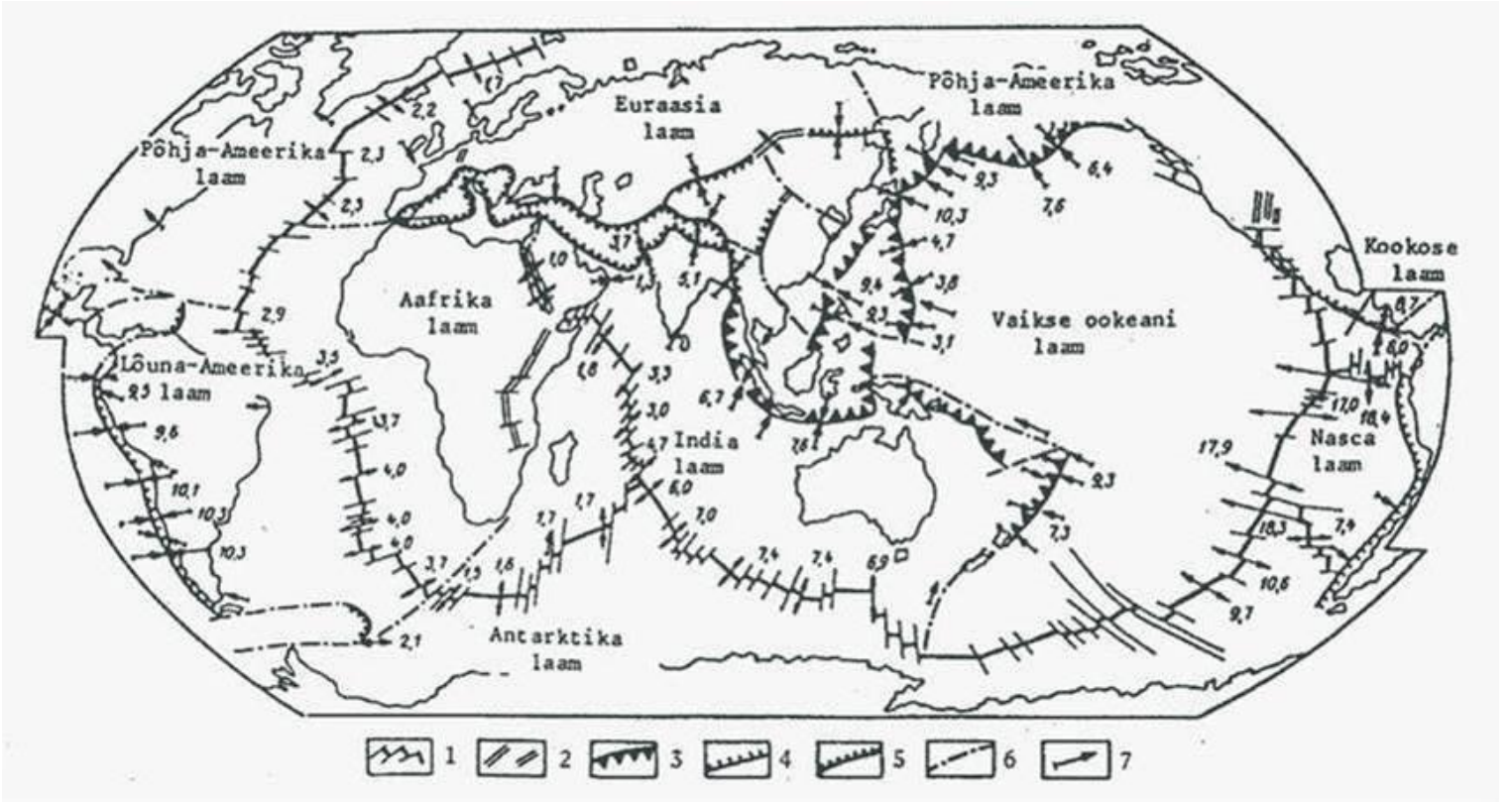


Joonis 1.1. Maakoore kihid maismaa ja ookeani kohal (joonis ei ole mõõtkavas). 1 – maismaa, graniit ja settekivimid; 2 – ookean; 3 – settekivimid kihi paksusega 2,5 km; 4 – mandritealune graniidikiht paksusega 10...25 km; 5 – eeldatavalt kõvaplastne basaldikiht paksusega 20...40 km mandrite all ja 5 km ookeani all; 6 – ülemine vahevöö ehk **astenosfäär** (**sima**) sügavuseni 900 km. Basaldikihi ja astenosfääri vahel on Mohorovičiči eralduspind (moho)

Sissevoolu järgi jaotuvad järved umb-, lähte-, läbimis- ja suubumisjärvedeks. Tekkelt on enamik Eesti järvi, sealhulgas Peipsi ja Võrtsjärv, mandrijäätekkelised.

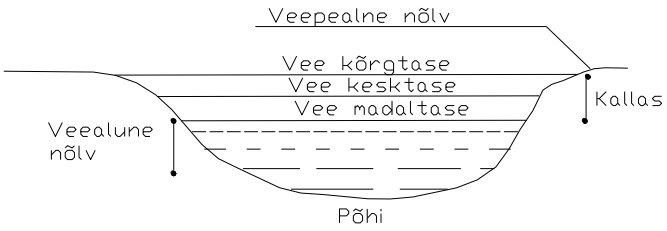
Vee soolsuse järgi eristatakse magedaid (soolsus kuni 1‰)[4], soolakaid (1...24,7‰), soolaseid (24,7...47‰) ja soolajärvi (üle 47‰). Niiskes kliimas on valdavad magedaveelised järved, mida iseloomustab suur sesoonne veetaseme kõikumine.

[4] Hüdrograafias kasutatakse siiani ühikut promill (‰) [IHO, 2011], kuid tänapäeval on suund minna üle juba okeanograafide kasutatavale TEOS-10 (*Thermodynamic Equation Of Seawater* – 2010) süsteemi ühikule *psu* (*Practical Salinity Unit*) dimensiooniga g/kg, mis seega kuulub SI ühikute hulka.



Joon. 1.2. Laamad ja nende liikumine (V. Litvinovi järgi): 1 – ookeanide keskahelike ja transformsete murrangute teljed; 2 – mandrilised riftid; 3 – laamade piirid piki süvikuid, mida ääristavad saarkaared; 4 – laamade piirid piki süvikuid, mis ääristavad mandreid; 5 – laamade piirid mandrite ja sisemerede piires; 6 – suured transformsed murrangud – laamade piirid; 7 – vektorid, mis näitavad laamade nihkumise suundi. Numbrid tähistavad laamade liikumiskiirust (sentimeetrites aastas)

Järvede olulisemad morfomeetrilised näitajad on järgmised: pikkus, st teineteisest kõige kaugemal asuvate kaldapunktide vahekaugus; laius, st järve kahe kaugeima punkti vahekaugus, mõõdetuna mööda pikkuslõigu normaali; kaldajoone pikkus, st järve ümbermõõt mööda nullsamasügavusjoont (**nullisobaati**); pindala, st veepeegli pindala nullsamasügavusjoone järgi; ruumala, st nullsamasügavusjooneni veega täidetud maht; nõo suurim sügavus, st kõige suurem sügavus järve piires; keskmine sügavus.



Joonis 1.3. Järve läbilõige. Nullisobaat vastab harilikult vee kesktasemele

Sügavuse järgi jaotatakse järved sügavateks (sügavus üle 40 m), keskmisteks (sügavus 15 kuni 40 m) ja madalateks (sügavus alla 15 m).

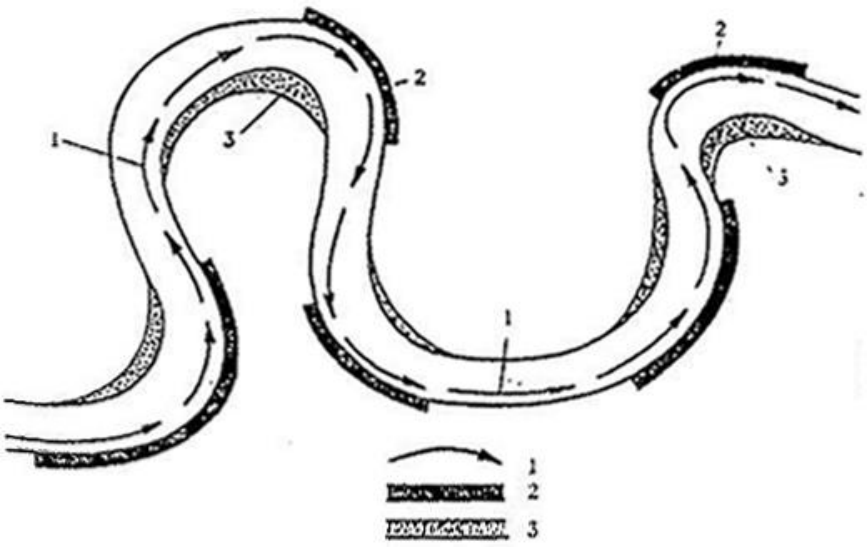
Eesti suurimad järved on Peipsi koos Pihkva ja Lämmijärvega – 3560 km^2, Võrtsjärv – 271 km^2 ja Narva veehoidla – 200 km^2. Lisaks neile on veel üle tuhande järve, mille pindala on 0,01...15 km^2.

Veehoidlateks nimetatakse tehisveekogusid, mis on loodud hüdrotehniliste rajatiste abil vee kogumiseks ja säilitamiseks ning voolu reguleerimiseks. Eestis on üle 155 veehoidla, mille suurus on rohkem kui 0,01 km^2. Navigatsiooni seisukohast võib neist omada tähtsust vaid Narva veehoidla.

Järvede tähtsus laevanduses sõltub nende mõõtmetest, geograafilisest asukohast ja ühendusest teiste veeteedega. Laevandus suurtel järvedel erineb vähe laevandusest meredel. Väiksemate laevatatavate järvede navigatsioonitingimused sarnanevad navigatsioonitingimustega suurte jõgede alamjooksudel ja estuaarides ning limaanides.

Estuaar ehk lehtersuue on iseloomulik meredesse suubuvatele jõgedele, kus esinevad tugevad tõusud ja mõõnad (nt Thames, Amuur ja Jenissei). **Limaan** ehk suudmelaht on jõeoru suudmes moodustunud pikk ja kitsas merelaht, mis tekib aladel, kus maapinna märgatava vajumise tõttu on vesi tunginud jõeorgudesse (nt Aasovi meri ja Musta mere põhjarannik).

Jõgedeks nimetatakse maismaal paiknevaid veekogusid, milles vesi voolab mööda enda uuristatud sängi kõrgemast kohast madalamasse. Osa jõgedest jääb veevaesel ajal kuivaks.

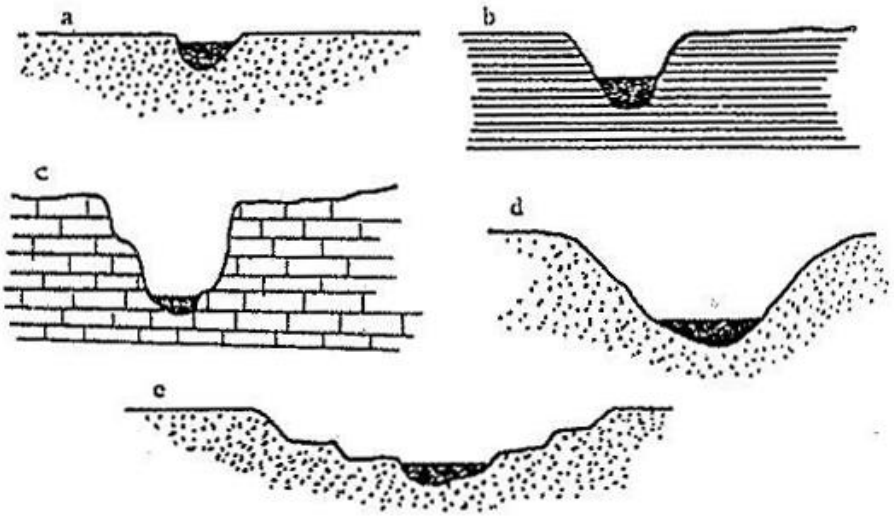


Joonis 1.4. Küljeerosiooni tulemusel hakkab jõgi looklema (meandeeruma). Joonisel on nooltega märgitud voolu suurima kiiruse joomed jõesängis (1) ning erosiooni (2) ja settimise (3) piirkonnad (Laigna, Kala, 2001)

Ookeanisse (merre, järve) suubuvat jõge, millesse tema teel suubuvad omakorda teised vooluveekogud, nimetatakse **peajõeks**. Peajõkke vett toovaid jõgesid nimetatakse esimest järku **lisajõgedeks**; jõgesid, mis suubuvad esimest järku lisajõgedesse, nimetatakse teist järku lisajõgedeks jne.

Peajõega seotud jõed moodustavad **jõestiku**. Maa-ala, millelt jõgi toitub, nimetatakse **jõgikonnaks** (ka jõe **vesikonnaks** ehk **valgalaks ehk valglaks**). Väljavenitatud kujuga kitsast nõgu, milles voolab jõgi, nimetatakse jõeoruks. Jõeoru ristprofiili määrab tema tekkimise ja järgneva arengu käik.

Jõesängis voolav vesi uuristab nii kaldaid (joon. 1.4) kui ka põhja. Küljeerosioon laiendab ja tekitab **meandreid**, põhjaerosioon aga süvendab jõesängi. Külje- ja põhjaerosiooni osatähtsus jõe eri osades (alam-, kesk- ja ülemjooksul) ja erinevatel jõgedel on erinev, kord on ülekaalus üks, kord teine. Põhjaerosiooni intensiivsuse määrab **erosioonibaas**. See on veekogu, millesse jõgi suubub, pinna tase, mis määrab erosiooni sügavuse.



Joonis 1.5. Jõeoru tüüpe: *a* – sängorg; *b* – sälkorg; *c* – kanjonorg; *d* – moldorg; *e* – lammorg

Eristatakse järgmisi jõeorgude tüüpe (joon. 1.5):

- **sängorg** (*a*) on ainult voolusängist koosnev org;
- **sälkorg** ehk V-kujuline org (*b*) on sängorust sügavam ja järskude veerudega, vesi täidab seda vaid teatud kõrguseni;
- **kuristik-** ehk **lõhangorg** on väga sügav ja peaaegu vertikaalsete veerudega sälkorg, mille sügavus ületab laiuse mitmekordselt;
- **kanjonorg** (*c*) on kuristikorg, mille põhja jõesäng täielikult ei hõlma;
- **moldorg** (*d*) on lai mollikujuline org, kus säng hõlmab vaid väikese osa oru põhjast;
- **lammorg** (*e*) on valdava küljeerosiooniga org, kus aeglaselt voolav jõgi tõuseb sageli üle kallaste ja kujundab lammi, mis hiljem võib muutuda terrassiks.

Enamik tasandikujõgesid voolab laiades, hästi väljakujunenud orgudes. Nende pikiprofiil on lauge ja rahulik. Jõe pikiprofiil on ülemjooksul tavaliselt järsem, alamjooksul laugem, kuid esineb ka vastupidist olukorda. Näiteks Põhja-Eesti jõgedel on paekalda tõttu kõige suurem lang just alamjooksul.

Jõeoru madalaimat osa nimetatakse oru põhjaks. Oru põhja osa, mida mööda vesi voolab tulvavetevahelisel perioodil, nimetatakse jõesängiks. Kõrgvee ajal veega täituvat jõeoru osa nimetatakse jõe lammiks (Laigna, Kala, 2001).

Kui erosioonibaas langeb, siis lõikub jõesäng sügavamale ja oru kunagisest lammist kujunevad terrassid, mida suurvesi enam ei suuda üle ujutada. Terrass ise on järsu nõlvaga piiratud rõhtne või väikese kaldega tasand jõeorus. Suurematel jõge-

del võib terrass piki jõge katkematult kulgeda kümneid kilomeetreid. Väikestel jõgedel on terrassid lõikudena kord ühel, kord teisel kaldal.

Jõe- ehk alluviaalseteks seteteks nimetatakse pinnaseosakesi, mida veevool põhjast lahti uhub ja edasi kannab. Jõesetteid liigitatakse sängi-, lammi- ja soodiseteteks. **Soot** on jõest eraldunud vana sängilõik, millest vesi vaid suurvee ajal läbi voolab.

Jõgede liigitamisel suuruse järgi on aluseks nende veerohkus, pikkus, laius ja sügavus. Jõe veerohkust iseloomustatakse ajaühikus läbi sängi vaadeldava ristlõike voolava vee mahuga (enamasti m^3/s või km^3/a). Maakera jõgede vooluhulk on umbes 35 560 km^3 aastas.

Jõe pikkust *P* mõõdetakse mööda sängi lättest suudmeni. Käänulisuse tõttu ületab jõgede pikkus oluliselt lätet ja suuet ühendava sirglõigu pikkust *L*. Jõe pikkuse *P* suhe lätte ja suudme vahelisesse kaugusesse *L* iseloomustab tema looklevust:

$$X = \frac{P}{L}, \qquad (1.1)$$

kus *X* on looklevustegur.

Jõe laius on kaugus vastaskallaste veepiiride vahel, mõõdetuna risti voolu suunaga. Jõgede veepinna kõrguse kõikumise tõttu muutub nende laius suurtes piirides.

Jõe sügavuseks nimetatakse mööda vertikaali mõõdetud vahemaad veepinnalt kuni põhjani. Jõe sügavus muutub küllaltki järsult piki ristlõiget, kuid palju sujuvamalt piki jõge. Sügavus muutub ka perioodiliselt. Eristatakse normaalset veeseisu, kõrgvett ja madalvett.

Eestis on 420 üle 10 km pikkust jõge, neist 9 pikkus ületab 100 km. Veerohkemad jõed on Emajõgi, Narva ja Pärnu jõgi, need on ka osaliselt laevatatavad (viimased neist tänapäeval ainult suudmealal). Laevatatavaid siseveeteid koos jõgedega on Eestis ligikaudu 500 km.

Jõed toituvad vihma-, lume- ja jääsulamis- ning põhjaveest. Enamik jõgesid on segatoitelised. Jõgede vooluhulga sesoonne jaotus sõltub kliimast. Näiteks troopilise ja mussoonkliimaga aladel on jõgede vooluhulk suurim suvel (Mekong) või sügisel (Niger), vahemerelise kliimaga piirkondades talvel (Tiber), parasvöötmes kevadel (Volga) ning polaaraladel suvel (Yukon). Paljude jõgede veerežiimi reguleerivad suured järved (nt Laadoga) ja hüdrotehnilised rajatised.

Liigestatud reljeefi või erineva kõvadusega kivimite avanemise korral jõe põhjas võivad tekkida **kärestikud** (naaberlõikudest suurema kaldega jõeosad, kus vool on kiirem), **kosed** (suure langu ja kiire vooluga jõelõigud, kus vesi voolab mööda suure kaldega vastupidavaid kivimeid) ja **joad** (järsud vee langused jõesängis olevalt astangult). Maailma kõrgeim (1054 m) on Angeli juga Guyana mägismaal Lõuna-Ameerikas, veerikkaim aga Victoria juga (vooluhulk 1400 m^3/s) Zimbabwes. Eesti kõrgeim juga (8 m) on Jägala (ajutiselt tegutseb 20 m kõrgune Valaste juga).

Tabel 1.1. Jõgede liigitus pikkuse, sügavuse ja vooluhulga järgi (Laigna, Kala, 2001)

Jõgede järk suuruse järgi	Pikkus, km	Keskmine vooluhulk suudmes, m^3/s	Vähim sügavus põikmadalike kohal, m
Ülisuured	üle 3000	üle 10 000	üle 2
Väga suured	3000–10 000	10 000–1000	2–1,2
Suured	1000–500	1000–100	1,2–0,8
Keskmised	500–100	100–10	0,8–0,3
Väikesed	100–25	–	–
Väga väikesed	alla 25	–	–

Jõgede suudmealadel kujunevad sageli **deltad (**harujõgede kogumid**)**. Suurima pindalaga on läbi lössisetete voolava Huang He jõe delta (250 000 km^2). See jõgi kannab aastas edasi 1380 miljonit tonni tahket ainet. Kõik maailma jõed kannavad aga aastas edasi umbes 24 miljardit tonni mineraalaineid.

Jõgede paiknemine on seotud geoloogiliste struktuuridega, kusjuures jõed uuristavad alati nende struktuuride kõige pehmemaid või tektooniliselt lõhestatud kivimeid. Eesti jõeorud paiknevad sageli vanade jääajaeelsete orgude kohal.

1.4. Geomorfoloogia, pinnamood, pinnavormid

Pinnamoeks ehk reljeefiks nimetatakse mitmesugustest pinnavormidest koosnevat maakoore pealispinna kuju. Pinnamoodi käsitlevat teadusharu nimetatakse **geomorfoloogiaks**, mis kirjeldab ning uurib maismaa ja merepõhja pinnavorme, nende suurust, kuju, paiknemise ning rühmitumise seaduspärasusi, tekkimist ja arengut. Geomorfoloogia on geoloogia ja loodusgeograafia piiriteadus, mis iseseisvus 19. sajandi lõpus ja 20. sajandi alguses. Geomorfoloogia jaguneb üldgeomorfoloogiaks (uurib üldist pinnamoe kujunemist) ja regionaalgeomorfoloogiaks (käsitleb üksikasjalikult mingi piirkonna pinnamoodi). Viimasel ajal on üldgeomorfoloogiast kiiresti välja kasvanud eriharu meregeomorfoloogia ning omaette haruks on saanud rannageomorfoloogia.

Pinnavormid on peamiselt geoloogiliste sise- ja välisjõudude ning inimtegevuse toimel moodustunud maapinna ja merepõhja osad, mis erinevad ümbritsevatest aladest kõrguse poolest, morfoloogiliselt, struktuurilt ja geneesilt. Tehakse vahet positiivsetel ja negatiivsetel pinnavormidel. Positiivsed vormid ulatuvad mingist kokkuleppelisest horisontaaltasandist kõrgemale, moodustades **mäeahelikke, mägesid, künkaid, seljakuid** jne. Negatiivseteks vormideks nimetatakse kokkuleppelisest horsiontaaltasandist madalamale jäävaid osi: **nõod**, **orud, lohud** jt. Seega on mered negatiivsed pinnavormid, järvede puhul on tegu kohaliku nivoo (järvepinna) suhtes negatiivse kõrgusega vormidega.

Pinnavorme jaotatakse põhikuju alusel korrapärasteks ja korrapäratuteks, profiili järgi sümmeetrilisteks ja asümmeetrilisteks, keerukuse järgi lihtsateks (lihtvormid) ja keerukateks (liitvormid). Lihtsad vormid pole harilikult suured ning neil on enam-vähem korrapärane geomeetriline kuju. Keerukad vormid kujunevad lihtsate vormide liitumisel ja nende eristamine on sageli kokkuleppeline.

Nüüdisaegses pinnavormide klassifikatsioonis eristatakse nelja tekkeloolist rühma: **kosmogeensed** (nt meteoriidikraatrid), **geoloogilised** (nt ookeaninõod), **biogeensed** (nt sood) ja **antropogeensed** (nt aherainemäed) pinnavormid. Kosmiline faktor etendas eriti olulist osa Maa planetaarse arengu algetapil ja andis seejärel juhtrolli geoloogilistele protsessidele, hiljem ka bioloogilistele. Kõige viimasel ajalõigul on aga suurem tähtsus inimtegevusest indutseeritud protsessidel.

Kõik pinnavormid jaotatakse **geotektuurideks**, **morfostruktuurideks** ja **morfoskulptuurideks**. Esimesed on maakoore pealispinna suurimad ebatasasused (ookeaninõod, mandrid), ülejäänud võivad olla suur-, kesk-, väike- ja kääbusvormid. Struktuurilised pinnavormid on geoloogiliste välisjõudude kulutaval toimel erisuguse kulumiskindlusega kivimite avamusalal moodustunud pinnavormid, mis kajastavad ala tektoonilist ehitust (nt kulumisastang ehk kuesta). Eesti pinnamoes on struktuurilistel pinnavormidel väike osatähtsus. Seevastu on Eestis levinud skulptuursed pinnavormid, mis on kujunenud geoloogiliste välisjõudude kulutaval toimel suhteliselt ühtlase kivimi avamusalal ja millel puudub otsene seos tektooniliste struktuuridega. Skulptuursed pinnavormid jagunevad kuhje- ehk akumulatiivseteks, kulutus- ehk destruktiivseteks ja kulutus-kuhje ehk destruktiivakumulatiivseteks vormideks.

Skulptuurseid pinnavorme liigitatakse omakorda neid kujundanud peamise tekketeguri järgi. Nii eristatakse murenemistekkelisi ehk **eluviaalseid,** raskusjõutekkelisi ehk **gravitatsioonilisi**, igikeltsatekkelisi ehk **krüogeenseid**, liustikutekkelisi ehk **glatsiaalseid**, liustiku sulamisveetekkelisi ehk **akvaglatsiaalseid** (sh liustikujõetekkelisi ehk **glatsiofluviaalseid** ja jääjärvetekkelisi ehk **limnoglatsiaalseid** ehk glatsiolakustrilisi), voolutekkelisi ehk **fluviaalseid** (sh jõesettelisi ehk alluviaalseid), meretekkelisi ehk **mariinseid**, põhjaveetekkelisi, karstilisi, tuuletekkelisi (ka **eolilisi** ehk eolseid), elutekkelisi ehk **organogeenseid** (sh taimetekkelisi ehk **fütogeenseid**, loomatekkelisi ehk **zoogeenseid** ja inimtekkelisi ehk **antropogeenseid**) ning **kosmogeenseid** (meteoriitseid) pinnavorme.

Planetaarsed vormid (geotektuurid) määravad meie planeedi pealispinna üldkuju. Need hõlmavad miljonite ruutkilomeetritega mõõdetavaid alasid. Ülejäänud pinnavormidest moodustub mega-, makro-, meso-, mikro- ja nanoreljeef.

Megareljeefi moodustavad väga suured pinnavormid, mille pindala on kümneid ja sadu tuhandeid ruutkilomeetreid. Megavormid on nt ookeanide süvikud ja maismaal mäeahelikud.

Makroreljeefi moodustavad suured pinnavormid, mille pindala on sadu, tuhandeid, harva ka kümneid tuhandeid ruutkilomeetreid. Reljeefi makrovormide hulka kuuluvad nt lavamaad.

Mesoreljeefi moodustavad keskmised pinnavormid, mille pindala suuruseks on mõni kuni mõnikümmend ruutkilomeetrit. Siia alla kuuluvad seljandikud, künkad ja järvenõod.

Mikroreljeefi moodustavad harilikult mesovormidel paiknevad pisivormid, nt kaldavallid ja erosiooniuurded.

Nanoreljeefi moodustavad kääbusvormid, nt lainevired merepõhjas ja jääkriimud.

Pinnavormide liigitamisel suuruse põhjal ühtsed seisukohad puuduvad. Eestis eristatakse suhtelise kõrguse järgi pisi- (alla 2 m), väike- (2...10 m), kesk- (10...25 m), suur- (25...50) ja hiidvorme (üle 50 m), loomulikult ei seostu need mäestikualadel kasutatavate suurusjärkudega.

Pinnavormide koostiselementideks on nõlvad, küljed, servad, tahud, nurgad ja punktid. Oluliseks elemendiks on **nõlv** – pinnavormi kallakkülg. Nõlvu on maismaal (mäenõlvad) ning merede ja ookeanide põhjas (mandrinõlv). Kuju järgi eristatakse nõgusaid, kumeraid, sirgeid ja astmelisi nõlvu, tekke järgi varingu-, rusukalde-, erosiooni- jt nõlvu. Oru nõlva nimetatakse ka veeruks. Servad moodustuvad külgede lõikumisel. Mitmetahulised nurgad tekivad kolme või enama külje lõikumisel. Kaartidel kujutatakse mitmetahulisi nurki harilikult punktidega.

Pinnamoe vaatlusel tuleb sageli kokku puutuda mõistetega „jalam" ja „jalamijoon". **Jalam** on positiivse pinnavormi (künka, seljaku) alumine, enamasti nõgus osa ja sellega vahetult piirnev maapind. Jalamijoon on tinglik joon, mis ühendab positiivse pinnavormi madalamaid punkte ja piiristab teda – eraldab ümbritsevast tasasest alast või teistest pinnavormidest.

Väljavenitatud positiivsete pinnavormide kõrgemat (tipmist) osa nimetatakse **harjaks**. **Tipuks** nimetatakse mingi positiivse pinnavormi kõige kõrgemat punkti.

Põhilisi pinnamoe koostisosi on kerge jälgida sellise lihtsa vormi puhul nagu küngas: sellel saab eristada nõlva, jalamit ja tippu. Tehakse vahet suletud ja avatud pinnavormide vahel. Suletuks nimetatakse selliseid pinnavorme, mis on kõikidest külgedest ümbritsetud nõlvadega. Suletud vorm on näiteks mägi, mis on piiratud nõlvade ja jalamijoonega. Avatud pinnavormid on ühest või kahest küljest avatud. Näiteks orul on kaks nõlva ja ta on kas ühte või kahte suunda avatud.

Väliskuju järgi võivad pinnavormid olla väljavenitatud (joonpinnavormid või joonelised pinnavormid), joonorienteeritud, isomeetrilised (samamõõdulised) või korrapäratud.

Pinnavormide liigitamisel on oluline ka **nõlva kalle**. Ümarate (künkad) ja ovaalsete (voored) pinnavormide seas eristatakse laugete (alla 10°) nõlvadega kühme ja künniseid ning järsunõlvalisi (üle 10°) kupleid ja seljakuid.

Seaduspäraselt korduvate pinnavormide liitumine mingis piirkonnas moodustab pinnavormide koosluse. Nende kirjeldamisega tegeleb morfograafia. Morfograafia on pinnavormide ja pinnamoe välistunnuste (kõrgus, sügavus, kuju, orientatsioon, paiknemine, liigestatus) kirjeldus ilma nende tekke ja vanuse hindamiseta. Morfo-

graafiline analüüs koos maapinnavormide (orograafiliste) skeemide koostamisega on maa-ala geomorfoloogilise tundmaõppimise esimesi ja tähtsamaid etappe.

Pinnamoe mõõtmete määramisega tegeleb geomorfoloogia haru morfomeetria. Morfomeetrilised tunnusjooned (karakteristikud) saadakse peamiselt topograafilisi kaarte ja aerofotosid töödeldes. Mõõtmis- ja arvutustulemuste põhjal koostatakse morfomeetrilised kaardid, millel kujutatakse pinnamoe morfomeetriliste tunnusjoonte jaotumist mingil kindlal maa-alal.

1.5. Hüdrograafia ülesanded

Hüdrograafiliste uuringute põhiobjektiks on veekogude põhjareljeef ja seda katva veetaseme kõrgus. Veekogu põhjaks peetakse allpool veepinda asuvat maakoore ülaosa. Laiemas tähenduses on aga põhjaks kogu maailmamere, järvede, jõgede ja teiste veekogudega kaetud litosfääri osa. Merede põhjareljeef on niisama keerukas kui maismaa omagi, kusjuures mõne reljeefiosa horisontaalse või vertikaalse liigestatuse astmest lähtudes maismaalised analoogid isegi puuduvad.

Et hüdrograafiliste uuringute peaeesmärk on meresõidu ohutuse tagamine, siis uuritakse veekogude põhjareljeefi eelkõige kui üht laevasõidu ohuallikat. Enne mereteede, soovitavate kursside ning meresõidupiirkondade valimist peab olema üldine ettekujutus veealusest topograafiast, pinnavormide paiknemisest, kujust ning suurusest. Kaartidel esitatav üksikasjalik ja täpne reljeefipilt aitab täpsustada ka asukohta merel. Järelikult on hüdrograafia vahetuks huviobjektiks merepõhja morfograafilised ja morfomeetrilised karakteristikud. Navigatsioonikaarte ehk merekaarte ja teisi hüdrograafilisi andmeid kasutatakse ka merel asuvate baaspunktide valimisel kalapüügil, maavarade geoloogilisel uurimisel ja Maad uurivate fundamentaalteaduste lähtematerjalina.

Morfoloogilise ja morfomeetrilise informatsiooni kõrval on lausa hädavajalik tunda reljeefi kujundavaid protsesse ning põhjasetete omapära kogu settekivimite kihis. Ka hüdrograafiliste uuringute kavandamine ja ratsionaalne organiseerimine nõuavad täielikku ja mitmekülgset ülevaadet merepõhja reljeefist.

Kuivõrd hüdrograafilised uuringud piirduvad eeskätt madalamate rannikulähedaste aladega, kus mõõtmised on väga üksikasjalikud, siis saab morfomeetrilisi karakteristikuid teades edukalt lahendada paljusid rakendusülesandeid ja koostada täpseid navigatsioonikaarte.

1.6. Merepõhja pinnamoe moodustumine

Geomorfoloogia üheks tähtsamaks ülesandeks on pinnamoe kujunemise selgitamine. Lähtudes energeetilisest vaatevinklist jaotatakse pinnamoodi kujundavad geoloogilised protsessid endogeenseteks ja eksogeenseteks. Endogeensed protsessid muudavad pinnamoodi reljeefsemaks, eksogeensed, vastupidi, kulutavad ja lihtsustavad pinnamoodi.

Endogeensed ehk geoloogilised sisejõud on Maa sisemuses mõjuvad jõud, mis tekivad maasisese raskusjõu ja soojusenergia toimel. Need jõud avalduvad endogeensetes protsessides, mille tagajärjeks on plutoonilised (magmaatilised) nähtused, nagu vulkanism, tektooniline tegevus ja kivimite moone.

Eksogeensed ehk geoloogilised välisjõud on Maa pinnal ja litosfääri ülemises osas mõjuvad jõud, mis tekivad raskusjõu ja päikeseenergia toimel.

Geoloogilised välisjõud on voolav vesi (pinna- ja põhjavesi), merelainetus ja hoovused ning liustike, tuule ja organismide (ka inimese) tegevus. Nende mõjul toimuvad eksogeensed protsessid, mis väljenduvad varem tekkinud kivimite ja pinnavormide kulumises või uute kuhjumises. Maismaal on valdavad kulumisprotsessid, merepõhjas kuhjumine.

Geoloogilistest sisejõududest eristatakse kõikuv-, kurrutus- ja plahvatuslikke tektoonilisi liikumisi. Kõrgemat järku vertikaalne kõikuvliikumine haarab tohutuid maa-alasid ja on aluseks planetaarsete pinnavormide kujunemisele, määrates mandrite ja ookeanide kuju. Praktiliselt ei ole maakoores kohti, mis oleksid täielikult liikumatud. Kuna kõikuvliikumiste amplituud on tavaliselt mõni millimeeter või sentimeeter aastas, pole ka maakoore vertikaalliikumised alati märgatavad.

Selliseid liikumisi saab kindlaks teha pikema aja järel täpsete geodeetiliste mõõtmistega ja rannajoone muutuste jälgimisega. Tänapäevased kõikuvliikumised ongi kõige ilmekamalt fikseeritud maismaa ja mere piiril, kus nad põhjustavad rannajoone nihkumist. Maismaa kerkimisel taandub rannajoon mere suunas, mistõttu maismaa pindala suureneb. Sellisel juhul kõneldakse **mere regressioonist**. Kui aga maapind vajub, tungib meri peale ja see tähendab **mere transgressiooni**. Kuid ookeanide transgressioone ja regressioone võivad põhjustada ka veehulga muutused, näiteks polaaralade liustiku- ja/või merejää sulamine. Ookeanide veetasemete sellelaadseid kõikumisi nimetatakse **eustaatilisteks**. Erinevalt tektoonilistest avalduvad eustaatilised kõikumised kõikidel randadel peaaegu üheaegselt ja ühesuguse amplituudiga.

Maakoore väiksemate osade liikumine üksteise suhtes põhjustab kas deformatsiooni koos erinevat tüüpi kurdude tekkimisega või rebendeid koos üksikute plokkide kerkimise, alanemise või segipaiskamisega.

Kui rebendid maakoores ulatuvad sügavamale, võib tekkinud pragudesse tungida magma. Magma valgumist maapinnale nimetatakse vulkanismiks.

Maa sisemuses toimuvat lõhede teket ja massi ümberpaiknemist saadavad tõuked, mis maapinnal ilmnevad maavärinatena.

Endogeensete protsesside intensiivsuse järgi eristatakse maakoore rahulikke ja rahutuid piirkondi. Rahulikus piirkonnas toimub suurtel aladel vaid aeglane kõikuvliikumine, mis on iseloomulik mandrite tasastele madalatele piirkondadele, nn platvormidele. Platvorme esineb nii mandritel kui ka ookeanide põhjas.

Maakoore rahutuid piirkondi iseloomustab intensiivne mägede teke, millega kaasnevad maavärinad ja vulkanism. Nende alade pinnamood on tugevasti liigestatud.

Maakihtide pingeid tekitab mandrilaamade liikumine. Laamade põrkepiiridel (**orogeensed vööndid)** on valdavalt survepinged, mille tõttu tekivad sageli kurrud. **Georiftogeenid** on ookeanikoore alad, kus maakoor kiiresti horisontaalselt lahkneb. Siingi on rohkesti vulkaane ja maavärinaid ning maakoore paksus ületab tunduvalt tavalise ookeanikoore paksuse. Riftiahelikke tükeldavad nendega ristuvad murrangud, mis kulgevad sadade kilomeetrite kaugusele. Laamade nihkepiiridel on **transformsete murrangute** piirkond.

Kokkuvõtteks võib märkida, et ookeanipõhja reljeefi suured vormid (planetaarsed, mega- ja makrovormid) on tekkinud endogeensete protsesside käigus pika geoloogilise ajaloo jooksul, milles esineb väga aeglaste muutuste perioode ja mitmeid geoloogilisi revolutsioone. Eristatakse baikali (hilisproterosoikumis ja kambriumi ajastu alguses), kaledoonia (vanaaegkonna algul), hertsüünia (vanaaegkonna lõpul), kimmeri (juura ja kriidi ajastu) ja alpi (jätkub praegugi) kurrutusperioode, mille käigus on kujunenud suuri alasid hõlmavad mäeahelikud.

Endogeensete protsesside jälgimisel võib märgata, et pinnamoe suurimad planetaarsed vormid on seotud kindlate maakoore tüüpidega:
– veealune mandrinõlv – mandriplatvormiga;
– üleminekuala – laamade vastasmõjuga;
– ookeani keskahelikud – georiftogeensete aladega;
– ookeani nõgu – ookeaniplatvormidega.

Merepõhja pinnamoodi mõjutavad ka eksogeensed protsessid. Vesi, tuul, jää jt mõjurid purustavad ja peenestavad setteid, mis tasandavad tektooniliselt liigestatud merepõhja, kusjuures ookeanide põhjareljeefi tasandamisel on väga suur osa hüdrogeensetel ja gravitogeensetel protsessidel. **Hüdrogeensed protsessid** on seotud liikuva vee ja jää energiaga. Sel juhul on tegu kas tuulelainetuse, murdlainetuse, hoovuste, loodete, vertikaalse tsirkulatsiooni, jää tekkimise ja liikumisega või settematerjali juurdekandumisega jõgedest. Kõigi mainitud nähtuste tõttu transporditakse eelkõige tohutu hulk tahkeid vees hõljuvaid aineosakesi erinevatele kaugustele ning sellele järgneb aineosakeste settimine seal, kus voolu kiirus väheneb.

Hüdrogeensete protsessidega kantakse igal aastal hõljumi ja lahustena ookeani kümneid miljardeid tonne erinevaid materjale. Kuna hüdrogeensed protsessid on ebaühtlase intensiivsusega, toimub ookeanides materjali kuhjumine, ülekanne ja sadestumine erineva kiiruse ja mahuga ning järelikult on ka nende mõju reljeefile piirkonniti erinev.

Ranna lähedal ja madalas vees lõhuvad lained varem kujunenud setteid ja pinnavorme väga intensiivselt. Lainete kulutust nimetatakse **abrasiooniks**, liustikukulutust **eksaratsiooniks**, tuulekulutust **deflatsiooniks**. Eristatakse mehaanilist, keemilist ja termilist abrasiooni.

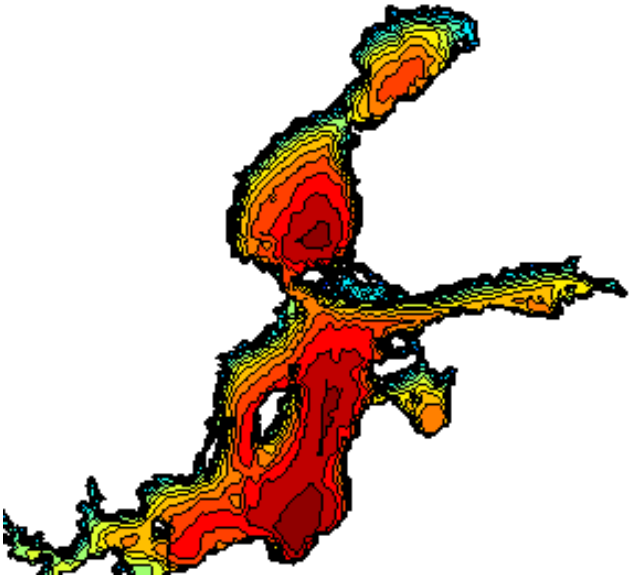
Mehaanilise abrasiooni korral purustavad tuulelained ja murdlainetus mereranna ning merepõhja setteid ja kivimeid mehaaniliselt.

Kuivõrd mehaaniline abrasioon kuulub põhiliste reljeefi kujundavate mehhanismide hulka Eesti vetes, siis vaatleme seda veidi põhjalikumalt.

Läänemere suhteliselt väikeste mõõtmete ja maismaaga piirnemise tõttu on selles lainete periood suhteliselt lühike, ummiklainetust esineb vaid suviti ja valdavad on järsud, enamasti tuulesuunalised lained. Tormisem aeg on mere põhjaosas septembrist märtsini ja lõunaosas novembrist veebruarini. Kõrgeimad lained Eesti vetes esinevad Hiiumaast WNW suunal, kus oluline lainekõrgus (lainetest kõrgema kolmandiku keskmine) on ulatunud tugeva tormiga (22. detsember 2004) kuni 7,7 meetrini [Engelbrecht, Soomere, 2006]. Kinnitamata andmetel on kõrgeimaks laineks instrumentaalselt registreeritud Soome Ilmainstituudi poolt Botnia lahes 12. jaanuaril 2017. a peaaegu poole rohkem (14,8 m) ja selle pikkus võis ulatuda 270 m. Suurimad lained tekivad ligikaudu NS-suunaliste tormituulte puhul (vt joon. 1.6). Lainetuse mõju ulatub aga ligikaudu poole lainepikkuse sügavuseni, niisiis võib tugevate tormidega lainetuse mõju ulatuda Hiiumaast WNW suunal 60 m sügavuseni. Siinjuures lainetusest põhjustatud erosioon ühes piirkonnas tekitab erodeeritud materjali settimise teises piirkonnas.

Keemiline abrasioon tähendab setete ja kivimite lagundamist keemiliselt aktiivse merevee toimel.

Termoabrasioon on omane igikülmunud kobedatele setetele, kus lainetuse mõjul sulatab vesi pinnases külmunud jää ja lõhub sel viisil randa.



Joonis 1.6. Oluline lainekõrgus Läänemerel WAM (*Wave Modelling*) lainemudeli alusel, kui tuul on puhunud 25 m/s asimuudil 330^{o} üheksa tunni vältel. Maksimaalne lainekõrgus 8,9 m on mere lõunaosas (tumepunane laik). Lainekõrguste samajoonte lõikevahe on 0,5 m [Eesti Mereinstituut, 2000]

Abrasiooniprotsesside kiirus sõltub paljudest faktoritest: kivimite koostisest, kivimite lasumisest ja monoliitsuse astmest, lainetuse ja hoovuste laadist ja tugevusest, temperatuurirežiimist. Lainetus, hoovused ja jää haaravad peenestunud materjali kaasa ning kannavad laiali, kusjuures settematerjal jaotub terasuuruse ja tiheduse järgi.

Sügavamates merepiirkondades, kus lainetuse mõju ei ulatu merepõhjani, kannavad setteid edasi põhjalähedased hoovused. Läänemeres tekitavad põhjalähedasi hoovusi soolase vee sissetung läbi Taani väinade ning soolase (st raskema) vee edasine levik süvikutes.

Tugevamad, kuid lühiajalised on pinnakihi tuulehoovused, mis on suunatud üldjuhul 45^{o} tuule suunast paremale. Keskmise tugevusega tuulte puhul on nende kiiruseks avamerel 15...17 cm/s ja tugevate ning kestvate tormide korral isegi 50 cm/s, sügavamal kui 10...20 m on hoovuse suund vastu tuule suunda. Lainete ja hoovuste tegevus põhjustab setete kannet piki rannajoont, kusjuures murdlained tõstavad rannavööndis üles põhjas lebava liiva, nii et see liigub piki randa olenevalt hoovusest või lainete nurgast rannajoone suhtes. Mõningal määral esineb ka setete transporti risti rannaga murdlainete mõjul. Rannalähedased „liivalained" võivad liikuda piki randa isegi kiirusega 150 m/a. Ka suurte laevade sõukruvid tõstavad üles küllaltki sügaval asuva liiva, mida hoovused edasi kannavad (nt Naissaare sadama täiskandumine).

Gravitatsioonilistes protsessides kanduvad tahked aineosakesed raskusjõu toimel märgatava kaldega nõlvadel allapoole. Suurtel kalletel tekivad maalihked ja rusuvoolud ning algse reljeefi süvendeisse võivad kuhjuda deltataolised ja künklikud vormid.

Biogeensed protsessid on seotud organismide elutegevusega, kusjuures sageli on need reljeefi kujundavad. Siinkohal on tuntuimad korallrifid, mis on tekkinud troopiliste merede organismide pikaaegse elutegevuse tulemusena. Ka Vilsandi ja Vaika saared on fossiilsed rifid, sest siluri aegkonnas laius kõnealusel alal lähistroopiline meri.

Teiselt poolt lõhuvad oherdilaadsed elusorganismid settekivimeid, erinevat liiki muda- ja liivasööjad töötlevad pinnast, muutes selle struktuuri. Lõpuks kobe settematerjal kuhjub ning merepõhjas moodustub laialdasi alasid, mis koosnevad organismide jäänustest, st nende räni- ja lubikodadest.

Inimtegevust võib nimetada **antropogeenseks** protsessiks, mis on muutunud üheks olulisemaks geoloogiliseks teguriks. Inimtegevus võib mõjutada merepõhja reljeefi nii otseselt kui ka kaudselt. Otsese tegevuse alla kuulub merepõhja süvendamine, mida tehakse siis, kui sadamaalade või laevateede sügavus ei ole küllaldane uue projektlaeva jaoks või on need piirkonnad täis kandunud. Teiseks otseseks reljeefi kujundavaks tegevuseks on süvendusheitmete kaadamine. Kaudse tegevuse alla kuulub mitmesuguste tammide, lainemurdjate, kaide jms vesiehitiste rajamine. Need tõkestavad hoovuste tee ja põhjustavad ühelt poolt tõkke-eelse piirkonna kiire täiskandumise ning teiselt poolt tõkkejärgse ala tühjakskande, kuna tõke takistab

äraviidud materjali asendamist. Peale selle esineb veel vesiehitiste läheduses uhtumist, mis on tingitud vooluste kiirenemisest ja turbulentsist nende ehitiste juures.

1.7. Merepõhja reljeefivormid

Merepõhja reljeefi liigitati esialgu morfograafiliste ja morfomeetriliste tunnuste põhjal. Meregeoloogia arenedes hakati liigitamisel arvestama vormitekkelisi tunnuseid.

Vormitekkelist liigitust kasutatakse laialdaselt geomorfoloogiliste kaartide koostamisel. Navigatsioonilised merekaardid sisaldavad tavaliselt morfoloogilist ja morfomeetrilist informatsiooni. Tuleb aga silmas pidada, et kui reljeefi morfomeetrilisi karakteristikuid saab määrata üheselt, siis nende päritolu määramisel ühtsed seisukohad puuduvad.

Maailmamere põhjareljeefi olulisemateks vormideks on süvamerenõod, ookeanide keskahelikud ja mandrilavad koos mandrinõlvadega, mida võiks liigitada globaalsete hulka, ning ääremere häilud, saarkaared ja ookeanisüvikud, mis võivad kuuluda nii globaalsete kui ka megavormide hulka.

Tabel 1.2. Merepõhja reljeefi globaalsete vormide pindala (mln km^2/%) (Laigna, Kala, 2001)

Ookean	Mandrilava ja mandrinõlv	Siirdealad	Ookeanide keskahelikud	Süvamere nõod
Vaikne	18,2/10,2	24,0/13,5	19,6/11,0	116,8/65,3
Atlandi	29,5/32,6	4,8/5,2	22,3/24,6	34,0/37,6
India	22,5/29,3	1,8/2,3	12,9/16,8	39,6/51,6
Põhja-Jäämeri	11,3/74,6	-	0,5/3,0	3,4/22,4
Maailmameri	81,5/22,6	30,6/8,4	55,3/15,3	193,8/53,7

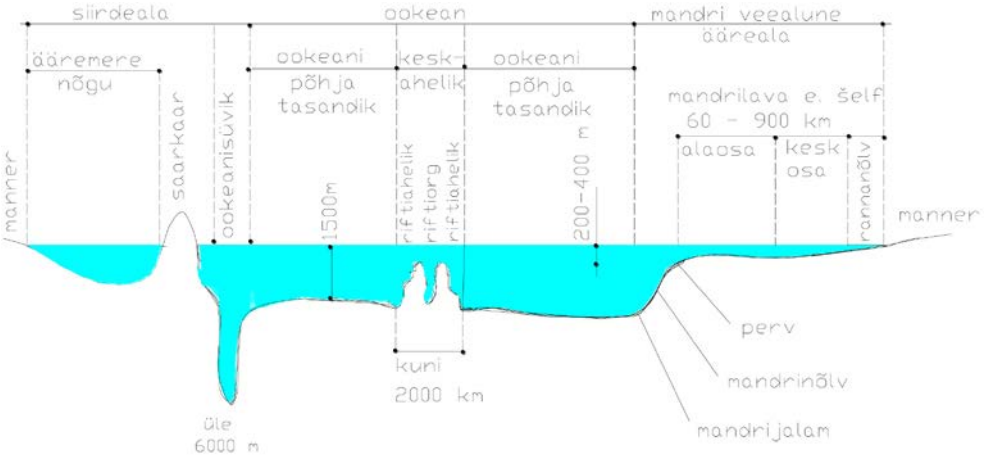
Mandrilava ehk **šelf** kujutab endast mandri veealust jätku, millel on mandriga ühesugune geoloogiline ehitus. Šelfi laius on keskmiselt 60 km, kuid see võib muutuda mõnest kilomeetrist kuni 900 km-ni (nt Põhja-Jäämeres). Šelfile tervikuna on iseloomulik tasandikuline reljeef. Suur osa sellest on hiljuti olnud maismaa, seda tõendavad vanad rannavormid ja üleujutatud jõeorud. Ookeanipoolsest küljest piirab šelfi perv. Perv on merepõhja suhteliselt järsk paine, mis märgib üleminekut laugelt šelfilt (keskmine kalle 0,25^o) tunduvalt suurema kaldega mandrinõlvale. Enamasti asub šelfi perv umbes 200 m sügavusel, kuid kõrgetel laiuskraadidel on see sügavamal (näiteks Põhja-Jäämeres 350...400 m sügavusel).

Šelf koosneb kolmest osast: üla-, kesk- ja alaosa. Ülaosa, st veealuse **rannanõlva** ehk **rannaku** kujundamisel on tähtis roll lainetusel. Pinnamood on liigestatud, kujunevad maasääred, põiksääred, barrid jt rannavormid. Šelfi keskmine osa on **aleuriitsete**[5] ja **peliitsete**[6] setete kuhjeala, kuid siia koguneb ka maismaalt kantud jämedamat settematerjali. See on juba tasandunud pinnamoega vöönd. Šelfi alumist (ala-) ehk välisosa mõjutab avameri ja kauguse tõttu rannast on siin settematerjali vähe. Toimub üleminek mandrinõlvaks, varasemad maismaa pinnavormid on siin hästi nähtavad ja setted jämedamad.

Šelf on hüdrograafiliselt kõige paremini uuritud maailmamere osa. Siin leidub rohkesti maavarasid: naftat, gaasi, kivisütt, rauamaaki jt. Šelfi üldpindala on 31 081 000 km^2.

Mandrinõlv on maailmamere põhja kallak (joon. 1.7), mis jääb mandrilava ja siirdeala vahele. Kohati läheb ta vahetult üle süvamerenõoks, kuid enamasti raamistab teda mandrijalam, mis läheb aegamisi (kaldega 0,25°) üle ookeanipõhjaks.

Mandrinõlva alumine piir võib asuda väga erineval sügavusel (keskmiselt 3660 m). Atlandi ookeanis kõigub see näiteks vahemikus 1500...4000 meetrit. Mandrinõlva kalle on enamasti 2...5° (keskmiselt 3°26`), kuid kohati ka üle 25° (Norra fjordides ja Biskaia lahes kuni 45°); kui niisugune kalle jätkub 50 km ulatuses ja enamgi, siis tekib siin sageli võimsaid pinnasevoolusi, mis kutsuvad esile suuri põhjareljeefi muutusi.



Joonis 1.7. Ookeani ja selle äärealade põhimõtteline profiil. Saarkaare ala on vulkaaniliselt aktiivne, samuti ookeani keskahelik. Sügavaimad süvikud on Mariaani (11 000 m), Tonga (10 900 m), Kuriili–Kamtšatka ja Filipiini (10 500 m). Šelfi alaosa on avamere mõjuala, keskosa – setete kuhjeala, rannanõlv (ülaosa) – lainete mõjuala. Mandrinõlva kalle on 2...5°, kohati (nt Norra fjordides ja Biskaia lahes) isegi 25...45°. Šelfi on kõige rohkem uuritud ja sel on mandriga sarnane geoloogia ja reljeef

[5] Aleuriit – liivast peenem, savist jämedam sete, möll.

[6] Peliit – peeneteralisest materjalist ja savimineraalidest koosnev sete.

Mandrinõlva keskmine laius on 70 km, kuid seegi kõigub suurtes piirides, 12-st kuni mõnesaja kilomeetrini. Tihti leidub mandrinõlval astangulisi pinnavorme, mis kohati on nii laiad, et moodustavad veealuseid platoosid (näiteks Florida poolsaarest idas asuv 300 km laiune Blake'i platoo). Teine sageli esinev veealune pinnavorm on kanjon. Enamik kanjoneist asub 2000...3000 m sügavusel ja on kujunenud murrangujoontel. Just piki selliseid kanjone toimuvad suured settematerjali ümberpaiknemised.

Hüdrograafiliselt on mandrinõlva vähe uuritud, sest navigatsiooni jaoks on see ala üldjuhul ohutu. Mandrinõlva jalam (ka mandrijalam) on väikese kaldega nõrgalt lainjas merepõhja osa, mis eraldab mandrinõlva ookeanipõhjast. Selle ala kogupindala on 25,9 mln km^2 ja keskmine laius mõnisada kilomeetrit. Mandrijalamil paikneb tavaliselt paks settekiht.

Siirde- ehk üleminekualad haaravad enda alla umbes 8% maailmamere pinnast ja need on kõige suurema vertikaalse liigestatusega piirkonnad.

Siirdealad paiknevad ookeanide ja mandrite vahel ning siin muutub mandrikoor ookeanikooreks. Tuntuim siirdeala on Vaikse ookeani lääneosa. Struktuurilt koosneb siirdeala kolmest osast: **ääremerede häilud**, **saarkaared** ja **ookeanisüvikud**. Ääremerede häilude ja süvikute all olev maakoor erineb ookeanikoorest üksnes palju paksema settekihi poolest. Saarkaarte kohal on maakoor aga kolmekihiline: lisandub graniidikiht. Ääremerede häilud on tasase pinnamoega. Neis esineb astanguid, veealuseid vulkaane, orgusid ja kõrgendikke.

Saarkaarteks nimetatakse veealuseid vallilaadseid kerkealasid, mis on pikisuunas 1500–2000 km ulatuses välja venitatud. Kohati ulatuvad ahelike harjad ookeani pinnale, moodustades kaarjaid saarkette. Saarkaarte piires esineb vulkanismi ja maavärinaid. Kohati on siin märgatud Maa süvasoojuse 3...7-kordset tõusu.

Süvikud kujutavad endast väga sügavaid, kitsaid ja pikki järsuveerulisi nõgusid maakoores. Nende ristprofiil on V-kujuline. Kitsas põhi võib sinna kogunevate setete tõttu olla ka tasane.

Süvikute laius ei ületa 150 km, pikkus ulatub kuni 1000 km ja sügavus on tavaliselt üle 6000 m. Teadaolevast 35 süvikust paikneb 28 Vaikses ookeanis, kusjuures sügavaim on Mariaani süvik. Väga sügavad on ka Tonga, Kuriili–Kamtšatka, Filipiini ja Jaava süvik.

Ookeanide keskahelikud said tuntuks alles hiljaaegu. Need kujutavad endast gigantseid mäeahelikke, mille telg paikneb enam-vähem ookeanide keskjoonel. Keskahelikud moodustavad pideva ahela, mille üldpikkus on 75 000 km ja kogupindala 55,3 mln km^2. Kõige enam uuritud Kesk-Atlandi ahelik hõlmab Atlandi ookeani põhjast peaaegu ühe kolmandiku. Keskahelike ookeanilisel maakoorel on eriline ehitus. Süvapuurimistega on selgunud, et nende telgvööndis, kus toimub maakoore pidev väljavenitamine ja laamade eemaldumine vastassuundades, settekivimid puuduvad või esineb seal vaid õhukese kattena kõige hilisemaid kvaternaarisetteid. Keskahelikust mõlemas suunas setete paksus suureneb ning läbilõikes ilmnevad üha vanemad settekivimid. Nimetatud piirkond on kõrgendatud seismilisuse, vul-

kanismi ja eripäraste geofüüsikaliste protsesside ala. Keskahelikel on spetsiifilised morfograafilised ja morfoloogilised tunnused. Ristlõikelt on need vallid, mille laius kõigub mõnesajast kuni 1500...2000 kilomeetrini ja mille nõlvad on tugevasti liigestatud. Telje piirkonnas eristatakse kahte paralleelset ahelikku, mida eraldab sügav alang, nn **riftiorg**. Riftiorgu palistavaid ahelikke nimetatakse riftiahelikeks ja kogu teljeala riftivööndiks. Osa vööndi harjadel asuvaid alasid kerkib saartena üle veepinna.

Kahel pool keskmäestikke asuvad hiiglaslikud süvamerenõod, mis hõlmavad umbes 54% maailmamere põhjast ja ligikaudu 40% maakera pindalast (193,8 mln km^2). Neid iseloomustab basaltne ehk ookeaniline maakoor. Süvamerenõgude pinnamoes eristatakse kahte põhilist reljeefitüüpi: **abüssaalsed** ehk süvaveelised tasandikud (umbes 10% ookeanipõhjast) ja abüssaalne künklik reljeef. Nõgude sügavamad osad on paksude põhjasetete kihtide tõttu väga tasased (kalle alla 1'). Abüssaalses künklikus reljeefis on valdavalt 50...500 m kõrgused künkad diameetriga 1...10 km. Künklik abüssaal on enam levinud Vaikses ookeanis.

1.8. Mererand ja rannik

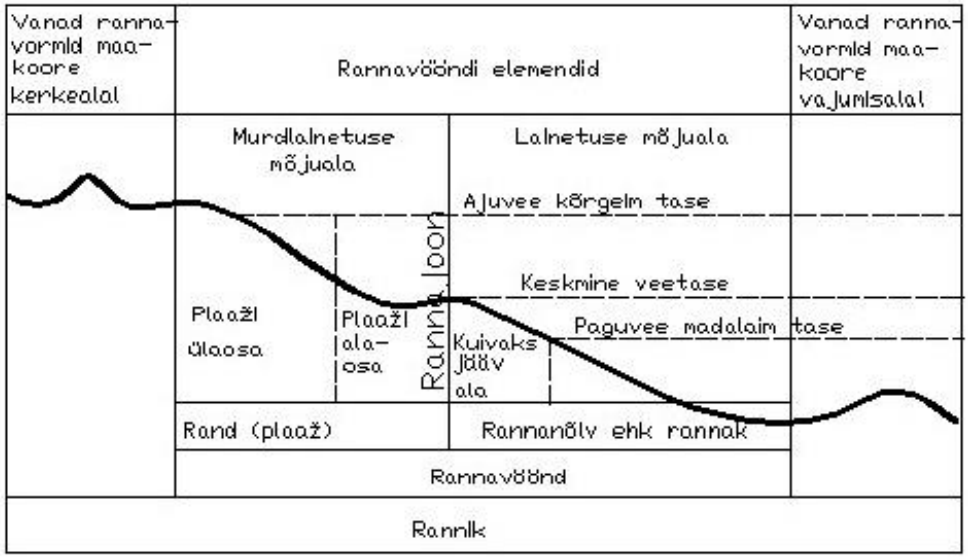
Tänapäeval mõistetakse **rannavööndi** all suure veekogu – mere, suurjärve või suure veehoidla põhja ja sellega piirnevat maismaavööndit, mida kujundab või on kujundanud lainetus. Seega koosneb rannavöönd maismaalisest ja veealusest osast, nendevaheliseks piiriks on **rannajoon**. See nihkub kord maismaa, kord veekogu poole vastavalt sellele, kas tegu on tõusu- või mõõna-, aju- või paguveega. Esimesed nähtused on perioodilised, teised aperioodilised. Maa-ala, mille piires rannajoon kõigub, on **rand** (joon. 1.8). Eristatakse ajuveeranda, mis jääb keskmise ja kõrgeima rannajoone asendite vahele, ning paguveeranda, mis ulatub keskmisest veeseisust (rannajoonest) kuni veekogu madalseisu piirini. **Kallas** on jõgedel ja väikejärvedel, kus rannadünaamilised protsessid (lainete murrutus, setete risti- ja pikiränne jms) puuduvad.

Rannavööndi ehk **randla** veealust osa nimetatakse **rannanõlvaks** ehk **rannakuks**. Maapinna kallakuse järgi eristatakse laug- ja järskrannavööndit. Eestis esineb vaid laugrannavöönd, mis jaguneb lausk- ja järsakrannavööndiks. Tekketingimuste järgi liigitatakse murrutus- ja kuhjerannavööndit. Rannavööndi veelgi üksikasjalikumal liigitamisel eristatakse nende alltüüpe. Eestis on murrutusrannavööndi alltüübid kalju-, pank-, moreen- ja astangrannavöönd (ehk -rand), kuhjerannavööndi alltüübid aga veeristiku-, liiva- ja möllirannavöönd (ehk -rand).

Rannikut on Eestis käsitatud mitmeti. Möödunud sajandi kahekümnendatest aastatest saadik on ranniku all mõistetud merd ja suurjärve ümbritsevat vööndit, mille laiuseks on vaatepiiri kaugus maa ja vee kokkupuutejoonelt ehk rannajoonelt ja mille üheväärseteks osadeks on rannikumaa ja rannikumeri. **Tänapäeval käsitatakse rannikuna maismaa ja suure veekogu kokkupuuteala, mille piires on esmajoones vee lainetustegevuse ja rannavööndi ajaloolise nihkumise tulemusena kujunenud spetsiifilised pinnavormid.**

Randasid saab eristada mitmeti. Üks võimalus on mõjustatus lainetuse poolt, näiteks lainetusest vähemõjustatud rannad (nt skäärrannikute rannad), lainetusväliste protsesside mõjul aktiivselt arenevad rannad (nt mangroov- ja korallrannikute rannad) ja lainetuse aktiivsel mõjutusel arenevad rannad. Viimasesse liigituvad ka Eesti rannad, mis ühtlasi kuuluvad õgvenduvate rannikute piirkonda. Eestimaale tüüpiline õgvenduv laheline kulutus-kuhjerannik on nime andnud ka Lahemaa Rahvuspargile. Märksa harvem esineb meil kulutus-kuhjelist õgurannikut (nt Hiiumaa põhjarannikul) ja kuhjelist õgurannikut (nt Narva lahes).

Alla poolemeetriste loodetega merede navigatsioonikaartidel kujutatakse rannajoont ühe joonega, millele vastab veepiir mere keskmise taseme korral. Üle poolemeetriste loodetega merede puhul kujutatakse rannajoont kahe joonega: üks neist näitab vee piiri kõige madalama veeseisu ajal, teine aga vastab kõige kõrgemale veeseisule.



Joonis 1.8. Ranniku ja rannavööndi elemendid

Maailmamere rannajoone pikkus on umbes 777 000 km (see tulemus on pöördvõrdeline mõõtmiste intervalliga). Eesti rannajoone pikkus on ligikaudu 3790 km, millest 2/3 langeb saarte arvele.

Kulutuse ning kuhje keeruka koosmõju tõttu on ookeanide ja merede rannikud väga mitmekesised (joon. 1.9). Väliste morfograafiliste tunnuste alusel jaotatakse need kõrguse poolest madalateks, kõrgeteks ja mägisteks rannikuteks, viimased võivad olla katkendlikud või esineda ühtse järsu seinana.

Rannajoone kuju järgi eristatakse **sirget, õgvendunud, käänulist (looklevat), sääre-list** ja **saarelist** rannikut. Sirgel rannikul puuduvad looked suurte vahemaade ulatuses. Siin võivad vahelduda kõrged ja järsud ning madalad ja lauged lõigud. Õgvendunud rannik paistab silma oma sujuva kaarekujulise rannajoonega ja lauge rannaga, mille taga võib kerkida järskude nõlvadega kõvadest kivimitest kõrgendik. **Käänuline** rannik koosneb mitmest lähestikku asuvast abajast ja lahest. Kui naaberabajate vahemaa ületab abaja suudme laiuse vähem kui 10 korda, siis nimetatakse sellist rannikut **laheliseks**. **Sääreline** on selline rannik, kus rannajoonega paralleelselt on välja kujunenud maasäärad ja barrid. **Saarelist** rannikut iseloomustab saarte ja saarekeste rohkus.

Järgnevalt kirjeldame veel mõningaid iseloomulikke rannikutüüpe.

Fjordrannikut iseloomustavad arvukad kitsad ja sügavad lahed (fjordid), mis ulatuvad kümneid kilomeetreid maismaasse. Fjordide seinad koosnevad kõvadest kivimitest ja neil on järsud, tihti püstloodsed nõlvad. Fjordrannik on väga levinud Skandinaavia poolsaarel, Koola poolsaare põhjaosas ja Novaja Zemlja saartel. Fjordid on arvatavasti tekkinud tektooniliste lõhede kohale ja hiljem on neid kujundanud liustikud.

Skäärrannik paistab silma keerulise reljeefi poolest. Selles on rohkesti korrapäratu kujuga kaljulahtesid, väikseid madalaid saari, veealuseid kaljusid ja rahusid. Skäärrannik on laialt levinud Soome lahe põhjaosas ja Botnia lahes.

Dalmaatsia rannik on oma nime saanud Aadria mere Dalmaatsia piirkonna järgi. Sellele rannikule on iseloomulik piki rannajoont paralleelselt väljavenitatud saared ning poolsaarte, lahtede ja väinade küllus.

Riiasrannikut iseloomustab suur liigestatus ja see moodustub kohtades, kus mäeahelikud jõuavad risti rannikule. Pärast maismaa vajumist uputas meri paljud orud ja muutis need väljavenitatud kiilukujulisteks lahtedeks. Sellise ranniku näiteks on Sevastoopoli laht. Selgemini on riiasrannikud välja kujunenud Hispaanias, kus selliseid kiilukujulisi lahti nimetatakse *ria*'deks.

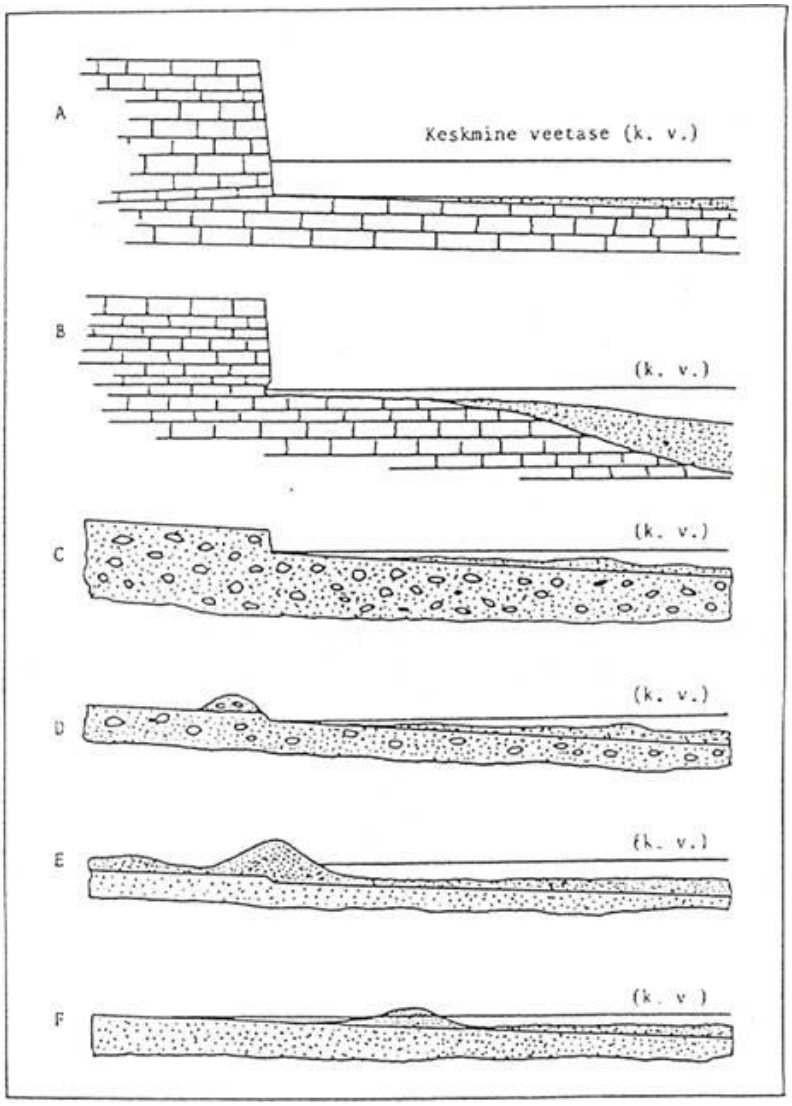
Limaanrannik sarnaneb riiasrannikuga, kuid see tekib siis, kui meri ujutab üle jõeoru osad.

Laguunrannik meenutab mõneti limaanrannikut, kuid siin on madalaveelised lahed – laguunid – välja venitatud piki üldist rannajoont ja merest eraldatud maasääre või barriga. Laguunrannikul on reeglina kaks rannajoont: maismaapoolne sisemine, mis on väga käänuline, ja välimine, mille moodustab enam-vähem sirge kuhjeline rannavorm.

Deltarannik kujuneb suurte jõgede suubumisel merre ja paistab silma jõe jaotumisega paljudeks harujõgedeks ja sootideks. Sellise ranniku üksikosad meenutavad kreeka tähte delta (Δ), sellest tuleb ka ranniku nimetus.

Korallrannik moodustub korallriffidest. Korallehitised kas liituvad tihedalt rannaga, moodustades rannarifi, või asuvad sellest teatud kaugusel, moodustades barjäärrifi. Korallrannik esineb ainult troopilistel ja subtroopilistel aladel.

Mangroovrannik tekib samuti vaid troopilistes meredes. Kohtades, kus tihedad mangroovimetsad ulatuvad rannajooneni, toimub küllaltki kiire ranna kasvamine mere poole. Põhjuseks on setete kogunemine mõõnavoolude mõjul mangroovide õhujuurte ümber.



Joonis 1.9. Erinevaid rannikuprofiile: *A* – aeglaselt sügavnev pankrannik; *B* – kiiresti sügavnev pankrannik murrutuskulpaga; *C* – astangrannik kobedates setetes; *D* – kruusaveeristikrannik rannaliivaga; *E* – kuhjeline liivarannik; *F* – barri või maasäärega eraldunud laguunrannik [Laigna, Kala, 2001]

1.9. Merepõhja pinnamoe näitajate esitamise viise

Põhiline pinnamoodi iseloomustavate andmete esitamise vahend on navigatsioonikaart (merekaart). Teave pinnamoe kohta esitatakse merekaartidel sügavusarvude ja samasügavusjoonte (**isobaatide**) abil.

Sügavusarvud annavad ühese kvantitatiivse hinnangu merepõhja pinnamoele, kusjuures nende geomeetriline täpsus, võrreldes teiste viisidega, on suurim, sest sügavusarvud kantakse kaardile vahetult sügavuse mõõtmise ja koordinaatide märkimise teel. See on üpris pikk ja keeruline protseduur, mida vaadeldakse edaspidi.

Parema ülevaate saamiseks ühendatakse sama sügavusega punktid kaardil sujuva kõveraga, mida nimetatakse samasügavusjooneks. Geomeetriliselt kujutavad samasügavusjooned pinnamoe (põhjareljeefi) ja üksteisest etteantud kaugusel asetsevate horisontaaltasandite lõikejooni. Kaugust naaberlõigete vahel mööda vertikaali nimetatakse samasügavusjoonte lõikekõrguseks, horisontaalkaugust kõrvuti asetsevate samasügavusjoonte vahel aga aluseks.

Samasügavusjooned kui sügavusarvude matemaatiline üldistus kannavad endas palju rohkem teavet kui sügavusarvud. Samasügavusjoonte parv annab üldise ettekujutuse kogu põhja pinnamoest.

Pinnamoe paremaks kujutamiseks kasutatakse langekriipse, sügavused aga kirjutatakse vahetult samasügavusjoontele. Ettenähtud vahede järel joonistatakse samasügavusjooned paksemalt. Pinnamoe vormid, mida samasügavusjoontega väljendada ei saa, kantakse kaardile leppemärkide abil.

Veelgi suurema ülevaatlikkuse saamiseks kasutatakse kaartide kihikaupa värvimist, kusjuures samasügavusjoonte vahed tehakse eri toonides. Üleminekul suurematele sügavustele muutub geograafiliste kaartide värvitoonide intensiivsus helesinisest tumesiniseni. Navigatsioonikaartidel eelistatakse madalamate, st ohtlikumate alade puhul kasutada sinise tumedamaid toone ja suuremate sügavuste puhul heledamaid toone.

Kaartide lugemise hõlbustamiseks on olemas veel muidki võtteid.

Omaette rühma moodustavad nn reljeefsed kaardid, millel merepõhja pinnamoodi kujutatakse kolmemõõtmelisena. Kolmemõõtmelised kaardid koostatakse tänapäeval arvutite abil. Küllaltki palju on koostatud arvmudeleid teatud pinnavormide näitlikustamiseks õppeotstarbel. Nende küsimustega tutvutakse erikursustes.

Mitmesuguste mudelite olemasolu suurendab oluliselt laevajuhtimise automatiseeritust.

Klassikalise meresõidu piiranguid aitab ületada kaks kiiresti arenevat tehnoloogiat: üleilmne satelliitnavigatsioonisüsteem **GNSS** (*Global Navigation Satellite System*) ning elektronkaartide kuva- ja infosüsteem **ECDIS** (*Electronic Chart Display and Information System*). Eestis kasutatakse valdavalt GNSSi alaliiki GPSi, mis põhineb USA satelliitidel.

Elektrooniline kaart on hariliku merekaardi kujutis arvuti ekraanil. Kaart on seotud satelliitnavigatsoonisüsteemiga ja mitmete teiste anduritega.

Koos laeva asukoha määramise süsteemiga GNSS annab ECDIS meresõitjale arvuti kuvaril kaardi, millel on koos kogu laeva ümbritsev hüdrograafiline informatsioon ja plingib laeva asukohta märkiv ikoon. Kuvaril on näha sügavused, meremärgid, rannajoon, samasügavusjooned. ECDIS seob kaardil oleva informatsiooni ka teiste navigatsioonivahenditega, nt gürokompassi, radariga jms. Süsteem on kavandatud andma meresõitjale kogu informatsiooni, mis on vajalik ohutu laevasõidu tagamiseks kaardil kujutatud alal, ja avab meresõitjale uued võimalused manöövrite sooritamisel ja marsruudi planeerimisel.

ECDIS võimaldab operaatoril muuta kaardimõõtu ja kujutada ohtlikke piirkondi kuvaril suuremas kaardimõõdus. Akende süsteemi tõttu on võimalik saada ühest ja samast kaardist mitu kujutist või liita ekraanil mitu erinevat kaarti üheks. Ekraanil on teavet laeva jõuseadmete koormatusest ja kütusekulust, laeva püstuvusest ja muust. Multimeedia tüüpi kuvari ekraanil saab esitada lootsiraamatute ja tõusumõõna tabelite jooniseid ning graafikuid. Laevade lootsimist kergendab liikluse juhtimise süsteem **VTS** (*Vessel Traffic Service*), mis annab infot vabade ankruplatside, sadamasse suunduvate ja sealt väljuvate laevade liikumise kohta.

ECDIS võimaldab tarbijal kujundada tema vajadustele vastava kaardi, st kujutada kaardil ainult seda teavet, mis talle hetkel tarvis on, eemaldades mittevajaliku. Näiteks kalamehed saavad kanda kaardile oma püüniste asukoha ja eelistatud püügipiirkonnad.

Infosüsteemil ECDIS on teisigi häid omadusi, mis aitavad tunduvalt suurendada meresõiduohutust. Nii on võimalik „läbi mängida" laeva liikumise kursil ja prognoosida tema arvutuslikku asukohta ükskõik millisel ajahetkel. Ühendades nimetatud süsteemi kaartide andmebaasiga, saab kindlaks teha laeva kursil asuvad ohud ja teavitada sellest tüürimeest.

ECDIS-seadmed võimaldavad kujutada kaardil ka radarilt saadavat teavet läheduses viibivate laevade kohta, määrata nende liikumise suuna ja kiiruse ning lahendada lahknemise ülesande otse kaardil nii, et tüürimees näeb pidevalt ka ümbritsevat navigatsioonilist olukorda.

Tänapäeval on rakendatud ka meetodit „tegelik sügavus antud hetkel". Loodetega meredes on hetkesügavuse määramine küllaltki keeruline ülesanne. Kolmemõõtmeline GNSS aga määrab tõusu-mõõna jooksvaid elemente ja nende andmete alusel ilmuvad kaardil automaatselt tegelikud sügavused antud hetkel. Ideaalsel ülesande lahendusel saadakse „loodeteta" kaardid.

Marsruudi kavandamine muutub ECDISe kasutamisel lihtsaks: piisab, kui hiire abil märkida kaardile teekonna punktid ja salvestada need arvuti mällu. Edaspidi piisab sama marsruudi kaardile märkimiseks vaid klahvivajutusest.

Tegelikkuses teavitatakse meresõitjaid navigatsiooniolukorra muutuste kohta vastavate väljaannete abil. Tüürimehe ülesanne on need muutused kaardile kanda. See

töö aga nõuab aega ja kannatust. Aasta jooksul tehakse iga kaardi kohta keskmiselt 10 parandust. ECDISe juurutamisega on mõeldav muutuste edastamine sisekanalite kaudu või digitaalseadmete abil.

Automaatset tuvastussüsteemi **AIS** *(Automatic Identification System)*, mida kasutatakse laevadel ja laevaliiklusteenistuses laevade tuvastamiseks ja asukoha määramiseks, hakati arendama möödunud sajandi lõpukümnendil. AIS baseerub jaamadel ja satelliitidel. AISi informatsioon lisandub mereradarile, mis on endiselt primaarne vahend laevade kokkupõrgete ärahoidmiseks.

AIS-seadmestikuga saadud informatsiooni (laevade tuvastamine, asukoht, kurss ja kiirus) võib kuvada AISi või ECDISe ekraanil. AIS hõlbustab laeva vahiohvitseril ja mereametkonnal jälgida laevade liikumist. AIS ühendab ülikõrgsagedusliku saatja–vastuvõtja GNSS-vastuvõtjaga ja teiste elektrooniliste indikaatoritega nagu gürokompass ja laeva pöörde nurkkiiruse indikaator. Laevu, mis on varustatud AIS-aparatuuriga, võib jälgida AISi baasjaamadest, mis asetsevad piki rannajoont, või ka satelliitidelt, mis on varustatud spetsiaalsete AIS-vastuvõtjatega.

Rahvusvahelise Mereorganisatsiooni (**IMO**) rahvusvaheline konventsioon inimelude ohutusest merel (**SOLAS)** nõudis aastal 2002, et AIS oleks paigaldatud kõigile rahvusvahelisi meresõite tegevatele laevadele brutotonnaažiga 300 ja rohkem ja kõigile reisilaevadele nende suurusest hoolimata. 2010. a laienes see nõue Euroopa siseveekogude kaubalaevadele ja 2014. a kalalaevadele, mille pikkus ületab 16 m.

Peale meresõiduohutuse võib AIS täita ka teisi funktsioone:

- kalalaevastiku tegevuse jälgimine;
- merejulgeolek, mis seisneb laevade identifitseerimises ja nende tegevuse jälgimises riigi majandusvööndis või selle ligiduses. Kui AIS on ühendatud radarisüsteemidega, saab mereametkond lihtsamalt laevu eristada, ja kui laevade tegevus erineb tüüpilistest tegevusmallidest, anda vajaduse korral häiret;
- on navigatsiooniabivahendiks, mis seisneb navigatsioonivahendite ja -märkide (tuletornid, platvormid, poid, toodrid jms) asukoha ja dünaamika kajastamises (sh poi valgusti seisukord, ilm ja mere olukord);
- merehädaliste otsing ja pääste, mille jaoks annab teada naabruses olevate teiste laevade asukohast ja navigatsiooniseisundist;
- avariide uurimine, andes põhjaliku iseloomustuse avarii aja ja osalejate navigatsiooniliste näitajate kohta;
- laevastiku ja lastide jälgimine, kusjuures laevaomanik või dispetšer võib jälgida laevade globaalset asendit ja ette näha lastide saabumist sihtsadamasse.

1.10. Eesti vete jääolud

Talvise navigatsiooni korral omavad suurt tähtsust akvatooriumi jääolud, mis olenevad nii vee temperatuurist kui ka eeskätt tuultest ja hoovustest mõjutatud jää liikumisest. Laeva kiirus liikumisel läbi jää sõltub jää paksusest, tihedusest, jääpankade suurusest ja dünaamilistest protsessidest, mis mõjutavad jäälaamu. Üldjuhul on laeva kiirus jääs liikudes väiksem kui vabas vees. Paksema jää puhul on vaja kasutada jäämurdja abi, tuulest kantud rüsijää võib laeva ootamatult vangistada ja tekitada ohtliku olukorra, kus laeva korpus võib viga saada. Rüsistumine on jääpankade kuhjumine, mis tekib siis, kui kaks jäälaama surutakse tuule ja/või hoovuste mõjul teineteise vastu. See tekitab jäävalle laamade servaalal või jääkuhjatisi laamade kogupinnal. Nende kõrgus võib ulatuda mitme meetrini üle merepinna ja sügavuti kordades enam.

Satelliitide, lennukite, laevade ja hüdrometeoroloogiajaamade kogutud andmete alusel koostatakse jääolude kaardid, millele kantakse eri jääliikide piirid teatud kuupäeval; jää tihedus ja paksus; rüsi, pragude, lahvanduste ja kanalite esinemiskohad.

Pikaajaliste vaatlustega on kindlaks tehtud, et jääolud on aastati väga muutuvad ja nende täpne prognoosimine ei ole üldjuhul võimalik. Siiski on tuvastatud mõningaid seaduspärasusi.

Sügisel moodustub õhutemperatuuri alanedes rannajää. Teatud juhtudel võib pinnal tugevasti jahtunud vesi põhja langeda, tekitades nii põhjajää, mis aga mõne aja pärast tõuseb pinnale.

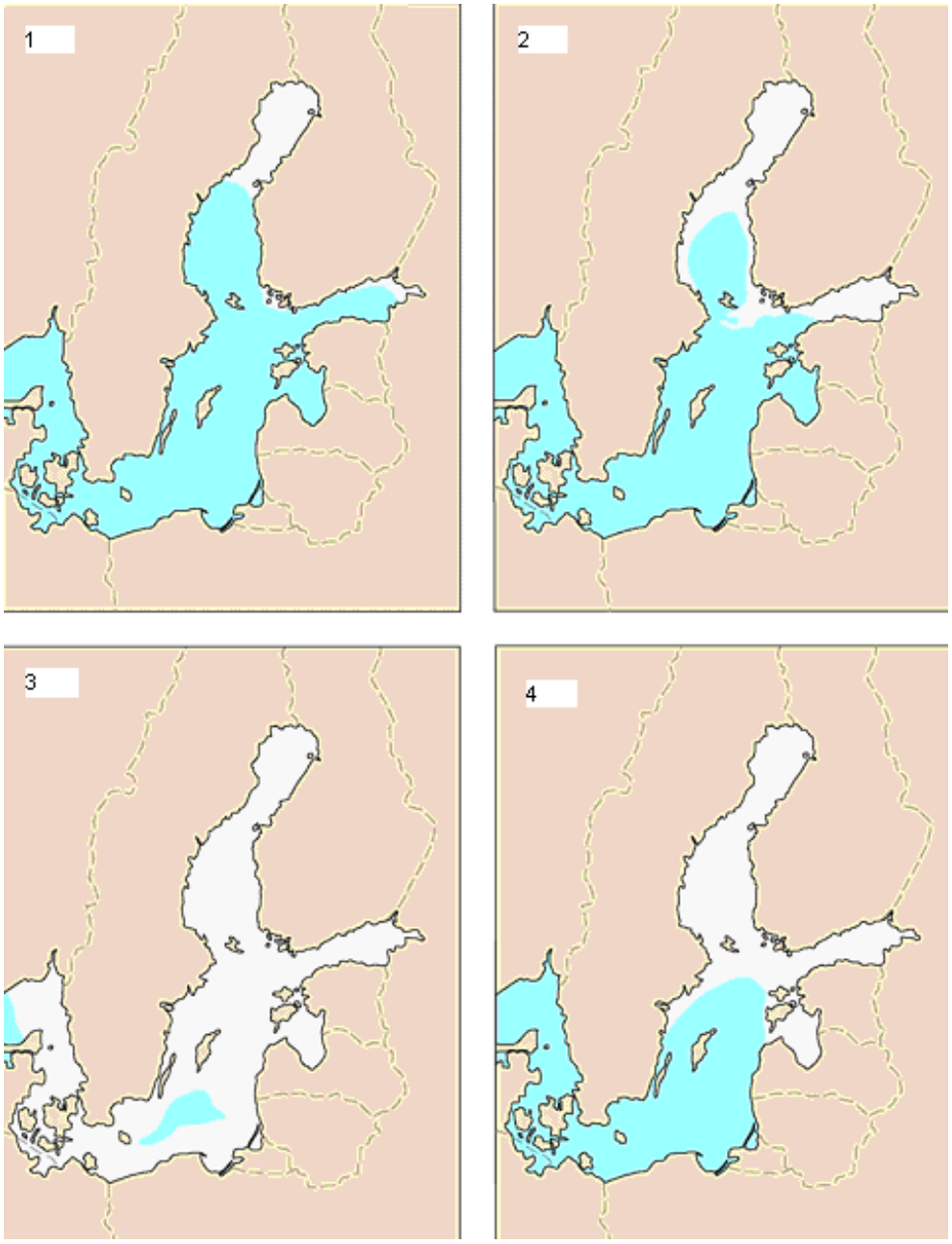
Kuna Läänemere avaosast pärit soojem ja soolasem vesi liigub talvel piki Eesti rannikut itta ja külmem ning magedam vesi piki Soome lõunarannikut läände, siis on jääolud Soome lahe Eesti rannikul keskmisel talvel kergemad kui Soome rannikul. Liivi lahes tekib jää igal talvel ja eriti rasked on jääolud Pärnu lahes, kus karmil talvel on isegi jäämurdjatel raskusi navigatsiooni tagamisega.

Tallinna ja Muuga lahes on jääd talvel keskmiselt 70...75 päeva, kusjuures Muuga lahes veidi vähem, sest laht on sügavam ja avamere poolt avatum. Raskemaks muutuvad jääolud Kundast ida poole, kus on jääpäevi 85...95.

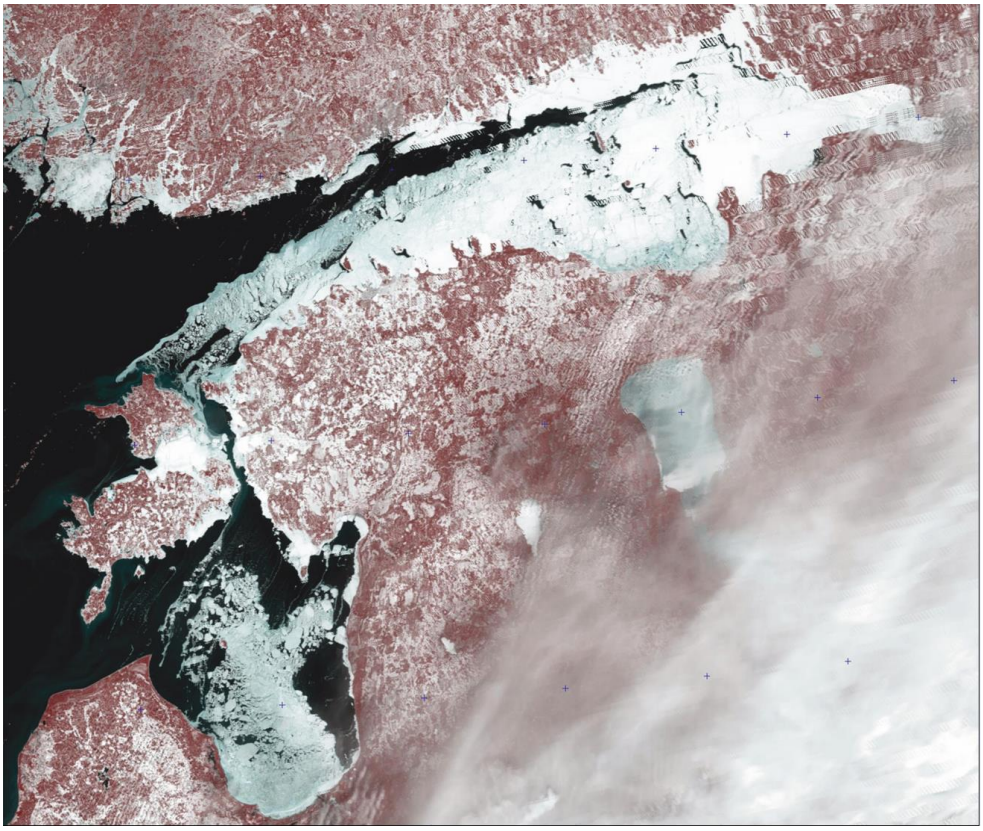
Väinameres on jääpäevi keskmiselt 110...120, Pärnu lahes 120...150, Ruhnu ümbruses 70...80, Saaremaast ja Hiiumaast läänes aga vaid väga külmal talvel 10...20 päeva.

Püsiva jääkatte puhul on jää keskmine paksus Eesti põhjaranniku lahtedes 25...30 cm, Liivi lahes 30...45 cm, Väinameres 40...60 cm ja Pärnu lahes 50...80 cm. Tormid võivad ajada kokku kuni 15 m kõrguseid rüsijäämägesid (Sorgu madal Pärnu lahes, aga ka Pärnu lahe rannas).

Jääminek toimub märtsi lõpus või aprilli alguses ja kestab keskmiselt 10 päeva.



Joonis 1.10. Jääkate Läänemeres. 1– 1989. aasta pehme talv; 2 – 1981., 1983. ja 1991. aasta keskmine talv; 3 – 1987. ja 4 – 1985. aasta karm talv. Sinine värv märgib vaba vett [Veeteede Amet, 2003]



Joonis 1.11. Satelliidifoto jääoludest 06.04.2003. Varakevade kohta haruldane kirdetorm on vabastanud jääst Pärnu lahe, Soome lahe põhjaosa ja Väinamere keskosa. Rüsijää takistab laevaliiklust Eesti põhjarannikul ja Liivi lahe lõunaosas [Veeteede Amet, 2003]

Eesti suurtes sadamates, mis asuvad Soome lahe lääneosas (Tallinn, Muuga, Paldiski), pehmel või keskmisel talvel laevaliiklusega erilisi probleeme ei ole. Läänemere avaosas asuvad sadamad on keskmisel talvel peaaegu jäävabad. Samal ajal Pärnu, Roomassaare ja Kunda sadamas vajatakse jäämurdja abi igal talvel, kusjuures eriti raske on murda Pärnu lahe rüsijääd. Väinameres toimub talviti ainult mandri ja saarte vaheline parvlaevaühendus, mis võib katkeda üksnes väga karmil talvel.

Jääuuringuid sooritatakse sageli jäämurdjalt ja selle käigus mõõdetakse murtud jää paksust, rüside paksust, jää ja lumekihi paksust puuraukudes (joon. 1.12), jää poorsust ning jää ja vee temperatuuri. Visuaalselt hinnatakse merejää tüüpe ja mõõdetakse rüsivallide kõrgust.

Joonis 1.12. Puursüdamiku võtmine jää paksuse uurimiseks [Veeteede Amet, 2003]

2. HÜDROGRAAFILISTE TÖÖDE EESMÄRK JA SISU

2.1. Tööde eesmärk

Hüdrograafilistel töödel mõõdetakse eelkõige veekogude sügavusi ning õpitakse tundma teisi veekogudega seotud nähtusi. Nende tööde iseloomu ja sisu määrab meresõidul, kalapüügil, rannamajanduses jt elualadel vajatava teabe hulk.

Käesolevas õpikus vaadeldakse põhiliselt hüdrosfääri tähtsaimat osa – merd.

Hüdrograafilised tööd merel hõlmavad järgmiste põhielementide tundmaõppimist ja kirjeldamist:
1) merepõhja pinnamood ja navigatsiooniohud;
2) mererannad koos navigatsiooni infrastruktuuri objektidega;
3) merepõhja pinnas;
4) okeanograafilised ja hüdrograafilised näitajad, sh looded ja hoovused (Eestis koos teiste asjast huvitatud organisatsioonidega), vee temperatuurid ning soolsused;
5) maa raskusjõud ja magnetism (Eestis koos geodeetidega).

Hüdrograafilise teabe mitmekesisuse tõttu esitatakse ja säilitatakse infot erinevalt.

Informatsiooni säilitatakse andmepankades, kus teave salvestatakse andmekandjatele digitaalsel kujul. Samas pole merekaardile alternatiivi, kui tegemist on teabe vahetu vastuvõtmisega inimese poolt. Seetõttu jääb merekaart (kas paberkandjal või digitaalne) kui hüdrograafiliste tööde lõpptulemus tähtsaimaks hüdrograafilise informatsiooni allikaks maailmamere kohta. Sellest tulenevalt on endiselt hüdrograafiliste tööde lõppeesmärgiks usaldusväärsete ja täpsete merekaartide koostamine, aga ka ülejäänud hüdrograafilise andmestiku kogumine navigatsiooni, majandustegevuse, merekaadri väljaõppe, teadustöö ja teiste elualade tarvis.

2.2. Tööde sisu

Hüdrograafiliste tööde sisuks on otsene mõõtmistöö merel, eelkõige põhiparameetri – sügavuse mõõtmine ja saadud sügavusandmete kohamäärang. Selliste mõõtmiste tulemusena saadakse vajalikud andmed merepõhja ja selle osade pinnamoe kohta, mida vajatakse merekaartide koostamisel.

Merekaartide täpsuse aluseks on sügavuse mõõtmise täpsus. Seega, mida põhjalikumalt ja mahukamalt on sügavust vaadeldaval akvatooriumil mõõdetud, seda paremini tuuakse välja pinnamood, seda täpsemad on merekaardid ja seda ohutum navigatsioon.

Akvatooriumi mõõdistamisel liigub aparatuuri kandev alus ühest punktist teise, seetõttu tuleb mõõta võimalikult kiiresti. Tähtis on seejuures määrata koordinaadid väga täpselt. Niisiis, et igal hetkel oleks mõõtmine seotud tegeliku asukohaga, on vaja koordinaate määrata pidevalt. Asukoht peab aga olema seotud Maa pinnaga.

Selleks on vaja mõõtmiste alusplaan siduda kasutatava koordinaatide süsteemiga. Maismaamõõtmiste puhul tehakse seda geodeetiliste alusvõrkude abil. Merel sellised võrgud puuduvad ja seetõttu kasutatakse hüdrograafias kohamääranguks valdavalt GNSSi (*Global Navigation Satellite System*) reaalaja tehnikat.

Veekeskkonnas on osutunud kõige otstarbekamaks kasutada sügavuste mõõtmisel ultrahelisignaale, mistõttu on hüdrograafias enim levinud kajaloodid.

Eespool öeldut kokku võttes võib merepõhja sügavuse määramise jaotada järgmisteks etappideks:

- mõõteaparatuuri kandjate (aluste) valik ja seadistamine;
- sügavuse mõõtmise aparatuuri valik;
- plaanilise aluse loomine uuritava akvatooriumi asukoha täpseks määramiseks Maa pinnal;
- seadmete valik koordinaatide määramiseks mõõtmiste ajal;
- mõõtmistulemuste töötlemine.

Suhteliselt väikese sügavuse ja keerulise pinnamoega aladel, kus toimub intensiivne laevaliiklus, mõõdistatakse merepõhja pinnamoodi **hüdrograafiliste kajatraalide** ehk **mitmeantenniliste kajaloodide** (*Sweep Systems or Multi-transducer Aarrays*) või **mitmekiireliste kajaloodide** ehk **lehvikkajaloodide** (*Multibeam Systems or MBES or Swath Echo Sounders*) abil [IHO, 2008]. Nimetatud seadmetega on võimalik teha merepõhja pinnamoe lausuurimist, mis aitab välja selgitada valdavalt kõik navigatsioonile ohtlikud kohad.

Mõõtmine ja traalimine, andes põhjareljeefi morfomeetrilised ja morfograafilised karakteristikud, vajavad lisateavet pinnamoe geneetiliste tunnuste kohta, mida saadakse põhjasetete uurimise teel. Need andmed on vajalikud näiteks ankrupaiga valikul, vesiehituses, maavarade ammutamisel, veealuste nafta- ja gaasijuhtmete rajamisel.

Pinnamoe mõõdistamisel, traalimisel ja pinnaseproovide võtmisel saadud andmed ei ammenda kogu meresõiduks vajalikku informatsiooni. Peale selle on oluline teada ja märkida merekaartidel andmed looduslike ja tehisorientiiride paiknemise kohta, rannale lähenemise teede ja randumisvõimaluste, ankrupaikade ja tormi eest varjumise kohtade leidmiseks. Ranna ja rannaobjektide kujutised kantakse merekaartidele topograafilistelt plaanidelt. Rannal tehtavate topograafiliste tööde eripära tõttu tegelevad sellega hüdrograafid. Seega on hüdrograafiliste tööde tähtis osa mandrite rannikualade ja saarte topograafiline mõõdistamine.

Merede ja ookeanide majandusliku hõlvamise käigus on merre rajatud palju tehisobjekte: nafta- ja gaasijuhtmeid, kaableid, rajatisi maavarade ammutamiseks jt. Üha olulisemaks on saanud merepõhja taimestiku ja organismide levialade tähistamine merekaartidel. Eespool loetletu kandmine merekaartidele kuulub samuti hüdrograafiliste tööde valdkonda.

Navigatsioonikaardid (merekaardid) on põhiline teadmiste allikas merede ja veeteede kohta, kuid need ei võimalda kajastada kogu vajalikku teavet, sest suur osa sellest ei ole kujutatav kartograafia meetoditega. Andmed kliima, hüdrometeoro-

loogiliste tingimuste ja toidu-, vee- ning kütusevarude täiendamisvõimaluste kohta avaldatakse teistes materjalides: lootsiraamatutes, laevasõidueeskirjades ja hüdrometeoroloogilistes teatmikes. Vastavad andmed kogutakse samuti hüdrograafiliste tööde käigus, kasutades ühtlasi ka teiste spetsialistide töö tulemusi.

Seega on põhilised hüdrograafilised tööd järgmised:

1) tööde piirkonna geodeetiline ettevalmistus;
2) nullsügavuse määramine ja kõrgusliku aluse rajamine;
3) merepõhja pinnamoe mõõdistamine ja mõõdetud sügavuste taandamine nullsügavusele;
4) ranniku topograafiline kaardistamine;
5) andmete kogumine lootsinduse tarvis.

Nimetatud tööde teostamiseks merel on vaja valida mõõteriistade ja aparatuuri kandja. Olenevalt tööde mahust ja iseloomust kasutatakse erineva suurusega aluseid, alates okeanograafialaevadest kuni väikeste kaatrite ja jetideni. Peamiselt on kasutusel pealveealused. Kui merepõhja on vaja uurida üksikasjalikumalt ning pealveealused seda ei võimalda, tulevad appi vastavalt sisustatud mehitatud või mehitamata allveelaevad. Rannameres, väikeste sügavuste puhul, tehakse vee läbipaistvuse piirini ka **aerolasersondeerimist.**

Teine osa

HÜDROGRAAFIA RUUMIANDMED

3. MEREGEODEESIA

3.1. Uurimisaine ja ülesanded

Meregeodeesia uurib merepõhja reljeefi ja selle peaülesandeks on luua geodeetiliste koordinaatide ühtne süsteem selle kajastamiseks. 1998. a kaotati nõue, et mõõdistustäpsus oleneb kaardi mõõtkavast. Tänapäeval oleneb mõõdistustäpsus alljärgnevast:

- navigatsiooni intensiivsusest mõõdistuspiirkonnas;
- piirkonna sügavusest ja projektlaeva[7] süvisest;
- merepõhja iseloomust.

Nimetatud asjaolu võimaldab moodustada arvutiekraanil nõutava täpsuse ja üksikasjalikkusega navigatsioonikaarte ükskõik millises mõõtkavas.

Lubatud loodimisviga (2σ) ulatub 0,25 meetrist kuni 1 meetrini ja üle selle **(IHO standardi nr 44 täpsusnõuded aastast 2008 – vt alapeatükk 9.1)**.

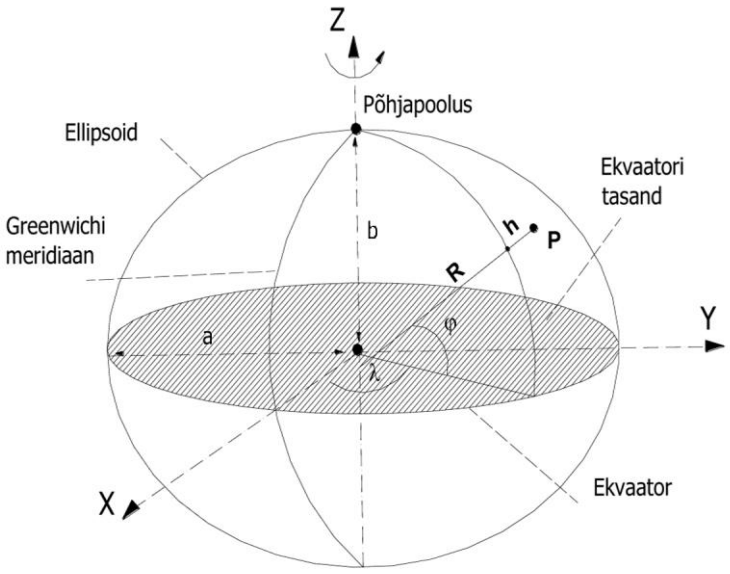
Siinjuures tehakse esimesel juhul lausmõõdistamine mitmekiirelise kajaloodiga või kajatraaliga nii, et iga merepõhja detail mõõtmetega 1 m oleks fikseeritud.

[7] Projektlaev – teatud maksimaalsete parameetritega (süvis, pikkus, laius jms) laev, mis võib antud sadamas, kanalis, merekitsuses, lüüsis jms ohutult manööverdada.

3.2. Meregeodeesias (hüdrograafias) kasutatavad koordinaatide süsteemid

Maa on ruumiline keha ja seetõttu peaks kasutama kohamääranguks ruumilisi koordinaatide süsteeme ning mõõtmistulemused tuleks kajastada gloobusel. Seda on aga praktiliselt võimatu teha, sest isegi avamerel navigeerimiseks kasutatava mõõtkava 1 : 350 000 puhul oleks vaja gloobust läbimõõduga ligikaudu 40 m, rääkimata suurematest mõõtkavadest, mida kasutatakse rannaligidasel meresõidul. Seetõttu tuleb osata Maad kujutada tasandil – merekaardil.

Meregeodeesia kasutab kaartide koostamisel kartograafia meetodeid, kusjuures väiksemate mõõtkavade puhul loetakse tasandile projekteeritav Maa sfääriks, suuremate mõõtkavade puhul aga (üldjuhul mõõtkava 1 : 1 000 000 ja suurem) sferoidiks, st väikese lapikusega **ellipsoidiks.**



Joonis 3.1 Ruumilised (geotsentrilised) ristkoordinaadid *X, Y, Z* ning geodeetilised (ellipsoidilised) koordinaadid λ, φ, h (viimane on kõrgus ellipsoidist). *R* on ellipsoidi normaal, *Z*-telg on Maa pöörlemistelg, *X*-telg on suunatud Maa masskeskmest ekvaatori ja Greenwichi meridiaani lõikepunkti, *Y*-telg on pööratud ekvaatori tasandil ida suunas 90°

Maaellipsoidi põhiparameetrid on pikem pooltelg *a* ja lühem pooltelg *b* (joon. 3.1). Aegade jooksul on leitud neile erinevaid väärtusi, kusjuures vastavad (referents-) ellipsoidid kannavad neid arvutanud teadlaste nime, nagu näiteks Krassovski, Besseli, Hayfordi, Airy, Clarki jt. ellipsoid. Tänapäeval on üleilmselt tunnustatud ellipsoid **GRS80** (*Geodetic Reference System*) ja navigatsiooni ning kartograafia seisukohalt samaväärne NATO, Rahvusvahelise Tsiviillennunduse Organisatsiooni ja IHO ühine standardkoordinaadistik (ruumiline ristkoordinaadistik) **WGS84** (*World Geodetic System*) [Rüdja, Sander, 2013] ning samanimeline ellipsoid põhipara-

meetritega a = 6 378 137 m ja b = 6 356 752,3 m. Venemaa hakkas oma satelliitsüsteemi GLONASS tarbeks kasutama ellipsoidi П390 (*Параметры земли* 90), mille pikem pooltelg erineb GRS80/WGS84 pikemast poolteljest meetri võrra.

Kuna mandrilaamade geotektoonilise liikumise tõttu Euroopa kaugeneb pidevalt Ameerikast ~25 mm aastas, tekkis vajadus stabiilsemate koordinaatsüsteemide järele. Euroopa kasutab Euroopa Terrestrilist Referentssüsteemi (ETRS89), mis ühtib Rahvusvahelise Terrestrilise Referentssüsteemiga (ITRS) epohhil 1989,0. Eelnimetatud süsteemide 3D ristkoordinaatide arvutamiseks geodeetilisteks koordinaatideks kasutatakse ellipsoidi GRS80 parameetreid. Eestis loetakse ETRS89 ja 3D WGS84 (alates G873 st GPS 873. nädalast) identseteks [Eesti keskkonnaministri määrus nr 64/2011].

Põhjalikumalt selgitatakse seda EMERA kõrgema geodeesia aines. GRS80 ja WGS84 erinevus seisneb põhiliselt nende orientatsioonis.

Nende täiendavad (pooltelgedest arvutatud) parameetrid on järgmised:

esimene lapikus $f = \frac{a-b}{a} = 0{,}00335281$,

teine lapikus $f' = \frac{a-b}{b} = 0{,}00336409$,

esimese ekstsentrilisuse ruut $e^2 = \frac{a^2-b^2}{a^2} = 0{,}00669438$,

teise ekstsentrilisuse ruut $e'^2 = \frac{a^2-b^2}{b^2} = 0{,}00673950$.

Geograafiline laius on nurk **geoidi**[8] või **referentsellipsoidi**[9] normaali ja ekvaatoritasandi vahel. Seda mõõdetakse nurgaühikuis (kraad, minut, sekund) ekvaatorist põhja ja lõuna suunas (põhjalaius ja lõunalaius) 0...90º. **Geograafiline pikkus** on kahetahuline nurk algmeridiaani tasandi ja antud punkti läbiva meridiaani tasandi vahel. Seda mõõdetakse nurga- või ajaühikuis **Greenwichi algmeridiaanist** ida ja

[8] Geoid – geomeetriline keha, mis kõige täpsemini vastab Maa tõelisele kujule. Geoidi pind on kõikjal risti loodjoonega ning ühtib ligikaudu merede ja ookeanide häirimata veepinnaga. Massi ebaühtlase paiknemise (jaotuse) tõttu Maa sisemuses on geoidil suhteliselt keerukas kuju, mistõttu geodeetiliste arvutuste puhul asendatakse geoid enamasti maaellipsoidiga. Eesti territooriumil on geoidi kuju astronoomiliste ja geoloogiliste vaatluste andmeil täpsustanud R. Livländer ja H. Keres, hiljem V. Maasik, M. Vermeer, H. Jürgenson, A. Ellmann.

[9] Referentsellipsoid – maakera pinna mingi osa suhtes orienteeritud maaellipsoid; matemaatiline abipind geodeetiliste mõõtmisandmete taandamiseks ja edasiseks arvutamiseks.

lääne suunas (idapikkus ja läänepikkus 0...180º või 0...12^h). Geograafilised koordinaadid määratakse kas astronoomiliste vaatlustega või arvutatakse referentsellipsoidile taandatud geodeetiliste mõõtmiste andmete põhjal.

Esimesel juhul nimetatakse neid **astronoomilisteks koordinaatideks** (tähistused φ – laius, λ – pikkus). Normaaliks on sel juhul **loodjoon**[10]; φ ja λ määravad punkti asukoha geoidil. Kui geograafilised koordinaadid määratakse geodeetiliste mõõtmistega, siis nimetatakse neid **geodeetilisteks koordinaatideks** (tähistused B – laius, L– pikkus). B ja L määravad punkti asukoha referentsellipsoidil. Geodeetilised ja astronoomilised koordinaadid ei ühti. Nende erinevus on tingitud loodjoone kõrvalekaldest.

Astronoomiliseks laiuseks φ nimetatakse nurka antud punkti loodjoone ja ekvatoriaaltasandi vahel. **Astronoomiliseks pikkuseks** λ on kahetahuline nurk astronoomilise algmeridiaanitasandi ja antud punkti läbiva astronoomilise meridiaani tasandi vahel.

Geodeetiliseks pikkuseks L nimetatakse kahetahulist nurka algmeridiaanitasandi ja antud punkti läbiva meridiaani tasandi vahel.

Geodeetiliseks laiuseks B nimetatakse nurka antud punkti läbiva ellipsoidi normaali ja ekvaatoritasandi vahel.

Et merel tehtavate astronoomiliste vaatluste vead ületavad märgatavalt loodjoone kõrvalekalde väärtusi, siis ei arvestata hüdrograafias sageli erinevusi geodeetiliste ja astronoomiliste koordinaatide vahel. Seepärast kasutatakse siin ja edaspidi geodeetiliste või astronoomiliste koordinaatide asemel mõistet **ellipsoidilised** ehk **sferoidilised koordinaadid.**

Ellipsoidilist laiust ja pikkust tähistatakse vastavalt sümbolitega φ ja λ.

Sfääriliste koordinaatide korral samastatakse Maa pind sfääri pinnaga.

Sfääriliseks laiuseks Φ nimetatakse nurka ekvaatoritasandi ja antud punkti läbiva maasfääri raadiuse vahel.

Sfääriliseks pikkuseks Λ nimetatakse nurka algmeridiaani ja antud punkti läbiva meridiaani tasandite vahel.

Kohamäärangul GNSSi abil kasutatakse primaarselt WGS-84 **geotsentrilisi ristkoordinaate** X, Y, Z. Selliste koordinaatide alguspunktiks võetakse ellipsoidi keskpunkt (Maa masskese), nii et Z-telg langeb kokku Maa pöörlemisteljega, X-telg moodustub algmeridiaanitasandi ja ekvaatoritasandi lõikejoonena ning Y-telg on risti XZ-tasandiga ja suunatud itta.

---

[10] Loodjoon – Maa raskusjõuvälja ekvipotentsiaalpinna normaal, mis näitab raskusjõu sihti Maa pinna vastavas punktis. Et mass jaotub nii Maa pinnal kui ka sisemuses ebaühtlaselt, ei läbi loodjoon üldiselt Maa keskpunkti. Loodjoone kõrvalekalle maaellipsoidi normaalist määratakse gravimeetriliste mõõtmistega või punkti astronoomiliste ja geodeetiliste koordinaatide erinevuse põhjal.

Seos geodeetiliste ja ristkoordinaatide vahel väljendub järgmiste valemitega:

$$\left.\begin{aligned} X &= (N+H)\cos B\cos L \\ Y &= (N+H)\cos B\sin L \\ Z &= \left[N\left(1-e^2\right)+H\right]\sin B \\ N &= \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2 B}} \end{aligned}\right\}, \qquad (3.1)$$

kus a on ellipsoidi pikem pooltelg; e – ellipsoidi ekstsentrilisus; H – punkti kõrgus ellipsoidi pinna kohal, N – esimese vertikaali raadius.

Merekaarte koostatakse mitmesugustes kaardiprojektsioonides. Kuna sfääri ega sferoidi ei saa projitseerida tasandile moonutusteta, siis on kõik kaardid mingil määral moonutatud. Vastavalt moonutuste laadile jaotatakse kaardiprojektsioonid kolme rühma: konformsed, ekvivalentsed ja konventsionaalsed projektsioonid.

K**onformsete** projektsioonide puhul säilib lõpmata väikeste kujundite sarnasus, st pikkuste mõõtkava antud punktis ei olene suunast ja nurgad kujutuvad moonutusteta (lõplike mõõtmete puhul need tingimused ei kehti).

E**kvivalentsete** projektsioonide korral on nii lõpmata väikeste kui ka lõplike mõõtmetega kujundite pindalade suhe muutumatu.

K**onventsionaalsete** projektsioonide puhul kõik kaardi elemendid kujutatakse teatud moonutustega. Siia alla kuuluvad ka ekvidistantsed projektsioonid, kus pikkuse mõõtkava ühel peasuunal ei moondu.

Teatud kaalutlustel (näiteks moonutuste minimeerimiseks) ei ühti projektsiooni poolus alati geograafilise poolusega. Sellest lähtudes jaotatakse kaardiprojektsioonid järgmiselt:

polaarprojektsioon (normaalprojektsioon) – projektsiooni poolus ühtib geograafilise poolusega;

kaldprojektsioon – projektsiooni poolus asub geograafilise pooluse ja ekvaatori vahel;

põikprojektsioon – projektsiooni poolus asub geograafilisel ekvaatoril.

Normaalvõrk on kõige lihtsam kaardivõrk, mis moodustub antud projektsioonis mingist sfääriliste koordinaatide süsteemist. Selle kuju järgi jaotatakse kaardiprojektsioonid enamasti järgmiselt:

koonilised projektsioonid – Maa projitseeritakse seda puutuvale või lõikavale koonusele;

silindrilised projektsioonid – Maa projitseeritakse seda puutuvale või lõikavale silindrile;

asimuudilised projektsioonid – Maa projitseeritakse seda puutuvale või lõikavale tasandile.

Põhilised navigatsioonilised merekaardid koostatakse **Mercatori püstsilindrilises konformses projektsioonis** ehk Mercatori normaalprojektsioonis. Mercatori normaalprojektsioonile on iseloomulik see, et meridiaanid on paralleelsed sirged, mille vahekaugused on võrdelised vastavate geograafiliste pikkuste vahedega, ja paralleelid on nendega risti. Et sferoidil (sfääril) on teatud meridiaanide vahelise paralleeli kaare pikkus geograafilise laiuse koosinuse funktsioon, st geograafilise laiuse kasvades paralleeli kaare pikkus väheneb, siis konformsuse tagamiseks tuleb paralleelide vahekaugusi vastavalt suurendada. Seega, pooluse suunas liikudes mõõtkava suureneb. Suurte moonutuste tõttu ei kasutata Mercatori normaalprojektsiooni põhja pool 70º...85º p.l.

Mercatori normaalprojektsioonis on **loksodroom**[11] sirgjoon, **ortodroom**[12] aga lähema pooluse poole kumer kõver. Projektsioonis võib kasutada tasandilisi ristkoordinaate *x* ja *y*, kuid sagedamini tarvitatakse meridionaalosi *D* (ekvatoriaalminutites väljendatud kaugus ekvaatorist teatud paralleelini piki meridiaani) ja geograafilisi pikkusi λ.

Kui Maa loetakse sfääriks, siis geograafilise punkti või paralleeli meridionaalosa leitakse seosest

$$D = \rho' \ln \tan\left(45^o + \frac{\phi}{2}\right), \tag{3.2}$$

kus ρ' on radiaani väärtus minutites, ϕ – punkti sfääriline laius.

Projektsiooni kaardivõrgu koostamise täielikum algoritm on toodud p. 9.7.

Kahe punkti vaheline loksodroomi asimuut on

$$\mathrm{A} = \arctan \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)'}{D_2 - D_1}, \tag{3.3}$$

kus $(\lambda_2 - \lambda_1)'$ on vastavate punktide geograafiliste (või sfääriliste) pikkuste vahe **minutites**. Saadud asimuut tuleb taandada õigesse veerandisse.

Mercatori normaalprojektsioonis kehtib kaardi **peamõõtkava** (mõõtkava, mis on kirjutatud kaardile) moonutusteta ainult kaardi peaparalleelil, st paralleelil, millel silinder puutub või lõikab maaellipsoidi (-sfääri). Kõigil teistel kaardi paralleelidel kehtivad veidi erinevad mõõtkavad, mida nimetatakse **erimõõtkavadeks.**

---

11 Loksodroom – joon maaellipsoidil või -sfääril, mis lõikab meridiaane ühe ja sama nurga all. Tegelikkuses kujutab loksodroom endast poolusele lõpmatult lähenevat spiraali. Mercatori projektsioonis on ta sirge.

12 Ortodroom on sirgeim joon maaellipsoidil või -sfääril.

Erimõõtkava nimetaja suvalisel paralleelil

$$c = \nu c_0 , \tag{3.4}$$

kus c_o on kaardi peamõõtkava nimetaja; ν – paralleeli moodul, mis leitakse valemiga

$$\nu = \frac{N\cos\varphi}{N_0\cos\varphi_0} . \tag{3.5}$$

Siin on N ja φ suvalisel paralleelil asuva punkti vastavalt esimese vertikaali raadiuse väärtus ja geograafiline laius, N_0 ja φ_0 aga samad parameetrid peaparalleelil.

Nagu eespool öeldud, ei kasutata Mercatori normaalprojektsiooni laiustel üle (üldjuhul) 70º. Pooluselähedaste alade merekaartidel võivad olla kasutusel näiteks järgmised projektsioonid:

Mercatori põiksilindriline konformne projektsioon, mille puhul silinder lõikab maaellipsoidi (-sfääri) kahel **almukantaraadil**[13], kusjuures projektsiooni telgmeridiaanil on üldjuhul mõõtkava 0,9996;

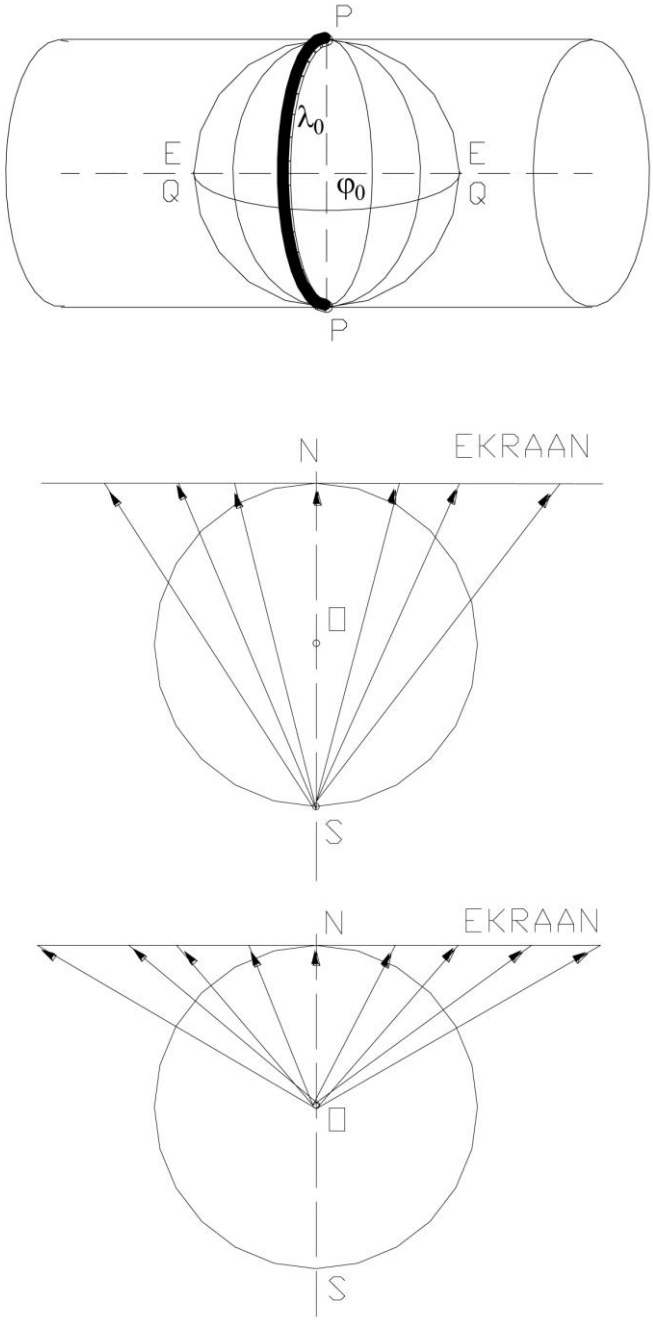
Gaussi–Krügeri põiksilindriline konformne projektsioon, mille puhul silinder puutub maaellipsoidi ühel (telg-) meridiaanil, kus mõõtkava on 1,0000;

gnoomoniline polaarprojektsioon, asimuudiline projektsioon, mille puhul silmapunkt asub maasfääri keskmes ja projektsioon sooritatakse tasandile, mis puutub maasfääri projektsiooni poolusel;

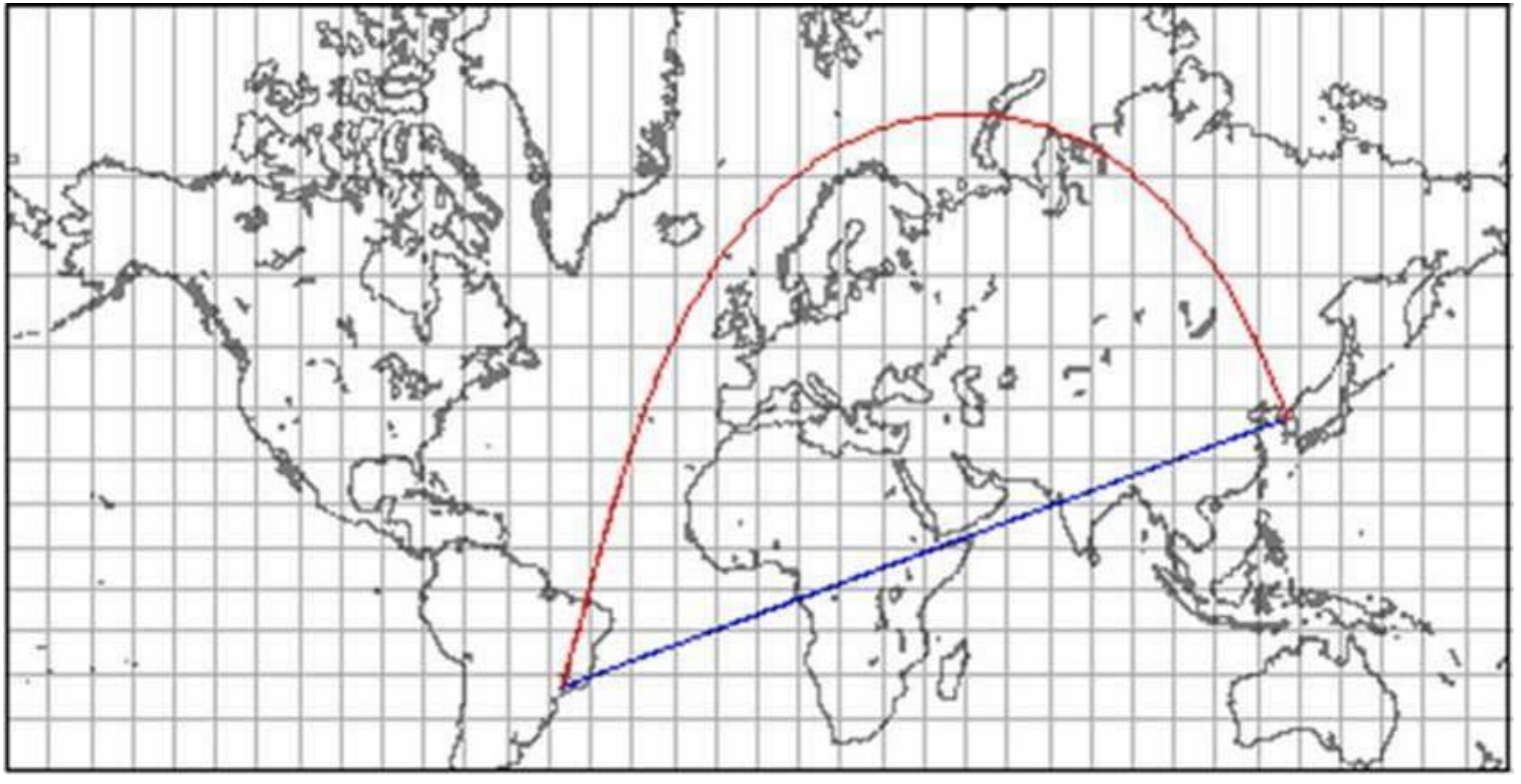
asimuudiline konformne (stereograafiline) projektsioon, kus silmapunkt asub projektsioonipinna ja maasfääri puutepunkti vastaspoolsel projektsiooni poolusel.

Mercatori põikprojektsiooni ja Gaussi–Krügeri projektsiooni kasutatakse enamasti meridiaanide suunas kulgevate 6º laiuste tsoonidena, kusjuures tsooni telgmeridiaan on projektsiooni x-teljeks ja selle lõikepunkt ekvaatoriga on ka y-telje alguspunkt (**USA kaartidel on enamasti vastupidi**).

[13] Almukantaraat – põik- või kaldprojektsiooni pooluseid ühendava joone risttasandi ja maasfääri või -ellipsoidi lõikejoon (paralleeli analoog).



Joonis 3.2. Polaaraladel kasutatavad merekaartide projektsioonid: üleval – Gaussi–Krügeri projektsioon; keskel – stereograafiline polaarprojektsioon; all – gnoomoniline polaarprojektsioon



Joonis 3.3. Meridiaane **Mercatori normaalprojektsioonis** konstantse nurga all lõikav sirge on loksodroom (sinine), geodeetiline joon ehk ortodroom (punane) on kõverdunud sellest lähema pooluse poole

3.3. Plaanilise aluse rannapunktid

Ranna tugipunktide tähistamiseks kasutatakse harilikult lihtsaid rajatisi, mis koosnevad välisest märgist ja selle all olevast keskmemärgist (tsentrist) või ainult välisest märgist (liitsihimärgid, navigatsiooniorientiirid).

Tugipunktipealseteks märkideks on püramiidid, signaalid, kilbid, prismad, postid ja tähislatid.

Ranna tugipunktides võivad asuda näiteks GNSSi (varem ka RNS) tugijaamad.

Püramiid on kõige kasutatavam märgiliik (joon. 3.5). Ehitatakse kolme- ja neljatahulisi püramiide kõrgusega kuni 10 m. Püramiidi alusserva pikkuseks võetakse pehme pinnase korral 0,25...0,30 kõrgust.

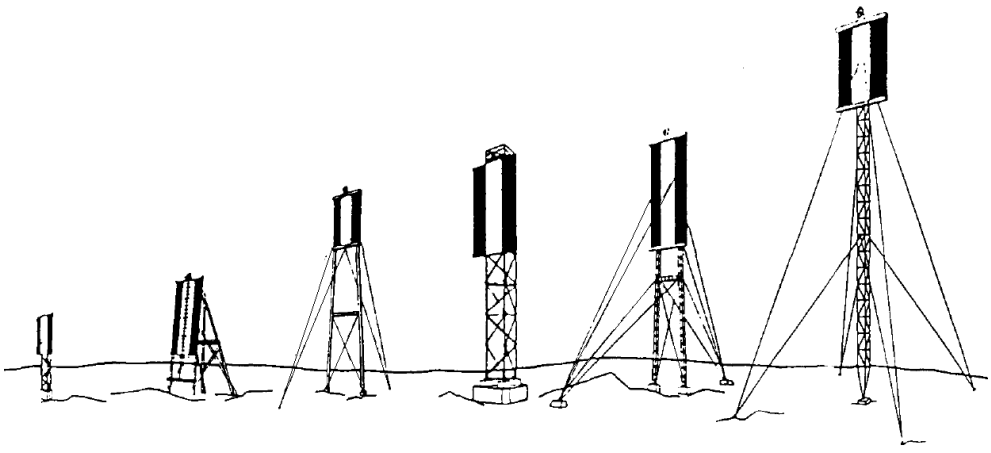
Signaal on rajatis, mis koosneb kahest teineteisest isoleeritud püramiidist: sisemine on mõõteriista (seadme) ja välimine vaatleja jaoks (joon. 3.5).

Kilp on märk, mis koosneb kahe posti vahele ehitatud õhukesest laudsõrestikust. Postid kaevatakse maasse 1...1,5 m sügavusele ja toestatakse kaldtugedega (joon. 3.4). Kasutatakse liitsihimärkidena.

Prisma on märk, mis koosneb kahest kaldkilbist, mille serv suunatakse mere poole.

Post laotakse kaldale kividest või valatakse betoonist ja kaetakse värviga, et see oleks maastiku taustal hästi näha.

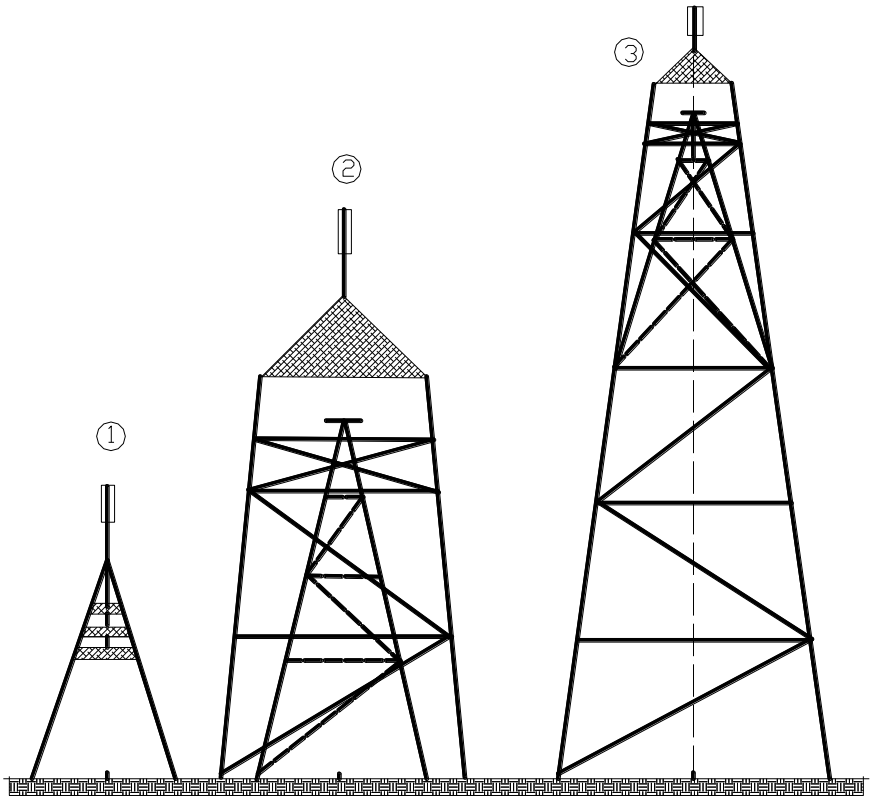
Tähis kujutab endast vertikaalselt maasse asetatud teivast, mille tippu paigutatakse värvitud laudadest või vineerist topograafiline kujund. Teiba võib kinnitada ka puude või ehitiste külge.



Joonis 3.4. Liitsihimärgid – kilbid. [Meriväylätutkimusten yleisohjeet, 1986]

Nii püramiidid kui ka signaalid võivad olla kas kolmnurkse või nelinurkse ristlõikega.

Signaalid olid varem tähtsamate geodeetiliste punktide pealisehituseks, kuid neid võis kasutada ka navigatsiooniorientiirina. Tänapäeval geodeedid signaale enam ei paigalda, kuna GNSSi kasutuselevõtu tõttu pole neid märke enam vaja.



Joonis 3.5. Märkide lõikelised skeemid: *1* – püramiid; *2* – lihtsignaal; *3* – liitsignaal [Kala, Ellmann, Märdla, 2015]

Järskude kaljurandade puhul võib navigatsiooniorientiiri tähistada kividele või kaljule värvitud laikudega. Navigatsiooniorientiiri ei pruugi olla koordineeritud. Kõikidel juhtudel on navigatsiooniorientiirina otstarbekas kasutada hästi nähtavaid rajatisi: torne, tehasekorstnaid, tele- või mobiilimaste, üksikuid maju, suuri puid, kaljusid jne.

Märgi valik sõltub usaldusväärseid vaatlusi tagavatest nähtavustingimustest.

Märkide nähtavus sõltub nende mõõtmetest, värvusest, valgustusest ja taustast. Nähtavuse parandamiseks on kasulik püramiidid ja signaalid vooderdada harvade

horisontaalsete lauaridadega. Märkide värvimiseks valitakse aga selline värvitoon, mis loob ümbritseva tausta suhtes suurima kontrasti.

Tugipunktide rajamisel tuleb valida märkide mõõtmed sellise arvestusega, et need oleksid nähtavad kogu tööde teostamise piirkonnas.

Märgi kõrgus *H* (meetrites) määratakse valemiga

$$H \approx (0{,}25D - \sqrt{h})^2 + 0{,}6D, \qquad (3.6)$$

kus *D* on kaugus märgini, km; *h* – vaatleja silma kõrgus, m.

Märgi laius *B* (meetrites), mille puhul ta on märgatav kauguselt *D*, leitakse avaldisest

$$B \approx 0{,}3\ D. \qquad (3.7)$$

Ranna tugipunkte kasutatakse põhiliselt navigatsiooniorientiiridena, aga ka hüdrograafiliste mõõdistamiste kohamäärangul elektrontahhümeetri või kinemaatilise GPSi tugijaama paigaldamiseks.

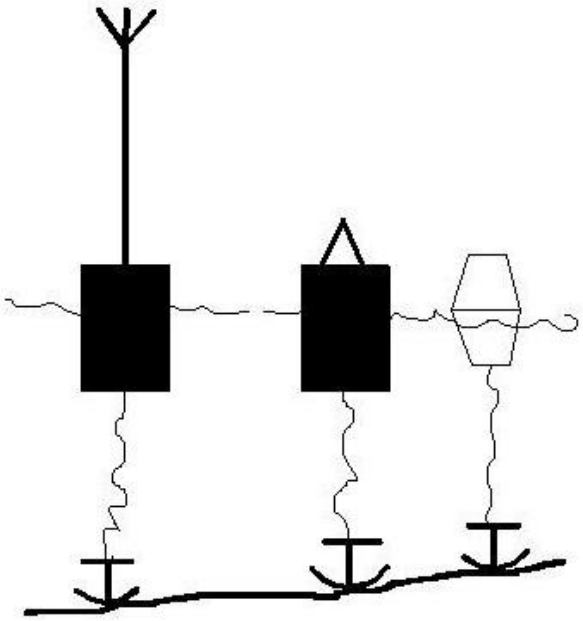
3.4. Plaanilise aluse merepunktid

Geodeetilised merepunktid, nii nagu rannapunktidki, peavad oma koordinaadid pika aja jooksul säilitama ja vajaduse korral edastama need koordinaadid merel asuvatele tarbijatele. Märgi asukoht ei tohi muutuda, sest see on koordinaatide kandja. Märk kujutab endast seadet, mis võimaldab määrata punkti koordinaadid ja edastada need koordinaadid uurimislaevadele või süvaveeaparatuurile. Sõltuvalt sügavusest, otstarbest ja rannajoone kaugusest võivad punktid olla kas veepealsed (joon. 3.6) või veealused. Veepealsete punktide märgid on mõeldud mõõtmiseks kohamäärangul optiliste ja GNSS-vahendite abil või ainult orienteerumiseks. Veealuste punktide märke saab üles leida ja mõõtmisel kasutada ainult hüdroakustilise aparatuuri abil.

Märke hoitakse paigal ankurdusseadmetega, mis võimaldavad märke kindlalt põhja külge kinnitada.

Punktide paigaldamiseks valitakse järgmistele tingimustele vastavad kohad:
- paigaldamisrajoon peab olema seismiliselt rahulik ega tohi asuda maakoore rikete ja tugevate looduslike hoovuste piirkonnas;
- põhja pinnas peab koosnema kividest ja liivast;
- põhja kalle ei tohi ületada 0,2...0,3º.

Veepealsete punktidena kasutatakse eeskätt tuletorne, tulelaevu, poisid, toodreid, aga ka puurtorne, paikseid platvorme, kindlalt ankrus seisvaid ujuvvahendeid.



Joonis 3.6. Ujuvmärgid: vasakult – püsitooder, tulepoi, paak

Veepealsete märkide hulka kuuluvad nii **lateraalsed** märgid, mis näitavad laevatee asetust laeva kursi suhtes, kui ka **kardinaalsed** märgid, mis näitavad ohtliku koha ja märgi omavahelist asendit ilmakaarte suhtes.

Veekogu põhja paigutatud punktide põhiliseks konstruktsioonielemendiks on akustiline märk. See on mõeldud veealuse punkti avastamiseks, hüdrograafialaevade või süvaveeaparatuuri koordinaatide määramisel vajalike mõõtmiste sooritamiseks, vesiehitiste (nafta- ja gaasiammutamisplatvormid jms) rajamiseks ning militaarotstarbeks. Veealused märgid võivad olla kas aktiivsed või passiivsed.

Passiivse punkti märk kujutab endast pinda, mis suudab maksimaalselt peegeldada laeva aparatuuri akustilisi signaale. Need võivad olla sfäärilised, silindrilised, täis- või kolmnurksed kõvast materjalist pinnad. Peegelduva signaali intensiivsus sõltub lähetatava impulsi intensiivsusest, peegeldava pinna kaugusest, suurusest, kujust ja materjalist. Passiivset märki on võimalik üles leida, kui signaalide peegeldumine tema pinnalt erineb oluliselt peegeldumisest merepõhjalt. Passiivsetel punktidel on väike tegevuskaugus ja seetõttu kasutatakse neid piiratult vaid väikese sügavusega šelfialadel.

Aktiivsetes punktides kasutatakse märgina hüdroakustilisi seadmeid, mis suudavad väljastada sellise võimsusega akustilisi signaale, et neid saab laeval vastu võtta. Tööprintsiibilt jagunevad akustilised punktid **vastajamajakateks** (VM) ja **programm-majakateks** (PM).

Kui tegemist on vastasmajakaga, väljastab laev hüdroakustilise impulsi. Kohe pärast selle impulsi vastuvõttu annab põhjamajakas vastussignaali. Seega võimaldavad VM-d mõõta märgi kaugust päringusignaali väljasaatmishetke ja vastussignaali saabumishetke eraldava ajavahemiku kaudu.

Programm-majakas väljastab akustilisi signaale etteantud programmi järgi ning võimaldab määrata vahemaid signaali vastuvõtuhetkede fikseerimise teel laeva ühtse ajaarvestussüsteemi alusel. Kummagi majakatüübi puhul leitakse punkti suund majakast lähtuvate signaalide peilimisega laeval paiknevate hüdrolokatsiooniantennide abil või hüdroakustilistes süsteemides mõõdetud kauguste interpreteerimisel.

Et alusplaan oleks usaldusväärne, tuleb punktidest koostada süsteem.

Militaarotstarbeks on levinud kolmest märgist koosnevad geodeetilised merepunktid (triaadid), kusjuures märgid asetsevad võimalikult võrdkülgse kolmnurga tippudes. Arvestades hüdroakustiliste lainete levimistingimusi ja püüdes kindlustada võimalikult suurt tööpiirkonda, tuleks märkide vahemaaks võtta 0,3...0,5 tegevuskaugust. Meremajanduse ehitiste rajamisel kasutatakse enamasti rohkemate märkidega süsteeme.

Kasutamisaja järgi võivad geodeetilised merepunktid olla ajutised või alalised.

Ajutised merepunktid paigutatakse ainult tööde teostamise ajaks. Kui hüdrograafilised tööd on lõppenud, võetakse veealused märgid välja ja paigaldatakse uutesse punktidesse.

Alalised merepunktid on mõeldud pikaajaliseks kasutamiseks ja kuuluvad geodeetilise põhivõrgu koosseisu. Sellise punkti märgid peavad olema varustatud toitealliikatega, mis võimaldavad hüdroakustilisel aparatuuril töötada kümneid aastaid.

4. HÜDROGRAAFILISTE TÖÖDE KÕRGUSELINE ALUS. MÕÕDETUD SÜGAVUSTE TAANDAMINE NULLSÜGAVUSELE

4.1. Kõrguseline alus

Merepõhja reljeefi mõõdistamisel on vaja leida selle pinnapunktide plaaniline ja kõrguseline asend. Mingi punkti kõrgust, arvutatuna aluseks võetud nullnivoost piki referentsellipsoidi normaali, nimetatakse selle punkti absoluutseks kõrguseks. Eestis on seni loetud nullnivooks **Kroonlinna veemõõdulati nulli taset** ning sellele vastavat kõrguste süsteemi nimetatakse **Baltimaade normaalkõrguste süsteemiks** (BK- või BKN-77). Kroonlinna veemõõdulati null on tase, mis vastab ajavahemikul 1825...1840 määratud keskmisele veetasemele ja on (väikeste kõikumistega) tegelik keskmine veetase käesoleva ajani. Eesti navigatsioonikaartidel on üleminek **Amsterdami nullile** lõpetatud**,** kusjuures uue süsteemi reeperite kõrgused on loodest kagusse ligikaudu 16...24 cm suuremad [Rüdja, Sander, 2013].

Merepõhja reljeefi mõõdistamisel saadakse sügavused vertikaalkaugustena veepinnast põhjani. Teatavasti on aga maailmamere ja tema osade vaba pind pidevas liikumises, mida põhjustavad kosmoses, atmosfääris, hüdrosfääris ja Maa tahkes kestas toimuvad sidusprotsessid. Nendest tingitud veetaseme kõikumine raskendab oluliselt sügavuste mõõtmist.

Veetaseme kõikumine jaotatakse põliseks, perioodiliseks, mitteperioodiliseks ja kiiresti kulgevaks. Põline kõikumine ilmneb aeglases ja kestvas ookeanipinna tõusus või languses, mille põhjustab veehulga muutumine maailmameres või tema põhjareljeefi muutumine endogeensete tegurite mõjul. Näiteks viimase 40 aasta jooksul on ookeanipind tõusnud kiirusega 3 mm aastas, mis on tingitud peasjalikult Antarktika jääkilbi sulamisest.

Perioodiliste kõikumiste põhjuseks on teiste taevakehade (põhiliselt Kuu ja Päikese) mõju. See, nn loodeline kõikumine on omane kõikidele akvatooriumidele, kuid loodete suurus (tõusu ja mõõna kõrguste vahe) on eri paigus erinev.

Avaookeanil on loodete suurus keskmiselt kuni 1 m, ranna lähedal aga ulatub see mõnest sentimeetrist (väiksel akvatooriumil) kuni viieteistkümne meetrini. Loodete suuruse järgi jaotatakse kõik mered kahte tüüpi: loodetega ja loodeteta mered. Teoreetiliselt loodetega mereks nimetatakse sellist merd, kus loodete suurus ületab 10 cm. Merd, kus loodete suurus jääb alla 10 cm, nimetatakse loodeteta mereks.

Mitteperioodilisi veepinna kõikumisi kutsuvad esile hüdrometeoroloogilised faktorid, nagu tuul, hoovused, õhurõhumuutused, sademed, vee auramine ja tema tiheduse muutus jms. Osa faktoreid on küll sesoonsed, kuid üldiselt kindla perioodita.

Suurem tähtsus on tsüklonitest või kindlasuunalistest tuultest tingitud veetaseme kõikumisel. Passaat- ja mussoontuulte tõttu esineb kuni ühemeetrist võrdlemisi kindla aastase käiguga veetaseme kõikumist.

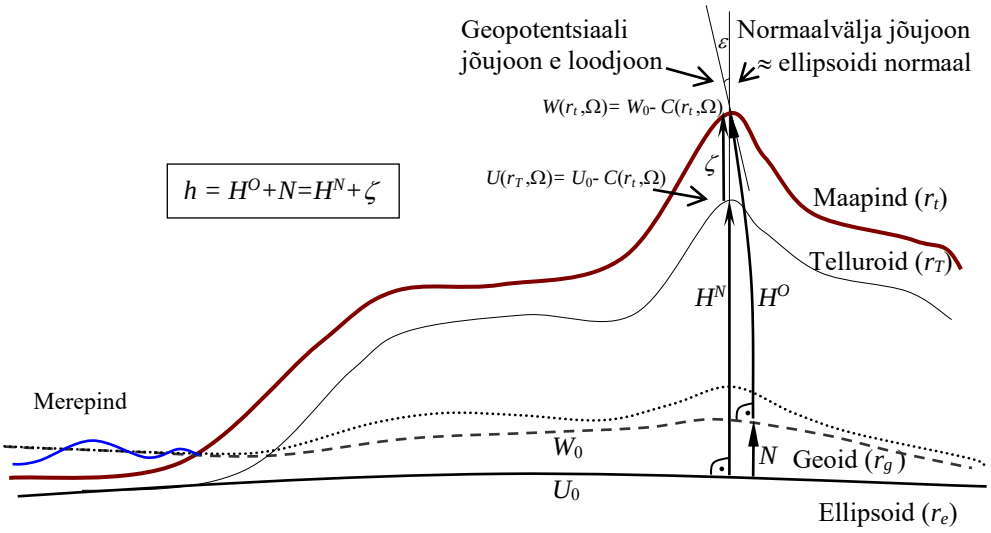
Poollsuletud meredes ja lahtedes tekitavad muutuv tuul ja õhurõhk seisulaineid (seiše), mille periood sõltub mere pikkusest ja sügavusest. Süsteemi Läänemeri-Soome laht seisulainete periood on ligikaudu 27 tundi, Liivi lahes 5...6 tundi.

Kiire veetaseme kõikumine esineb tuule ja säbarlainetuse korral, kusjuures kõikumise ulatus võib olla küllaltki suur ja kaootiline.

Kõigi ülalmainitud põhjuste tõttu kõigub merepind pidevalt ning just sellises olukorras tuleb mõõdistada merepõhja reljeefi. Selleks et eri aegadel mõõdetud sügavused oleksid omavahel võrraldavad, on vaja võrdlushorisondiks ehk taustpinnaks valida mingi püsiv tasemepind.

Meretasemeks nimetatakse tuule ja säbarlainete mõjust vaba kõrgust teatud nulltaseme suhtes, mis on võetud nullsügavuseks. Merepind on risti raskusjõu suunaga, olles seega **nivoopind.** Maailmamere teatud keskmist nivoopinda võib lugeda ligikaudu geoidi pinnaks. Et raskusjõu potentsiaal geoidi pinnal on konstantne, siis on geoidi pind ekvipotentsiaalpind.

Punkti kõrgust geoidi pinna suhtes, mida loetakse piki seda punkti läbivat raskusjõu jõujoont, nimetatakse **ortomeetriliseks kõrguseks H^O**. Ortomeetrilisi kõrgusi saab määrata ainult juhul, kui on teada massijaotus Maa sees. Seepärast kasutatakse sageli (tänapäeval ka Eestis) **normaalkõrgusi H^N** ortomeetriliste kõrguste asemel.



Joonis 4.1. Ortomeetrilised (H^O), normaal- (H^N) ja geodeetilised kõrgused (H); ζ – kõrgusanomaalia; N – geoidi kõrgus (geoidi undulatsioon). (Ellmann, Oja, 2008)
Telluroid – mõtteline pind, mis tekib, kui ellipsoidi pinnast kanda ülespoole maapinna absoluutkõrgus H

Normaalkõrgusi arvutatakse teatud abipinnast – **kvaasigeoidist.**

Erinevalt ortomeetrilisest kõrgusest määratakse normaalkõrgus teoreetiliselt rangelt, sest see on geograafilise laiuse φ ja kõrgusanomaalia ζ funktsioon, need mõlemad on aga korrektselt määratavad suurused. Kõrgust ellipsoidist nimetatakse **geodeetiliseks kõrguseks** ja antud ellipsoidi puhul on sellel igas Maa punktis oma muutumatu väärtus. Tänapäeval levinud satelliitgeodeesia meetod annab kõigepealt GNSS-vastuvõtja laevaantenni geodeetilised kõrgused ja kui vastuvõtja mälus või andmepilves on piirkonna (kvaasi)geoidi mudel, saab automaatselt normaalkõrguse ning teades GNSS-antenni ja kajaloodi antenni vertikaalkaugust, saab viimase normaalkõrguse. Tasemepinnad ja kõrgused vt joonis 4.1.

Kvaasigeoid on astronoomilis-geodeetiliste, GPSi ja gravimeetriliste mõõtmistega määratud teatud geoidi lähend, mis ühtib geoidiga ookeanide ja merede kohal, (seega hüdrograafia seisukohalt on nende erinevus tähtsusetu), ja erineb sellest mandritasandil kuni 2...4 cm, mägedes aga kuni 2 m.

Mõõdetud sügavuste taandamine loodpinnale on teostatav siis, kui

- on määratud nullsügavus;
- tööde käigus määratakse perioodiliselt hetketaset;
- mõõdetud sügavusele on leitud hetketaseme ja nullsügavuse vahest tingitud parandid või RTK GNSSi abil määratakse pidevalt kajaloodi antenni kõrgus loodpinnast.

4.2. Nullsügavused

Nullsügavusele vastava loodpinna ratsionaalse valiku nõuded on seoses laevanduse ja hüdrograafia arenguga aja jooksul muutunud. Tänapäeval võib need nõuded sõnastada järgmiselt:

- nullsügavuse määratlus peab olema täpne ega tohi põhjustada väära ettekujutust tema olemusest ja karakteristikutest;
- nullsügavusele vastav pind tuleb valida kõikide merede jaoks ühesuguste kriteeriumide järgi;
- kehtestatud nullsügavus peab tagama laevasõidu ohutuse. Merepinna alanemine allapoole nullsügavust ei tohi olla märkimisväärne;
- nullsügavus peab võimaldama laevaliiklust väikese sügavusega piirkondades, st selle absoluutkõrguse ülemäärane (nii-ütelda igaks juhuks) vähendamine ei tohi põhjendamatult piirata navigatsiooni madalamates meredes (st ei näitaks ülemäära tihti liiga väikseid sügavusi);
- kaardid ja teised kartograafilised materjalid, kus kasutatakse kehtestatud nullsügavust, peavad olema kõlblikud praktiliste ülesannete lahendamiseks nii rannas kui ka merel;
- kaardid, kartograafiline ja kirjeldav andmestik, loodete tabelid ja muud sügavusi sisaldavad materjalid tuleb koostada antud piirkonnale ühtse kindlaksmääratud nullsügavuse alusel;

- akvatooriumi igas punktis mõõdetud sügavust peab igal hetkel lihtsate võtetega olema võimalik taandada nullsügavusele;
- nullsügavuse määramise viisid peavad olema lihtsad ja sealjuures tagama vastava kõrgusmärgi määramise suure täpsusega;
- merepõhja reljeefi vormid ei tohi pärast mõõdistustulemuste nullsügavusele taandamist moonduda;
- kaardid, mis on koostatud erineva absoluutkõrgusega nullsügavusi kasutades, peavad olema kergesti taandatavad ühtsele nullsügavusele.

Paljuaastane keskmine veetase rahuldab küll enamikku loetletud nõuetest, kuid ei kindlusta siiski meresõiduohutust, seetõttu ei saa seda nullsügavusena kasutada kõigil akvatooriumidel. Kuna tervikuna on nulltasemele esitatavad nõuded mitmeplaanilised ja mõnes mõttes isegi vasturääkivad, jätkub ka optimaalse lahenduse otsimine.

Eestis (territoriaalveed on praktiliselt loodeteta mered) valmistatud territoriaalsetel merekaartidel oli siiani nullsügavuseks **keskmine tase** (MSL – *Mean Sea Level*), mis oli saadud Kroonlinna paljuaastase keskmise veetaseme (1825–1840) (MWL – *Mean Water Level*) sobitamisel loodpinnaga ja mille nimi on BK-77 (Balti Normaalkõrguste Süsteem). Kuid kuna käesoleval ajal on Lääne-Euroopa ja Põhjamaade kõrgusvõrkude nullpinnaks Amsterdami normaalnull, mille järgi Kroonlinna nulli kõrgus oleks 0,195 m (Torim, 2013), siis on ka meil sellele üle mindud ja sügavused navigatsioonikaartidel vähenevad keskmiselt 0,20 m. Eeskätt tuule, aurumise jms tõttu võivad näiteks Väinamere veeteed muutuda liiga madalaks.

Loodetega meredes kasutatakse Venemaa ja Inglismaa merekaartidel nullsügavuseks Kuu ja Päikese tekitatud loodetest põhjustatud võimalikku madalaimat taset, mida nimetatakse **madalaimaks teoreetiliseks tasemeks** ehk **madalaimaks astronoomiliseks tasemeks (LAT).** Süsteemi eeliseks on see, et merekaarte võib kasutada ka loodetetabelite puudumisel ja tabelite kasutamine on nende tasemete puhul lihtsam, sest sügavuse parandid on alati positiivsed. LAT on võetud rahvusvaheliseks kasutamiseks ka IHO poolt.

Saksamaal, Taanis, Itaalias ja mitmes teises riigis oli võetud loodetega merede nullsügavuseks **süsüügialoodete**[14] **madalvee keskmine tase**; Prantsusmaal, Hispaanias ja Portugalis **süsüügialoodete madalvee madalaim tase**; USA-s, Rootsis, Hollandis aga **kõikide madalvete keskmine tase**. Järelikult oli ka neis maades loodetega merede nullsügavuseks veetase, mis on lähedane teoreetilisele.

Samas on selge, et nimetatud nullsügavused ei rahuldanud mitmeid varem loetletud nõudeid: puudus ühtsus loodetega ja loodeteta merede osas; ei olnud tagatud ühesugune meresõiduohutus nendel meredel; ei arvestatud suuruselt erinevaid mitteperioodilisi tasemekõikumisi; veetaseme arvutused loodetega meredel olid keerulised; kohati ei olnud võimalik kasutada loodetetabeleid sügavuste täpsustamiseks antud hetkel; kaartide koostamisel olid võimalikud põhjareljeefi moonutused.

[14] Süsüügialooded esinevad, kui Päike, Kuu ja Maa asuvad ühel sirgel, mispuhul looded on suurimad.

Seepärast rakendatakse täiendavaid nullsügavuse parandeid ja teisi abinõusid meresõiduohutuse kindlustamiseks. Et madalaima teoreetilise veetaseme arvutamisel ei arvestata meteoroloogilistest põhjustest tingitud lühiajalisi veetaseme kõikumisi ja vee juurdevoolu mõju jõgede suudmealadel, siis on mõnes madalaveelises sadamas võetud kasutusele nn sadama nullsügavus. See sügavus määratakse nii, et oleks kindlustatud ohutu meresõit ning tagatud sadama normaalne majandamine. Sadamate nullsügavuste kasutamisel lisatakse merekaartidele vastavad märkused ning lootsiraamatutes antakse täiendavat informatsiooni kasutatava nullsügavuse ja võimalike, meteoroloogilistest tingimustest tulenevate veepinna keskmiste ning maksimaalsete kõikumiste kohta.

Erinevate merede ja ookeanide nullsügavus on küllaltki erinev. Näiteks USA rannikul on Vaikne ookean Atlandi ookeanist 50 cm kõrgem. Kroonlinna null on Vladivostoki nullist 180 cm kõrgem, 24 cm madalam Arhangelski nullist, aga kümneid sentimeetreid kõrgem Musta mere nullist. [Истошин, 1969]. Atlandi ookeani kesktase USA rannikul on 0,5 m madalam Amsterdami nullist ja Vahemere kesktase on 0,4...0,5 m madalam Amsterdami nullist [Torge, Müller, 2012].

Ühes ja samas mereski ei ühti keskmine merepind täpselt geoidiga, vaid on selle lähedane. Meretase oleneb ka soolsusest, mistõttu isegi Läänemeres, kus näiteks alates Taani väinadest kuni Kroonlinnani soolsus suuresti muutub, on olnud piirnevate riikide nulltase kuni paarkümmend sentimeetrit erinev.

4.3. Merepinna kõikumise vaatlused. Keskmise veetaseme määramine tasemevaatluspostides

Veetaseme kõikumise kohta meres võib saada usaldusväärset ja täielikku teavet vaid vahetute vaatluste põhjal. Merepinna vaatlusi tehakse vaatluspostide võrgu abil. Veetaseme registreerimisseadmetega varustatud vaatluskohta nimetatakse **tasemevaatluspostiks (TVP**). Asukoha järgi võivad need olla ranna- ja saarevaatluspostid ning kinnisjääl ja merel paiknevad vaatluspostid. Lähtudes kasutamise eesmärkidest, jaotatakse tasemevaatluspostid alalisteks, täiendavateks ja ajutisteks.

Alalised tasemevaatluspostid (*Control tide stations*) on püsirajatised, mis on ette nähtud pikaajalisteks ja pidevateks veetaseme vaatlusteks. Alalisteks veetaseme vaatluspostideks on enamasti statsionaarsed hüdrometeoroloogiajaamad. Alaliseks tasemevaatluspostiks saab nimetada rajatist siis, kui seal on vaatlusi tehtud vähemalt 19 aastat.

Täiendavad tasemevaatluspostid (*Secondary water level stations*) rajatakse neis piirkondades, kus veetaseme kõikumise väga muutliku iseloomu tõttu ei saa lähemates alalistes tasemevaatluspostides tehtud vaatluste tulemustega arvestada. Ka nendes postides määratakse keskmine merepinna tase ja nullsügavus vahetute mõõtmiste teel, kuid nende täpsus on väiksem kui alalistes tasemevaatluspostides ja mõõtmisi peab olema tehtud üle aasta.

Ajutisi tasemevaatlusposte (*Tertiary water level stations*) kasutatakse mõõdetud sügavuste taandamiseks määratud nullsügavusele kaugemates mõõtmispiirkondades. Need rajatakse tavaliselt vaid mõõdistamise ajaks, kusjuures mõõtmisi peab olema sooritatud vähemalt kuu jooksul [*IHO Manual,* 2011].

Veetaset tuleb mõõta tasemevaatluspostis kogu vaatluse aja tema nullpunkti suhtes, mis peab asuma allpool antud piirkonna minimaalset veeseisu ja olema usaldusväärselt seotud rannareeperitega.

Hüdrometeoroloogiateenistuste tasemevaatluspostides registreeritakse veetase nn merevaatluspostide ühtse nulli suhtes (joon. 4.2). Negatiivsete lugemite vältimiseks oli Eesti tasemevaatluspostide null omal ajal asetatud üldjuhul kõrgusele –5,00 m Kroonlinna nulli suhtes. Kõikidesse tasemevaatluspostidesse paigaldatakse kaks reeperit: põhireeper ja tööreeper.

Põhireeper on mõeldud nullsügavuse pikaajaliseks kinnistamiseks antud paigas ja tasemevaatluspostide seadmestiku kõrguse kontrolliks. Sellisteks reeperiteks võivad olla tasemevaatlusposti piirkonnas asuvad riikliku nivelleerimisvõrgu märgid ja reeperid, enamasti on selleks fundamentaalreeper.

Tähtsamate veemõõdujaamade, mareograafide ja tasemevaatluspostide (veemõõdupostide) põhireeperite side riikliku tugivõrgu reeperitega luuakse üldjuhul kahekordse I klassi käiguga. Nendeks on Narva-Jõesuu, Pärnu ja Ristna mareograafid, Kunda, Paldiski, Rohuküla ja Virtsu veemõõdujaamad ning Toila, Loksa, Dirhami, Heltermaa ja Mustvee tasemevaatluspostid. [Maa-amet, 2006]

Tööreeper on mõeldud tasemevaatlusposti seadmestiku kõrguse ja vaatlusposti nulli perioodiliseks kontrollimiseks. Seetõttu paigaldatakse tööreeper vaatlusposti seadmestiku lähedusse ning see peab püsima seal muutumatuna vähemalt 2–3 aasta jooksul.

Side töö- ja põhireeperi vahel luuakse tööde algul ja lõpetamisel kahekordse III klassi nivelleerimise käiguga. Vaatlusposti seadmete ja nulli sidumine tööreeperiga tehakse samuti III klassi nivelleerimise käiguga vaatlusposti rajamisel ja pärast vaatluste lõpetamist, aga ka vaatluste käigus pärast tormi või jääminekut, samuti neil juhtudel, kui vaatlusposti elementide püsivuse suhtes tekib kahtlusi.

Riikliku nivelleerimisvõrgu reeperid ning alaliste, täiendavate ja ajutiste tasemevaatluspunktide reeperid, mille põhjal on määratud nullsügavus, moodustavad hüdrograafiliste uuringute kõrguselise aluse.

Tasemevaatlusposti asukohale esitatavad põhinõuded on järgmised:

- vaatlusposti null ei tohi madala veetaseme korral jääda kuivale;
- vaatlusposti rajamiskohal peab olema vaba ühendus merega;
- vaatluspost peab võimaluse korral olema kaitstud lainetuse eest;
- lugemeid peab saama teha vahetult rannalt (sillalt, kailt);
- talvel ja varakevadel peab vaatluspost olema kaitstud liikuva jää eest.

Vaatlusposte ei tohiks paigaldada abajasoppidesse ja jõgede suudmetesse juhul, kui need on mõeldud merel mõõdetud sügavuste taandamiseks. Alalised vaatluspostid peavad olema asustatud punktide läheduses püsirajatistena.

Tasemevaatluspostide mõõtevahendid peavad tagama mõõtmistäpsuse ± 1...2 cm.

Põhiline ja lihtsaim vahend veetaseme mõõtmisel on sentimeeterjaotusega mõõtelatt. Alalistesse tasemevaatluspostidesse paigaldatakse veetaseme automaatregistraatorid – mareograafid, kuid see ei välista lati kasutamist mõõtmise kontrolliks.

Osa tasemeregistraatoreid kannavad mõõtmistulemused laevadele üle raadio teel või hüdroakustiliste kanalite kaudu. Ka nende kasutamine ei välista vahetuid kontrollmõõtmisi lattide abil.

Tänapäeval on kasutusel alljärgnevad mareograafid [Intergovernmental Oceanographic..., 2006].

- Ujuk-mareograaf ujukiga rahustamiskaevus. Täpsus on üldjuhul 1 cm, kuid kaev ja ujuk võivad mudastuda ja kattuda vesikasvudega. Tänapäeval leiab see kasutamist moodsamate süsteemide varusüsteemina.
- Mullirõhu-mareograafi puhul väljastatakse konstantse intensiivsusega suruõhku, mis läbib reduktori, kus õhurõhku alandatakse, nii et tekkiks peaaegu tasakaal suruõhu rõhu ja veesamba rõhu vahel, mis on vajalik pinnalduvate õhumullide tekkeks. Täpsus on üldjuhul 1 cm, kuid suurte lainetega võib see väheneda.
- Radar-mareograaf mõõdab kas elektromagnetilise impulsi kulgemisaega veepinnani või faasimuutust kiiratud ja vastuvõetud kandevlaine vahel. Pideval režiimil tarbib see palju energiat, täpsus 1 cm (joonis 4.2).

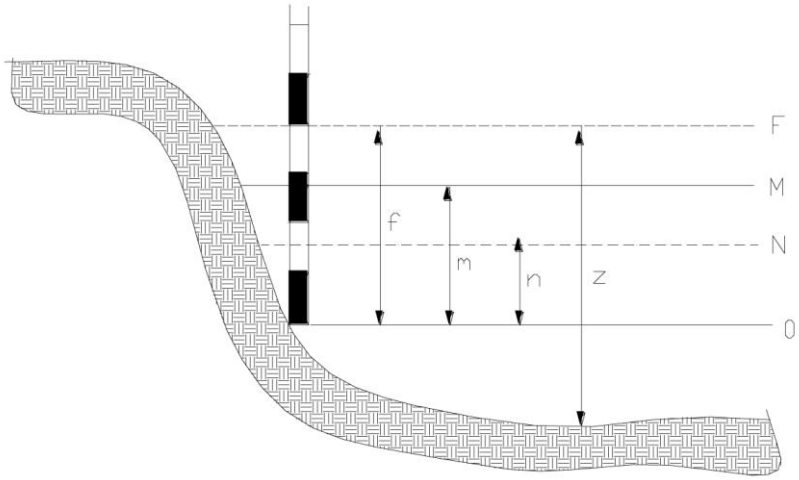
Joonis 4.2. Radar-mareograaf sadamasillal [Intergovernmental Oceanographic Comission UNESCO, 2006]

- Rõhumõõtmisel põhinev mareograaf kasutab vee all asuvat absoluutse rõhu sensorit, mis esmalt mõõdab koos nii vee- kui õhurõhku. Põhiline probleem on anduri nullpunkti muutus ajas (triiv). Seetõttu tuleb seda perioodiliselt kontrollida veemõõdulati abil. Täpsus siiski 1 cm.
- Akustilise mareograafi veealune variant kasutab kajaloodiga analoogilist sensorit. Sensor peab asuma vähemalt 2…3 m allpool võimalikku merepinda. Täpsus 1 cm. Veepealse variandi puhul asub sensor ülalpool veepinda. Variandi täpsus on madalam, viga on üle 1 cm.

Rannal asuvates täiendavates ja ajutistes tasemevaatluspostides tehakse veetaseme vaatlusi Greenwichi kohaliku keskmise päikeseaja järgi (maailmaaeg):

a) loodeteta meredel kell 0.00, 6.00, 12.00 ja 18.00, aga aju- ja paguvete ajal, kui tasememuutus ühe tunni jooksul ületab 0,2 m – iga tunni tagant;
b) loodetega meredel tavaliselt iga tunni tagant, kuid kõrg- ja madalvee ajal (± 30 min) iga 10 minuti tagant.

Joonisel 4.3 on kujutatud valemites sagedamini kasutatavad tasemete tähistused.



Joonis 4.3. *M* – paljuaastane keskmine veetase; *F* – hetketase; *N* – madalaim teoreetiline tase; 0 – vaatlusposti null; *m* – paljuaastase keskmise taseme lugem; *f* – hetketaseme lugem; *n* – madalaima teoreetilise taseme lugem; *z* – mõõdetud sügavus

Meredel, kus looded puuduvad, võetakse sügavuse määramisel aluseks paljuaastane keskmine veetase. Määramisperioodist olenevalt eristatakse ööpäevast keskmist, kuukeskmist, aastakeskmist ja paljuaastast keskmist veetaset ja nn keskmist navigatsiooniaegset veetaset, mis saadakse, kui aluseks võetakse jäävaba periood.

Ööpäevaste keskmiste tasemete arvutamisega elimineeritakse kõik komponendid, mille periood on väiksem kui ööpäev, sealhulgas pooleööpäevased ja ööpäevased

looded. Kuukeskmise veetaseme arvutamisega elimineeritakse poolekuised ja kuised kõikumised, aastakeskmise veetaseme puhul aga sesoonsed kõikumised. **Keskmine tase arvutatakse millimeetrilise täpsusega**.

Veetaseme aritmeetilise keskmise lugem saadakse valemiga

$$m_{ak} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{0} f_i \ , \qquad (4.1)$$

kus *f* on hetketaseme lugemid; *n* – arvutusteks võetud lugemite hulk.

Keskmise taseme arvutamiseks vajalikud lugemid saadakse alalistes ja täiendavates tasemevaatluspostides pikaajaliste pidevate vaatluste tulemusel. Järelikult määratakse ööpäevane keskmine lugem $m_{öp}$ kindlatel vaatlusaegadel tehtud *n* mõõtmistulemuse keskmisena:

$$m_{öp} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{0} f_i \ . \qquad (4.2)$$

Ööpäevast keskmist ei tuleks arvutada nendel ööpäevadel, kus vaatlusi on alla kahe või kaks järjestikust vaatlust puuduvad.

Ööpäevaste keskmiste lugemite alusel arvutatakse kuukeskmine lugem

$$m_k = \frac{1}{k}\sum_{öp=1}^{k} m_{öp} \ , \qquad (4.3)$$

kus *k* on arvutuslik ööpäevade arv kuus. Kuukeskmist ei tuleks arvutada kuudel, kus vaatlusi on tehtud alla 19 ööpäeva või vaatlusi on puudu üle 7 järjestikuse ööpäeva.

Analoogiliselt saadakse aastakeskmine lugem,

$$m_a = \frac{1}{k}\sum_{k=1}^{k} m_k \ , \qquad (4.4)$$

kus *k* – arvestuslike kuude arv aastas.

Aastakeskmist lugemit ei tuleks arvutada aastatel, kus puuduvad üle 5 kuukeskmise või üle kolme järjestikuse kuukeskmise veetaseme vaatlused.

Paljuaastane keskmine lugem arvutatakse valemiga

$$\overline{m} = \frac{1}{n}\sum_{a=1}^{n} m_a \ , \qquad (4.5)$$

kus *n* on arvestuslike aastate hulk.

Keskmiste lugemite ja vastavate tasemete täpsus sõltub mõõtmishälvetest tasemevaatluspostides, tasememuutuste määrast ja väljavõtu suurusest.

Süstemaatilised hälbed tekivad ebatäpsustest vaatlusposti nulli määramisel ja need ilmnevad võrdlemisel lähima riikliku nivelleerimisvõrgu reeperiga. Teiseks süstemaatiliste hälvete allikaks on maakoore vertikaalliikumine. Alalistes tasemevaatluspostides määratakse maakoore vertikaalliikumise kiirus ja ulatus kindlaks paljuaastaste keskmiste vaatluste põhjal ning vajaduse korral tehakse vastavad parandid.

Juhuslikke hälbeid põhjustavad mõõtmiste ebatäpsus ja lugemite diskreetsus (riistavead ja metoodilised vead).

Riistavead tuuakse ära mõõteriista passis või tehakse kindlaks etalonmõõtmiste tulemustega võrdlemisel. Lihtsate mõõteriistade kasutamisel tehakse veetaseme lugem ümardatult 1 cm täpsusega ning vastav aeg fikseeritakse üheminutilise täpsusega. Mõõtmisvigade vältimiseks lainetuse korral võetakse lugemeid mitu korda (laineharja ja -nõo möödudes) ning rakendatakse spetsiaalseid lainetust vähendavaid võtteid.

Mõõtmiste diskreetsusest tingitud juhuslikud hälbed kajastuvad vahetult ööpäevase keskmise taseme arvulises väärtuses. Ööpäevast keskmist veetaset, mis on arvutatud 24 igatunnise lugemi järgi, nimetatakse **tegelikuks tasemeks** ja selle viga ei ületa 99,7% tõenäosusega 2 cm.

Nelja mõõtmise tulemusena saadud ööpäevase keskmise veetaseme vead loodeteta meredes ei ületa 95% tõenäosusega samuti 2 cm. Meredes, kus loodete suurus on üle ühe meetri, ulatuvad vead 3...17 sentimeetrini.

Veetaseme keskmise ruuthälbe põhimõtteline valem

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{\sum(f_i - \bar{f})^2}{n-1}}\ , \qquad (4.6)$$

kus f on hetketasemed; $\bar{f}$ – vaatluste keskmine hetketase.

Keskmise taseme (normaaltaseme) täpsust iseloomustatakse usalduspiiriga $\pm\ \varepsilon$, kusjuures

$$|\varepsilon| = t_S \frac{\sigma_f}{\sqrt{n}}. \qquad (4.7)$$

Siin t_S tähistab Studenti kriteeriumi, mis on valitud etteantud usaldatavuse ja vaatlusrea liikmete arvu järgi (saab EXCELi vanematest versioonidest käskudega INSERT+FUNCTION+STATISTICAL+TINV ja uuematest käskudega FORMULAS+MORE FUNCTIONS+STATISTICAL+T.INV.2T argumentidega 1-β ja $r = n - 1$, kus β on usaldatavuse tõenäosus).

Alalistes tasemevaatluspostides pideva vaatlusrea andmete põhjal arvutatud paljuaastast (vähemalt 10 aastat) keskmist taset, mille viga ei ületa lugemite piirviga (1 cm) ja mis vaatlusperioodi pikenedes ei muutu rohkem kui 1 cm, nimetatakse **püsi**- ehk **normaaltasemeks**. Normaaltaseme arvutamisel nõutakse, et aastakeskmise veetaseme algreast oleksid elimineeritud tektoonilistest protsessidest tingitud vaatluspostide nihked. See saavutatakse kogu perioodi mõõtmiste taandamisega püsinullile.

Täiendavad tasemevaatluspostid paigaldatakse suhteliselt lühikeseks perioodiks sellistesse piirkondadesse, kus alalised tasemevaatluspostid puuduvad. Nõuded nullsügavuse määramise täpsusele on täiendavates vaatluspostides mõnevõrra leebemad – keskmise taseme määramise viga võib olla 10–20 cm. Vaatlused on näidanud, et sellise täpsuse saavutamine eeldab pidevaid vaatlusi vähemalt 6 kuu jooksul [ПГС № 35].

Ajutistes tasemevaatluspostides vaadeldakse veetaseme kõikumisi ainult mõõdistamise perioodil, mille kestus ei ületa harilikult ühte kuud. Seepärast pole neis vaatluspostides võimalik püsiva täpsusega määrata keskmist veetaset $\overline{Z}_0$. See suurus kantakse alalisest tasemevaatluspostist mandril asuvasse ajutisse posti kõrgtäpse geomeetrilise nivelleerimise teel, mida käsitletakse põhjalikumalt kõrgema geodeesia kursuses. Mõõtmisviga ei tohiks ületada $\pm$ 50 mm [ПГС № 35].

Saarel asuva ajutise vaatlusposti puhul, kui on olemas adekvaatne geoidi mudel, võib kasutada pikaajalisi staatilise GNSSi vaatlusi. Vastasel korral rakendatakse sünkroonvaatlusi mandril ja saarel ning arvutuslikult matemaatilise statistika meetodeid.

Teadus ja praktika on tõestanud, et ükski nähtus, sealhulgas ka ookeanide ja merede vaba pinna kõikumine, ei esine täiesti isoleeritult. Iga looduslik nähtus on seotud paljude teiste nähtustega. Nende seosed ei ole rangelt funktsionaalsed, vaid esinevad enamasti hajusal kujul, seepärast nimetatakse neid statistikas korrelatiivseteks ehk tõenäosuslikeks seosteks.

Niisuguseid seoseid uurib korrelatsiooniteooria, mis tegeleb korrelatsiooni- ja regressioonianalüüsiga. Korrelatsioonianalüüsiga tehakse kindlaks seose rangus (mida iseloomustab korrelatsioonikordaja väärtus vahemikus 0 kuni 1) ja seose suund, mis võib olla võrdeline või pöördvõrdeline (seda iseloomustab korrelatsioonikordaja märk).

Peale seose ranguse ja suuna on oluline kindlaks määrata ka seose kuju. Seda iseloomustab regressioonijoon või sellele vastav regressioonivõrrand, mille võib saada vähimruutude meetodil või korrelatsiooniteooria abil. Regressioonijoon võib olla kas sirge või kõver. Sirgjoonelist regressiooni on tunduvalt lihtsam analüüsida kui kõverjoonelist, mistõttu igal võimalikul juhul püütakse eeldada sirgjoonelist regressiooni. Seda tehakse ka allpool veetaseme kõikumise vaatlusel kahes naaberpunktis.

Regressioonisirge võrrandit võib kasutada kujul

$$Y = A + BX, \tag{4.8}$$

kus X ja Y on veetasemed f_1 ja f_2 kahes naaberpunktis vaadeldaval ajahetkel, A ja B on võrrandi parameetrid. Seose uurimisel on eriline tähtsus parameetril B, see on X võrdetegur, mis näitab, mitme ühiku (või osa) võrra muutub Y, kui X muutub ühiku võrra. Kui seos on pöördvõrdeline, siis B on miinusmärgiga. Sirge tõusu saab väljendada valemiga $B = r\dfrac{\sigma_y}{\sigma_x}$, kus r on korrelatsioonikordaja ja σ_x ning σ_y veetasemete keskmised ruuthälbed kummaski postis.

Korrelatiivse seose puhul seatakse eesmärgiks leida selline funktsionaalse seose võrrand, mis kõige paremini väljendab seose kuju. X-i ja Y-i empiiriliste väärtuste alusel otsitakse Y-i teoreetilisi väärtusi sõltuvalt X-i väärtusest. Seda võimaldab töötlus vähimruutude meetodil.

Korrelatsiooniteooria abil saadava regressioonivõrrandi detailne kuju on järgmine:

$$Y = r\frac{\sigma_y}{\sigma_x}X + \overline{Y} - r\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\overline{X}, \tag{4.9}$$

kus

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum X_i,$$

$$\overline{Y} = \frac{1}{n}\sum Y_i,$$

$$\left.\begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\frac{\sum\left(X_i - \overline{X}\right)^2}{n-1}} \\ \sigma_y &= \sqrt{\frac{\sum\left(Y_i - \overline{Y}\right)^2}{n-1}} \\ r &= \frac{\sum\left[\left(X_i - \overline{X}\right)\left(Y_i - \overline{Y}\right)\right]}{(n-1)\sigma_x\sigma_y} \end{aligned}\right\} \tag{4.10}$$

ning σ_x ja σ_y valemid on tuletatud valemist (4.6).

Sirgeid võrrandiga (4.8) või (4.9) saab olla ainult üks. Igasuguse teise sirge hälvete ruutude summa on suurem.

Regressioonivõrrandi (4.9) vea hindamiseks kasutatakse valemit

$$\sigma_n = \sigma_y \sqrt{1 - r^2} \ . \qquad (4.11)$$

Seega võimaldab võrrand (4.9) saada suuruse *Y* hinnangu konkreetsel hetkel, kui on teada suurus *X*, keskväärtused $\overline{X}$ ja $\overline{Y}$, keskmised ruuthälbed σ_x ja σ_y ning korrelatsioonikordaja *r*.

Nii saab ka keskmist veetaset määrata regressioonivõrrandi abil. Sel juhul tehakse loodeteta meredel ajutistes ja alalistes tasemevaatluspostides seeria sünkroonvaatlusi. Tähistame siinkohal tasemenäidud alalistes postides X_i ja ajutises postis Y_i. Võrrandisüsteemist (4.10) saame keskväärtuse statistilised hinnangud $\overline{X}$, $\overline{Y}$, keskmised ruuthälbed σ_x ja σ_y ning korrelatsioonikordaja *r*. Seost veetaseme kõikumiste vahel loetakse usaldusväärseks, kui korrelatsioonikordaja $r \geq 0{,}85$. Regressioonivõrrand (4.9) võimaldab leida *Y*-i väärtuse ajutises vaatluspostis, kui on teada *X*-i väärtus alalises vaatluspostis. Järelikult, kui *X*-i asemel kasutada alalise vaatlusposti paljuaastasele keskmisele veetasemele *M* vastavat lugemit *m*, siis on võimalik regressioonivõrrandiga leida keskmise veetaseme tõenäolisima lugemi m_{AP} väärtuse ajutise posti jaoks:

$$m_{AP} = \overline{Y} + r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \left(m - \overline{X} \right) . \qquad (4.12)$$

Ajutise tasemevaatlusposti keskmise veetaseme määramise täpsust hinnatakse keskmise ruutveaga σ_n (võrrand 4.11). Suurus m_{AP} loetakse usaldusväärseks, kui σ_n ei ületa 10 cm.

Analoogiliselt leitakse keskmine veetase ajutistes tasemevaatluspostides loodetega merede puhul, kuid sel juhul ei võeta algnäite mitte ühel ja samal ajal, vaid vastavatest loodete faasidest lähtudes.

Kõige lihtsamalt ja usaldusväärsemalt saame andmeread siis, kui lähtume järjestikustest kõrg- ja madalveeseisudest. Seepärast nimetatakse ajutiste tasemevaatluspostide keskmise taseme määramise meetodit regressioonivõrrandi abil vastavate tasemete meetodiks.

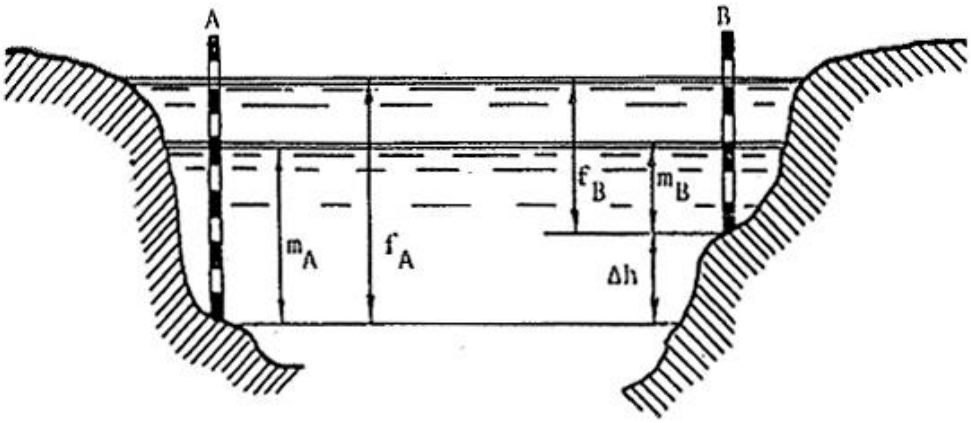
Veetasemeid on lubatud üle kanda vastavate tasemete meetodil vaid siis, kui veetaseme kõikumine võrreldavates ajutistes ja alalistes tasemevaatluspostides on sarnane. See tähendab, et mõlemas vaatluspostis peavad looded olema ühte tüüpi ja tõusud-mõõnad ühesugused. Seoste usaldatavust iseloomustab korrelatsioonikordaja *r*. Kui $r < 0{,}85$, siis loetakse seost nõrgaks ja keskmist veetaset sellise postipaari vahel üle kanda ei saa.

Keskmise veetaseme usaldusväärsemaks määramiseks loodetega merede ajutistes tasemevaatluspostides koostatakse regressioonivõrrandid kõrg- ja madalveeseisu andmeridade jaoks eraldi.

Keskmist veetaset saarel asuvates ajutistes tasemevaatluspostides võib määrata ka vesinivelleerimisega. See põhineb eeldusel, et merede paljuaastase keskmise tasemepinna võib piiratud akvatooriumil lugeda horisontaalseks ning geoidi vastava pinnaosaga paralleelseks. Järelikult, kui võtta keskmise veetaseme lugemid m_A ja m_B vastavalt vaatluspostides *A* ja *B* (joon. 4.6), siis nende lugemite vahe võrdub nende postide nulltasemete absoluutkõrguste vahega ehk hetketasemete keskväärtuste vahedega.

$$\Delta h = m_A - m_B = f_{0A} - f_{0B} \tag{4.13}$$

See ongi vesinivelleerimise meetodi alus.



Joonis 4.4. Veetaseme vaatluspostid. m_A, m_B – veetaseme keskmised lugemid vaatluspostides *A* ja *B*; f_A ja f_B – veeseisu hetketaseme lugemid vaatluspostides *A* ja *B* (Laigna, Kala, 2001)

Looduses saab vaadelda vaid hetketaset, mille kõrgus kujuneb paljude tegurite koosmõjul:

$$f = h_0 + h_{vk} + h_l + h_t + h_{vl} + h_j, \tag{4.14}$$

kus h_0 on vaba veepinna kõrgus; h_{vk} – antud basseini veebilansi muudust tingitud veetaseme kõikumine; h_1 – loodetest tingitud veetaseme kõikumine; h_t – vee tiheduse muutumisest tingitud veetaseme kõikumine; h_{vl} – veetaseme kõikumine maakoore vertikaalse liikumise tõttu vaatluspostide asukohas; h_j – juhuslikud tasememuutused juhutegurite tõttu.

Veebilansi muutused põhjustavad mere või selle osapiirkonna keskmise veetaseme muutuse $h_{vk,}$ millele lisanduvad mere veetaseme kalletest tingitud muutused.

Loodetest tingitud kõikumisi h_l iseloomustab range perioodilisus, kusjuures periood ei ületa ühte ööpäeva. Järelikult veetaseme keskmistamine ööpäevast pikema ajavahemiku järel kõrvaldab selle komponendi mõju. Vajaduse korral piirdutakse ka lühemate ajavahemikega. Sel juhul võetakse arvesse loodete kordumise korrapärasus, mis võimaldab ajutises vaatluspostis arvutada vastava komponendi suvalisel ajahetkel. Eestis on see mõju tühine.

Vee tiheduse muutumine ja püsivate hoovuste olemasolu tekitavad merepinna kalde. Taseme h_t muudu vee tiheduse muutusest tingitud kalde tõttu saab valemiga

$$\Delta h_t \approx \frac{U_2 - U_1}{g_{45}}, \qquad (4.15)$$

kus U_1 ja U_2 on raskusjõu potentsiaalid vastavates punktides; g_{45} – raskuskiirendus 45. laiuskraadil.

Vajalike andmete puudumisel võetakse merepinna kalle 100 km kohta võrdseks 0,01 m. Kui vaatluspostide vahemaa on väike ja hoovused puuduvad, siis Δh_t jäetakse vaatluse alt välja.

Veetaseme näiv kõikumine maakoore tektooniliste liikumiste tõttu tasemevaatluspostide piirkonnas h_{vl} on aeglane, kuid pikema aja kestel võivad muutused $h_{vl} = ct$ olla olulised. Näiteks Eesti loodeosas esineb nn Fennoskandia kilbi pärastjääaegne tõus kuni 2,5 mm/a. Nende mõju kõrvaldamiseks on vaja alaliste vaatluspostide keskmised tasemenäidud taandada veetaseme järgi nivelleerimise ajale. Vastavad muutumiskiirused c võib leida käsiraamatutest.

Juhuslikud veetaseme muutused h_j võivad olla põhjustatud veemasside juurde- ja äravoolust, hetkekõikumistest, õhurõhu muutustest jms. Aastaajast tingitud meretaseme muutlikkust Eesti vetes on võimalik jälgida kuu keskmise veeseisu alusel, kusjuures kõikumise ulatuseks on erinevail hinnanguil saadud 20...40 cm. Veetase on kõrgeim tavaliselt septembrist oktoobrini ja detsembris, madalaim aga märtsist maini ja novembris.

Veetaseme hetkeväärtuste tavaline amplituud Eesti ranniku veemõõdujaamades on erinev: Soome lahes 230...250 cm, Väinameres 250...260 cm, Liivi lahes 230... 250 cm. Ranniku eri piirkondades võivad rannajoone liigestatus, rannanõlva kalle, tuuleolud jms veetaseme kõikumist võimendada. Nii on Pärnu jõe suudmes saadud veetaseme kõikumiseks 417 cm (+ 313...—104 cm), Narva jõe suudmes 343 cm (+220...—123 cm), siin on maksimum- ja miinimumväärtused Amsterdami nulli järgi. Lühiajalisi olulisi tasemevõnkumisi (koos teiste teguritega) põhjustavad nn pikad lained, mis avalduvad Soome lahes kestva läänesuunalise tormituule ja õhurõhu langusega, korduvusajaga 3...7 ööpäeva ja kõrgusega 0,5...1,5 m. Suvised ja kevadised veetõusud pole nii äkilised ja alanevad kiiremini [Veeteede Amet, 2003].

On selge, et mida lähemal üksteisele on vaatluspunktid veetaseme järgi nivelleerimisel, seda sarnasemad on hüdroloogilised ja geomorfoloogilised faktorid ning seda väiksemad on mingi faktori muutumisest tingitud veetaseme erinevused. Veetaseme muutumise juhuslik iseloom ei võimalda aga vastavate parandite abil kõrvaldada suuruse Δh_j määramise vigu ning seepärast tuleb kasutada statistilisi meetodeid.

Vesinivelleerimise täpsus sõltub vaatluste kestusest ning sellest, kuivõrd sarnased on muutused võrreldavates punktides. Sõltuvalt vaatluste kestusest saadakse ajutistes tasemevaatluspostides vesinivelleerimisel aastakeskmine, kuukeskmine ja ööpäevane keskmine veetase. On tehtud kindlaks, et vaatluste aastapikkune seeria elimineerib peaaegu täielikult loodete ning aju/paguvee mõju, mistõttu keskmine ruutviga ei tohiks ületada 2...5 cm. Kui vaatluspostide vahekaugus on 50 km ja vaatlused kestavad 3...5 aastat, siis viga ei ületa 10 mm, st vastab kõrgtäpse nivelleerimise täpsusele [Истошин, 1969].

Sügavusnulli ülekandmise usaldusväärsust ja täpsust vesinivelleerimisel võib suurendada, kui teha sünkroonvaatlusi mitte ühes, vaid mitmes tasemevaatluspostis. Tõenäoseim tasememuut Δh saadakse sel juhul nn kaalutud keskmisena:

$$\overline{\Delta h} = \frac{p_1 \Delta h_1 + p_2 \Delta h_2 + \ldots + p_n \Delta h_n}{\sum p_i}, \qquad (4.16)$$

kus $p_i = \frac{1}{\sigma^2_{h_i}}$ või $p_i = \frac{1}{S_i}$, $i = 1, 2, \ldots, n.$

Arvutusnäide 4.1

On antud rida veetaseme lugemeid alalises TVPs (X) ja ajutises TVPs (Y)

X_{cm}	530	529	549	527	531	537	530	535	520	525
Y_{cm}	418	417	427	416	417	427	418	417	415	420

Lahenduskäik: 1. Arvuta keskmine veetase ajutises TVPs statistilise meetodi abil. 2. Hinda saadud taseme usalduspiire, kasutades Studenti jaotust, arvestades usaldatavuse tõenäosust β = 0,90. 3. Leia korrelatsioonikordaja ja hinda selle usaldusväärsust. 4. Koosta regressioonivõrrand ja leia ka selle abil ajutise posti keskmise veetaseme lugemi tõenäoseim väärtus $m_{AP} = \overline{Y}$, kui alalise posti veetaseme paljuaastasele keskmisele vastav $m_0 = \overline{X}$ = 5,300 m. 5. Leia regressioonivõrrandi viga ja hinda m_{AP} usaldusväärsust. 6. Määra ajutise posti lati nulli absoluutkõrgus vesinivelleerimise abil, kui alalise posti nulli absoluutkõrgus on –5,17 m.

Lahenduskäik (arvestades Windows 10):

1. Leiame vaatlusperioodi keskmised tasemelugemid X_k ja Y_k. Kuna lahendus on otstarbekas sooritada EXCELis, siis tuleks andmeread sinna sisestada ja leida keskmised väärtused käskudega FORMULAS+MORE FUNCTIONS+ STATISTICAL ja lõpukäsuga AVERAGE (). Antud juhul X_k = 531,3 cm ja Y_k = 419,2 cm.

2. Studenti kriteeriumi (t) leiame viimase käsuga T.INV 2T (1 – β, k). Antud juhul t = 1,833. Andmeridade X_{cm} ja Y_{cm} keskmised ruuthälbed saame valemiga (4.6) või EXCELis viimase käsuga STDEV.S, sisestades seejärel vastava andmerea. Antud juhul $\sigma_x = \pm$ 7,85 cm ja $\sigma_y = \pm$ 4,32 cm.

$$|\varepsilon| = t\frac{\sigma_y}{\sqrt{n}} = 1{,}833\frac{4{,}32}{10} = 2{,}50 \text{ cm}$$

   Seega keskmise lugemi usalduspiirid $Y_k \pm \varepsilon$ on 416,7 cm ja 421,7 cm.

3. Korrelatsioonikordaja võib leida (4.10) kolmanda valemiga või kasutades EXCELit viimase käsuga CORREL, sisestades mõlemad andmeread. Antud tingimustel saame r = 0,79. Kuna 0,79 < 0,85, võib konstateerida, et korrelatsioon ei ole usaldusväärne.

4. Koostame regressioonivõrrandi (4.12) ja lahendame selle

$$m_{AP} = 419{,}2 + 0{,}79\frac{4{,}32}{7{,}85}(533 - 531{,}3) = 419{,}9 \text{ cm}.$$

5. Leiame regressioonivõrrandi vea valemiga (4.11)

$$\sigma_n = 4{,}32\sqrt{1 - 0{,}79^2} = 2{,}67 \text{ cm} < 10 \text{ cm}.$$

   Seega võib lugeda ajutise TVP keskmist veetaset usaldusväärseks.

6. Ajutise TVP lati nulli kõrguskasv alalise TVP lati nulli suhtes on

   Δh = 531,3 – 419,2 = 112,1 cm.

   Ajutise posti nulli absoluutkõrgus on – 5,17 + 1,121 = – 4,049 m.

4.4. Loodenähtused

4.4.1. Maailmamere loodete üldmõisted

Maailmamere veetaseme pikaajalised kõikumised on tingitud Kuu, Päikese ja Maa vastastikusest külgetõmbejõust. Need kõikumised kujutavad endast ülipikki (tuhanded kilomeetrid) gravitatsioonilisi (st gravitatsioonist põhjustatud) laineid, milles veeosakesed liiguvad ellipsitaolistel orbiitidel. Veeosakeste liikumine mööda orbiite tekitab tõusu-mõõna nähtuse kaks vormi:

- osakeste liikumise projektsioon ellipsi vertikaalteljel iseloomustab vertikaalseid kõikumisi – loodeid;
- osakeste liikumise projektsioon horisontaalteljel iseloomustab veeosakeste kulgevat liikumist – loodehoovust, millel on suund ja kiirus.

Ookeani loodelainete kiiruse saab leida põhimõtteliselt valemiga

$$v = \sqrt{gz}\,, \tag{4.17}$$

kus g on raskuskiirendus ja z mere sügavus.

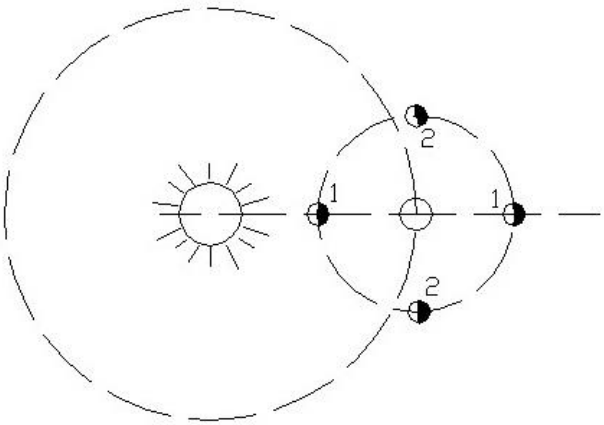
Arvestades ookeani sügavuseks keskmiselt 4000 m, saame loodelainete kiiruseks ligikaudu 200 m/s (400 sõlme). Harilike ookeanilainete (tuulelainete) puhul, mille pikkus on sügavusega võrreldes väike, kasutatakse faasikiiruse (kiirus, millega liigub ruumis harmoonilise laine faas) valemit

$$v = \frac{gT}{2\pi}\,, \tag{4.18}$$

kus T on laine periood. Küllaltki suurte lainete 20 s perioodi puhul saame ookeanilainete kiiruseks kuni 112 m/s. Kuivõrd aga harilikud ookeanilained on kõik veidi erineva pikkusega, siis neil on ka erinev faasikiirus. Seal, kus üksikute võnkumiste faasid langevad ühte, liituvad kõik võnkumised ja annavad maksimaalse amplituudiga laine (nn üheksas laine või mõrvarlaine). Seda kutsutakse lainete grupi energiatsentriks, mis üksikute võnkumiste faaside vahekorra pideva muutuse tõttu kandub edasi. Energiatsentri edasikandumise kiirust nimetatakse grupikiiruseks ja see on ligikaudu poole väiksem kui keskmine faasikiirus.

Kui Päike, Maa ja Kuu asetseksid kogu aeg ühisel teljel ja ühtlasel kaugusel üksteisest, siis tekiksid igas Maa punktis ainult Maa pöörlemisest tingitud looded, mis oma olemuselt oleksid veemasside võnkumised. Kuna Päikese, Maa ja Kuu vastastikune asend muutub perioodiliselt, on ka loodetel, st tõusul ja mõõnal, perioodiline iseloom (joon. 4.5). Suurt mõju avaldavad loodetele ka rannajoone kuju, sügavus, põhjareljeef ning veekogu mõõtmed ja ühendus maailmamerega.

Maa igale punktmassile mõjuvad Kuu ja Päikese gravitatsioonijõud ja tsentrifugaaljõud, mis on tingitud süsteemide Maa-Kuu ja Maa-Päike tiirlemisest ümber nende süsteemide massikeskmete. Süsteemi Maa-Kuu massikese asub Maa keskpunktist 0,73 viimase raadiuse kaugusel, Maa-Päikese massikese asub Päikese sees. Kuu ja Päikese külgetõmbejõud on maapinna eri punktides erinev ja on pöördvõrdeline Maa vaadeldava punkti kaugusega vastavalt Kuust või Päikesest ning suunatud vastava taevakeha poole. Tsentrifugaaljõud on konstantne nii suuruselt kui ka suunalt ning võrdub Kuu ja Päikese gravitatsioonijõu summaga Maa keskpunktis.



Joonis 4.5. Kuu asendid: *1* – süsüügialoodete, *2* – kvadratuurloodete puhul

Loodeid tekitava jõu horisontaalne komponent on suunatud piki Maa pinna puutujat vaadeldavas punktis, kusjuures selle komponendi mõjul toimub loodehoovus. Viimane jätkub seni, kuni potentsiaalide vahe mere keskmise taseme ja loode kõrguse raskusjõu vahel võrdsustub loodeid tekitava jõu potentsiaaliga (4.19):

$$\frac{GM_{\mathrm{M}}}{R_{\mathrm{M}}} - \frac{GM_{\mathrm{M}}}{R_{\mathrm{M}} + H_{\mathrm{TL}}} = \frac{3}{2} G \frac{M_{\mathrm{O}} R_{\mathrm{M}}^2}{D_{\mathrm{MO}}^3} \left(cos^2\, z - \frac{1}{3} \right), \tag{4.19}$$

kus G – on gravitatsioonikonstant; M_{M} – Maa mass; R_{M} – Maa raadius; H_{TL} – tõusulaine kõrgus; M_{O} – taevakeha mass; D_{MO} – kaugus Maa ja loodeid tekitava taevakeha keskme vahel; z – taevakeha seniitkaugus. Võrrandi vasakul pool on vastavalt mere keskmise taseme ja loodelise taseme raskusjõudude potentsiaalide vahed, paremal pool loodeid tekitava jõu potentsiaal.

Valem kirjeldab loodete üldpõhimõtet Newtoni gravitatsiooniseaduse alusel ega arvesta põhjareljeefi ja rannajoone konfiguratsiooni mõju. Hiljem on koostatud korrektsemaid valemeid, kuid navigatsiooniks vajalike täpsemate meretasemete leidmiseks tuleb kasutada ikkagi suuresti eksperimentaalsetel andmetel põhinevat loodete harmoonilist analüüsi (vt 4.4.2).

Loodete tüübi esinemisvormile avaldavad mõju Kuu ja Päikese **deklinatsioon**[15], mis pidevalt muutuvad (Kuu 23°27’ ± 5°08’ p.l kuni 23°27’ ± 5°08’ l.l ja Päike 23°27’ p.l kuni 23°27’l.l) ning Kuu ja Maa kauguse muutus perigee ja apogee vahel kuni 6,7 Maa raadiust (10,5%) ja Päikese ning Maa kauguse muutus perigee ja apogee vahel kuni 783 Maa raadiust (3,3%) [Истошин, 1969]. Need asjaolud teki-

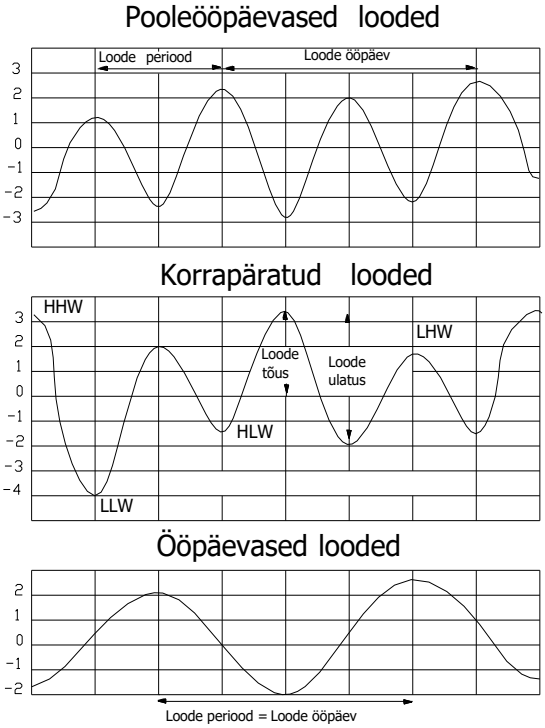
[15] **Taevakeha kääne** e deklinatsioon on taevakeha asunurk taevaekvaatori tasandi suhtes (geograafilise laiuse analoog). **Taevaekvaatori** tasand on maailmatelje normaaltasand, mis läbib vaatleja silma. **Maailmatelg** on Maa telje paralleel, mis läbib vaatleja silma.

tavad loodete ööpäevast, poolekuulist ja kuulist ebavõrdsust, st nende amplituudi ja kõrg- ning madalvee saabumise aja erinevusi antud piirkonna keskväärtustest.

Loodete ööpäevast ebavõrdsust tingib ka veemassi hõõrdumine merepõhja vastu madalvee alal, kusjuures mõnes kohas võivad tekkida seetõttu ka kahekordsed pooleööpäevased looded.

Kui Kuu deklinatsioon on väike, esinevad põhimõtteliselt igal pool pooleööpäevased looded, kusjuures ööpäevaste tsüklite tõusude amplituudid erinevad üksteisest vähe ning mõõnade amplituudid erinevad üksteisest samuti vähe (joon. 4.6, ülemine).

Kui Kuu deklinatsioon kasvab, peaksid tekkima üldjuhul korrapäratud pooleööpäevased looded (joon. 4.6, keskmine), mida mõjutavad loodete ööpäevased ebavõrdsused ja mis lähevad lõpuks üle korrapäratuteks ööpäevasteks loodeteks. Kui Kuu deklinatsioon kasvab maksimaalse lähedaseks, peaksid tekkima üldjuhul korrapärased ööpäevased looded (joon. 4.6, alumine).



Joonis 4.6. Loodete tüübid ja tasemed. HHW – kõrge kõrgvesi (*Higher High Water*); LHW – madal kõrgvesi (*Lower High Water*); HLV – kõrge madalvesi (*Higher Low* Water); LLW – madal madalvesi (*Lower Low Water*); loode ulatust nimetatakse ka amplituudiks. Mõõn on loode ulatuse ja tõusu vahe

Kui looded toimuksid ainult Kuu ja Päikese mõjul, jääks loodete ulatus 0,9 m piiridesse (nagu see ka ookeaniavarustel esineb). Merepõhja ja ranniku morfoloogilised iseärasused (ranna konfiguratsioon ja põhjareljeef) mõjutavad loodete iseloomu aga tugevasti. Seda on näha jooniselt 4.9, kus peaaegu sama geograafilise pikkuse ja laiusega aladel esinevad üksteise läheduses kõik loodete liigid. Lisaks vähendab jääkate loodete amplituudi.

Pikkades ja kitsastes lahtedes võib mereloode tõus ulatuda 18 meetrini (vt joon. 4.8, Fundy laht Kanadas Atlandi rannikul), seda põhjustavad resonantslooded, st sundloodelainete (tõelised loodelained) ja vabalainete (näiteks rannikust tagasipõrkunud loodelained) koosmõju.

Koos veetaseme tõusuga tekib ka loodehoovus, mis on suunatud tõusulaine levimise suunas. Hoovus saavutab maksimaalse kiiruse kõrgvee saabudes ja veetaseme alanemisel hoovuse kiirus väheneb. Kitsastes väinades võib loodehoovuste kiiruseks olla 9...12 sõlme, mõjutades oluliselt laevaliiklust.

Lahtedes ja väinades väheneb sügavus ranna suunas ja tõusulaine, hõõrdudes vastu kaldaid, liigub edasi kaarekujulise frondina. Seetõttu saabub kõrgvesi lahe või väina keskosas varem kui ranna ääres ja mõõn algab madalvees hilinemisega.

Jõgedes võivad loodelained levida kaugele sisemaale, näiteks Amazonase jõel isegi 1400 km. Väikesed sügavused, põhja kalle ja jõevool takistavad tõusulaine levikut. Selle tagajärjel muutub tõusulaine järsuks ja kiireks. Sellist 1...3 meetri kõrgust ja 9...11 sõlme kiirusega liikuvat ja laevadele ohtlikku tõusulainet nimetatakse **booriks**. See võib levida kuni 80 km kaugusele sisemaale, kuid tavaliselt laguneb varem mõnel pikemal põikmadalikul.

4.4.2. Loodete harmoonilise analüüsi alused

Navigatsiooniks vajaliku täpse loodete andmebaasi koostamiseks on vaja teada loodete harmoonilisi konstante, kusjuures loodete tasemete leidmiseks kasutatakse väikeste võnkumiste liitumise printsiipi. Siinkohal võib iga erineva jõu põhjustatud võnkumist vaadelda eraldi, kuid nende jõudude toime üldresultaat leitakse üksikmõjude summeerimise teel (joonis 4.7).

Meretase väljenduks antud juhul järgmise valemiga:

$$h = R_\ell \cos(q_\ell t - \zeta_\ell) + R_s \cos(q_s t - \zeta_s), \qquad (4.20)$$

kus t on kohalik aeg; q – loodelaine sagedus (iga laine puhul *const*); R – loodelaine komponendi amplituud (muutub väga aeglaselt); ζ – loodelaine algfaas, st veetaseme mahajäämus loodeid tekitavast jõust; ℓ – indeks, mis tähistab Kuu mõjust olenevaid parameetreid; s – indeks, mis tähistab Päikese mõjust tingitud parameetreid.

Kuna Päike ja Kuu ei asu enamasti Maa ekvaatori tasandis ja nende kääne ehk deklinatsioon, omavaheline asend ning kaugus Maa tsentrist muutuvad pidevalt, siis kõik see tekitab loodete keeruka kõvera, mida püütakse laotada reaks lihtsa-

mateks. Selleks lahutatakse Päikese ja Kuu jõud mitmeks osaks ja viimaste mõju omistatakse fiktiivsetele taevakehadele, mis liiguvad ühtlaselt, kuid eri kiirusega ümber Maa selle ekvaatoritasandis. Nende fiktiivsete taevakehade massid, orbiidid ja liikumise perioodid on valitud nii, et nende summaarne mõju, st loodelaine amplituud h võrduks Kuu ja Päikese tegeliku koosmõjuga.

$$h = \Sigma R_i \cos(q_i t - \zeta_i). \qquad (4.21)$$

Loodelaine algfaasi võib väljendada valemiga

$$\zeta_i = (v_0+u)_i - \Omega_i, \qquad (4.22)$$

kus $(v_0 + u)_i$ on loodelaine astronoomiline algargument, mis saadakse eritabelist; Ω_i – **loodelaine hilistumine**, vaadeldava osalaine harja ülemineku hilinemine antud punkti meridiaanist, võrreldes Kuu kulminatsiooni ajaga antud meridiaanil, mis on taandatud Greenwichi meridiaanile ja arvutatakse igale lainele eri valemitega, oleneb kohalikest tingimustest (antakse kraadides); R_i – loodelaine redutseeritud amplituud, oleneb seda laineosa tekitavast jõust (need jõud tähistame M_i, S_i, N_i, K_i, O_i, P_i, Q_i), kusjuures amplituud muutub aeglaselt.

$$R_i = f_i\, h_i, \qquad (4.23)$$

kus f_i on taandamiskordaja, mis oleneb astronoomilistest andmetest ja saadakse tabelist, mis antakse iga aasta jaoks; h_i – laine keskmine amplituud meetrites (peaaegu konstantne); sõltub kohalikest tingimustest.

Suurusi h_i ja Ω_i nimetatakse **harmoonilisteks konstantideks.**

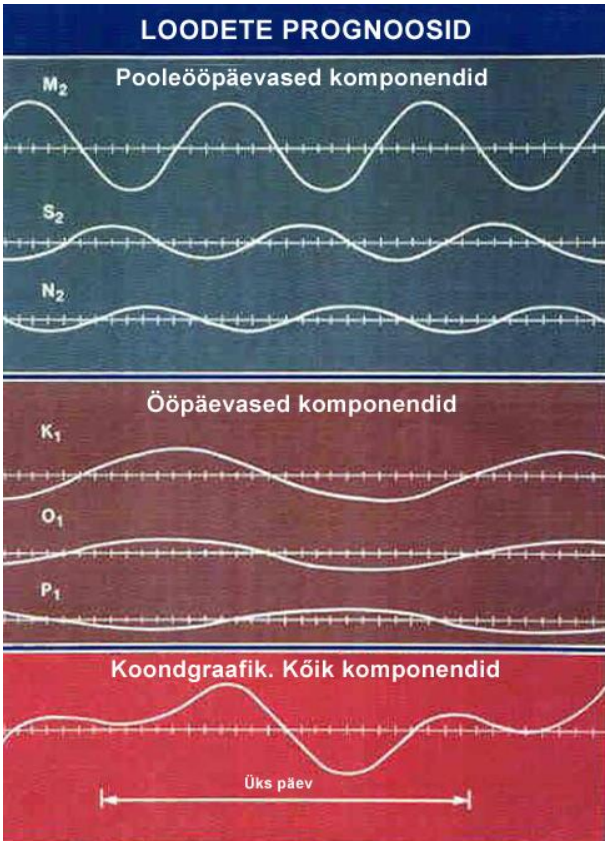
Hüdrograafias kasutatakse loodetega seotud ülesannete lahendamisel harilikult kaheksa peamise loodelaine harmoonilisi konstante (tabel 4.1).

Tabel 4. 1. Loodelaine peamised harmoonilised konstandid (Laigna, Kala, 2001)

	Looded	
Laine komponent	Pooleööpäevased	Ööpäevased
Peamine kuulaine	M_2	O_1
Peamine päikselaine	S_2	P_1
Suur elliptiline kuulaine	N_2	Q_1
Kuu–Päikese deklinatsioonilaine	K_2	K_1

Märkus: Indeks 1 tähistab ööpäevast ja indeks 2 pooleööpäevast loodelainet.

Loodetega meres tuleb teada loodete iseloomu. On teada, et M_2, S_2, K_1, Q_1 sõltuvad kohalikest tingimustest rohkem kui teised ja määravad põhiliselt loodete iseloomu.



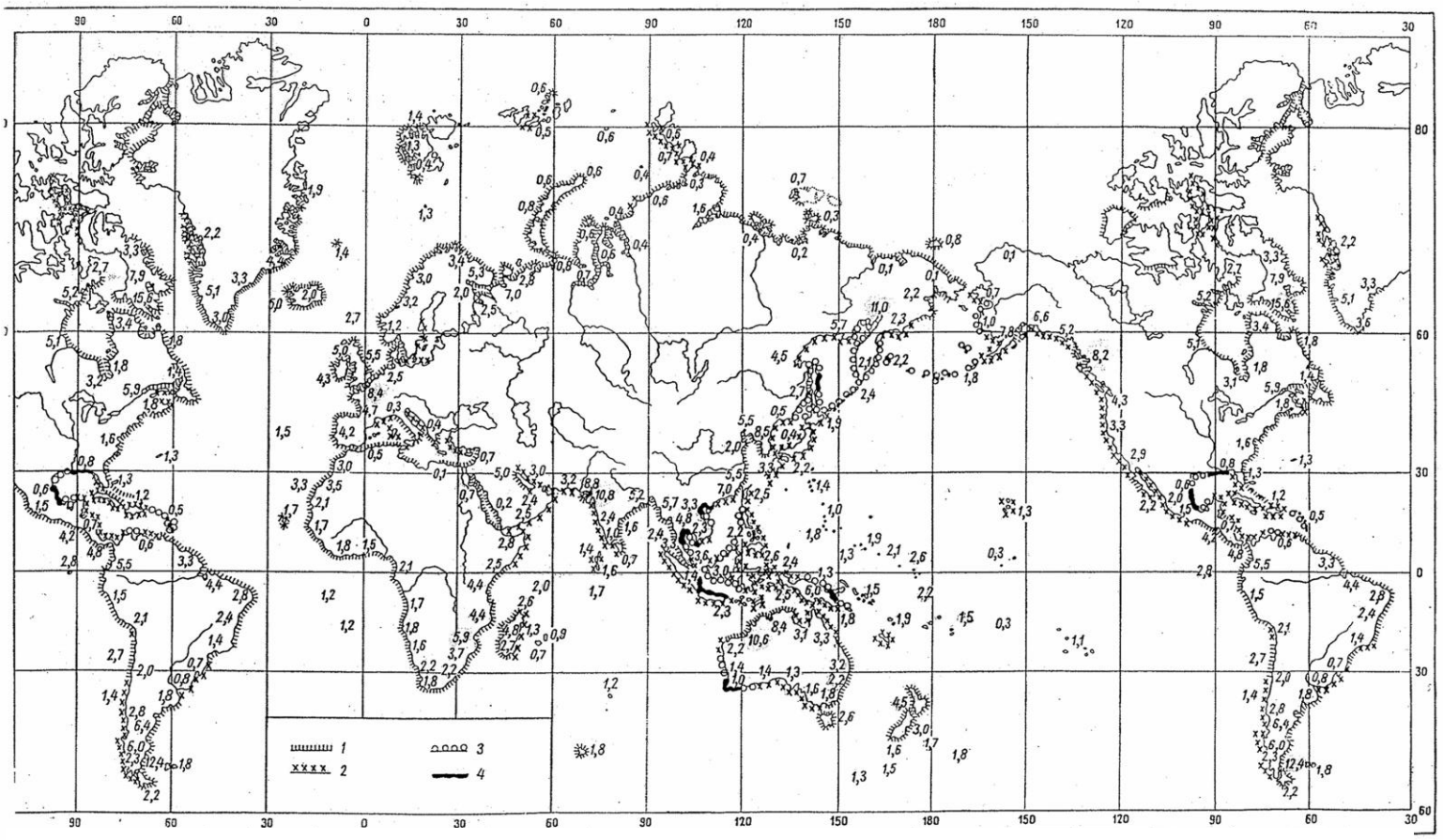
Joonis 4.7. Loodelainete komponentide põhimõttelised graafikud [IHO, Manual, 2011]

Loodete tüüp määratakse valemiga (4.24) ja tabeliga (4.2)

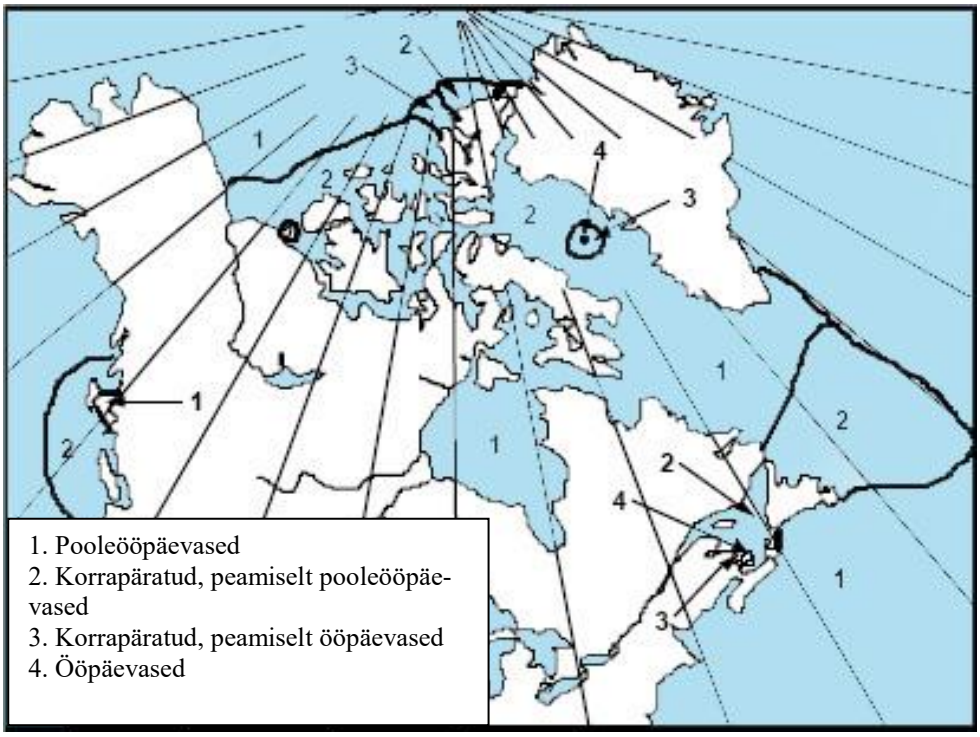
$$\chi = \frac{h_{K_1} + h_{O1}}{h_{M_2}}. \qquad (4.24)$$

Tabel 4.2. Loodete tüübid (Laigna, Kala, 2001)

χ-i piirväärtused	Loodete tüübid	Suurima tõusu aeg
0 – 0,5	pooleööpäevane	süsüügiapäevad
0,5 – 2,0	korrapäratu pooleööpäevane	- “ -
2,0 – 4,0	korrapäratu ööpäevane	Kuu suurima käände ajal
> 4,0	ööpäevane	- “ -



Joonis 4.8. Maailmamere loodete tüübid ja ulatus meetrites [Истошин, 1969]
1 – pooleööpäevased looded; *2* – korrapäratud pooleööpäevased looded; *3* – korrapäratud ööpäevased looded; *4* – ööpäevased looded



Joonis 4.9. Erinevat tüüpi loodete esinemine Kanada rannikul. Pane tähele, et piirkonna kaguservas St Laurentiuse lahes ja sellest väljaspool Atlandi ookeanis esinevad üksteise läheduses kõik põhilised loodete tüübid. Jämedate joontega on piiratud erinevate loodeliikide esinemisalad [De Jong jt, 2010]

Madalaimaks astronoomiliseks (teoreetiliseks) tasemeks (LAT) nimetatakse madalaimat meretaset, mis on võimalik, arvestades astronoomilisi tegureid. Seda võib arvutada vastavate valemitega, teades antud punkti kohta vähemalt nelja harmoonilist konstanti ja keskmist taset.

Tugevate maatuulte puhul võib tase siiski veel madalam olla.

Madalaima astronoomilise taseme täpsed arvutused on võrdlemisi töömahukad. Näiteks tuleks lahendada biruutvõrranditeks mittetaanduvaid neljanda astme võrrandeid. Tänapäeval saab loodete tasemete teatud perioodiga mõõdetud andmed viia arvutiprogrammi, kus nende järgi leitakse loodete harmoonilised konstandid, mille abil saab moodustada loodete parameetrite andmekogu. Lõppkokkuvõttes võib kuvada arvutiekraanil vajalikul kuupäeval ja kellaajal loode parameetrid.

4.4.3. Madalaima teoreetilise taseme määramine ajutistes tasemevaatluspostides

Ajutistes tasemevaatluspostides tehakse kindlaks madalaim teoreetiline veetase regressioonianalüüsiga. Selleks kasutatakse alalistes ja ajutistes tasemevaatluspostides saadud madalvee lugemite rida, mille kaudu leitakse suurused *r, A* ja *B*. Edasi koostatakse regressioonivõrrand.

Madalaima teoreetilise taseme näit ajutises tasemevaatluspostis n_{av} arvutatakse vastava alalise tasemevaatlusposti näidu n_0 järgi valemiga (4.25):

$$n_{av} = An_0 + B. \tag{4.25}$$

Regressioonianalüüsi võib kasutada siis, kui mõlemas vaatluspostis esineb ööpäevas ühepalju ühesuguse järgnevuse ja graafiku kujuga loodetest tingitud kõrg- ja madalveeseise, mis erinevad üksteisest vaid kõrg- ja madalvee saabumisaja ning taseme poolest. Et need tingimused on täidetud, näitavad korrelatsioonikordaja $r \geq 0{,}85$ ja regressioonivõrrandi keskmine ruutviga $\sigma \leq 10$ cm.

Suurema täpsuse huvides soovitatakse madalaim teoreetiline tase leida mitmes tasemevaatluspostis, mille vahel on piisavalt tugev korrelatiivne seos. Selle taseme tõenäolisem väärtus saadakse kaalutud keskmisena (vt valem 4.16).

Korrapäraste pooleööpäevaste loodete puhul võib madalaima astronoomilise taseme leida **tõusuteguri** abil, kasutades Laplace'i valemit

$$n_{av} = m_{\mathrm{av}} - 1{,}2k_{\mathrm{s}}, \tag{4.26}$$

kus m_{av} on keskmise taseme lugem ja k_{s} tõusutegur (süsüügialoodete keskmine amplituud pööripäeval, kui Kuu ja Päikese deklinatsioon on 0^{o} nende keskmiste kauguste korral Maast).

Tõusuteguri võib leida valemiga

$$k_{\mathrm{s}} = h_{\mathrm{M2}} + h_{\mathrm{S2}} + h_{\mathrm{K1}}. \tag{4.27}$$

4.5. Tasemevaatluspostide tegevusulatus

Et merepinna kõikumiste iseloom muutub punktist punkti, siis tekib küsimus, millisel kaugusel tasemevaatluspostist võib veel kasutada selle näitusid sügavusparandite arvutamisel. Teisisõnu, kerkib probleem tasemevaatlusposti tegevusulatuse määramisest.

Tasemevaatlusposti *A* tegevusulatuseks posti *B* suunas nimetatakse kaugust *d*, mille puhul hetketasemete vahe mis tahes ajahetkel ei ületa etteantud suurust.

Ilmselt on tasemevaatlusposti tegevusulatus seda väiksem, mida suuremad on looded vaadeldavas piirkonnas, mida keerukam on merepõhja reljeef ja rannajoone kuju ning mida rohkem muutuvad tasemekõikumiste faas ja suurus.

Hüdrograafiliste tööde puhul määratakse tasemevaatlusposti tegevusulatus eeldusel, et hetketasemete vahe vaatluspostis ja sellest mingil kaugusel asuvas punktis ei tohi ületada lubatavat viga δ_Z.

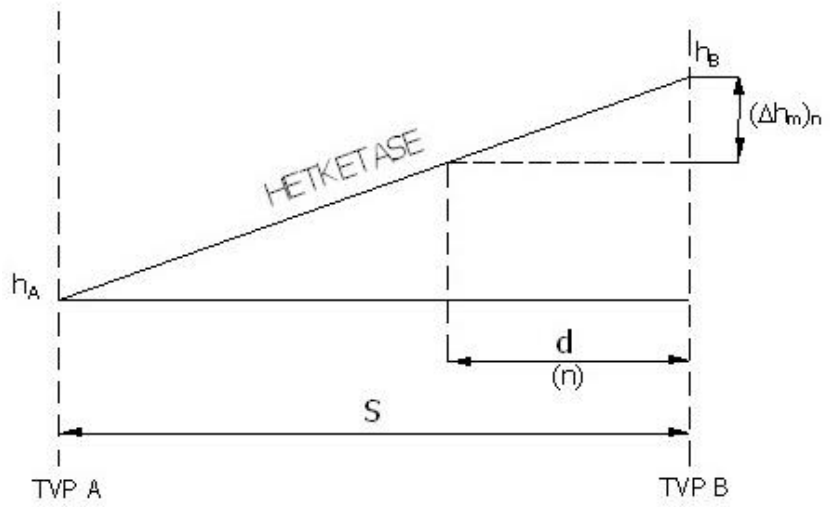
Kui tööde piirkonnas paikneb mitu tasemevaatlusposti, siis tuleb arvutada tegevusulatus igaühe suunal eraldi ja ühendada nende lõpp-punktid sujuva kõveraga, saades nii tööpiirkonna. Järelikult kujutab tööpiirkond endast akvatooriumi, mille piires hetketase ei erine hetketasemest vaatluspostis rohkem kui δ_Z võrra.

Määrates tasemevaatluspostide tegevusulatuse ja tööpiirkonna, saame ettekujutuse kogu kõrguselise aluse kvaliteedist.

Kui tööpiirkondade mõõdistusalal on ühisosa ja igas mõõdistusala punktis saab sügavuste nullile taandamisel kasutada kas või üheainsa vaatlusposti näitusid, siis võib kogu kõrguselist alust lugeda usaldusväärseks. Vastasel korral tuleb luua ajutised tasemevaatluspostid.

Tasemevaatluspostide tegevusulatuse määramine kujutab endast ekstreemumülesannet. Tavaliselt lahendatakse see loodetega mere puhul järgmisi eeldusi arvestades:

- veetaseme kõikumised tööpiirkonnas on ühesuguse iseloomuga;
- hetketaseme loodpind kujutab endast siledat kõverpinda;
- loodete suurus ja faas muutuvad tööpiirkonnas ühtlaselt.



Joonis. 4.10. Tasemevaatlusposti (TVP) tegevusulatuse arvutuse põhimõte. h_A, h_B – hetketasemed tasemevaatluspostides *A* ja *B*

Tasemevaatlusposti tegevusulatus loodetega merel arvutatakse lähendusmeetodil valemiga, mille võib saada vahetult jooniselt 4.10:

$$d = S\frac{n\delta_z}{(\Delta h_m)_n}, \tag{4.28}$$

kus S on kaugus naaberpostide vahel (km); n – mingi punkti suhteline kaugus tasemevaatluspostis, kui tinglikult $S = 1$; δ_z – lubatud viga hetketaseme määramisel; $(\Delta h_m)_n$ – maksimaalne hetketasemete vahe tasemavaatluspostis ja punktis, mis asub sellest suhtelisel kaugusel n.

Maksimaalse hetketasemete vahe näiteks tasemevaatluspostis B ja mingis vahepunktis võib leida valemiga

$$(\Delta h_m)_n = R_B\sqrt{1 + K^2 - 2K\cos(n\Delta\varphi)}, \tag{4.29}$$

kus R_B on tõusulaine amplituud postis B (cm); $\Delta\varphi$ – loodelaine faasi muut vahemikus A, B; $K = 1 + n(\lambda - 1)$.

Kordaja K leidmiseks vajalik tõusulaine amplituudide R suhe postides A ja B avaldub valemiga

$$\lambda_B = \frac{R_A}{R_B}. \tag{4.30}$$

Hetketasemete vahe vaatluspostis A ja mingis vahepunktis leiame analoogiliste valemitega.

Amplituudid R_i ($i = A, B$) leitakse põhilainete harmooniliste konstantide h summeerimisel:

$$R_i = \left(h_{M_2} + h_{S_2} + h_{K_1} + h_{O_1}\right). \tag{4.31}$$

Faasimuut pooleööpäevase loodelaine puhul (punktis B)

$$\Delta\varphi_B = \left(\Omega_{S_2}\right)_B - \left(\Omega_{S_2}\right)_A \tag{4.32}$$

ja ööpäevase loodelaine puhul

$$\Delta\varphi_B = \left(\Omega_{K_1}\right)_B - \left(\Omega_{K_1}\right)_A. \tag{4.33}$$

Loodete tüübi kindlakstegemiseks kasutatakse valemit (4.24) ja tabelit 4.2.

Korrapäratute loodete puhul, kui tööde perioodil esineb üks kõrgvesi ja üks madalvesi, tehakse arvutused ööpäevaste lainete, ülejäänud juhtudel pooleööpäevaste lainete järgi.

Kui harmoonilised konstandid ei ole teada, siis võetakse R_i väärtuseks pool kõrgvee ja madalvee maksimaalse taseme vahest $\Delta h_{\max}$ tööde perioodil, aga faasimuut $\Delta\varphi$ (radiaanides) leitakse kõrg- või madalvee tasemevaatluspostidesse saabumise keskmise ajavahe $\Delta\theta_k$ järgi. Selleks tehakse tööde perioodil 2...3 ööpäevast (igatunnised) vaatluste seeriat ja leitakse faasimuut valemiga

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta\theta_K}{T}, \tag{4.34}$$

kus T on laine periood; $\Delta\theta$ on keskmine ajavahe tundides; $\Delta\varphi$ – keskmine ajavahe radiaanides.

Eelnevast lähtudes saab valem (4.33) pooleööpäevaste lainete (T = 12,4 tundi – pool Kuu ööpäeva) puhul kuju

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\theta_K}{120} \tag{4.35}$$

ja ööpäevaste lainete (T = 24,8 tundi) puhul kuju

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\theta_K}{240}, \tag{4.36}$$

kus $\Delta\theta_K$ on minutites.

Seoses sellega, et hetketasemete maksimaalsed väärtused vahemikus *BA* ei muutu lineaarselt, sooritatakse $(\Delta h_m)_n$ arvutus lähendustega rea punktide jaoks, võttes n = 0,01; ...; 0,1; 0,2; ...;1,0.

Kui arvutuste reas valemiga (4.29) saadud $(\Delta h_m)_n$ väärtus ostub suuremaks kui δ_h, siis arvutused katkestatakse ning viimasena saadud $(\Delta h_m)_n$ ja n väärtusi kasutatakse valemis (4.28).

Loodeteta merel määratakse naabertasemevaatluspostide vahekaugused sõltuvalt põhja reljeefist, ranna liigestatusest ja veetaseme kõikumisest.

Väheuuritud piirkondades, kus alaliste vaatluspostide võrk on hõre või puudub usaldusväärne nivelleerimisvõrk, määratakse naabervaatluspostide vahekaugused katseandmete põhjal, kasutades vajaduse korral modelleerimist. Avatud, suhteliselt sirge ja nõrgalt liigestatud rannajoonega piirnevates mereosades võiks naabervaatluspostide vahekauguseks võtta 80...100 km, nõrgalt liigestatud rannajoonega ning intensiivse veevahetusega madalmere osades 50...70 km, hästi liigestatud rannajoone korral, samuti jõgede suudmealadel ja väinade piirkonnas aga 30...40 km.

Arvutusnäide 4.2

Leia tasemevaatlusposti tegevusulatus loodetega meres, kui lubatud viga hetketaseme määramisel δz = 20 cm, vaatluspostide vahekaugus on 50 km ja loodelaine harmoonilised konstandid on toodud järgnevas tabelis:

	Punkt B				Punkt A			
	M_2	S_2	K_1	O_1	M_2	S_2	K_1	O_1
h (cm)	74	23	7	7	138	120	14	11
Ω	263	313	324	308	250	265	320	292

Lahenduskäik:

1. Leiame tõusulaine amplituudid R_A ja R_B ja nende suhted λ_A ja λ_B valemitega (4.31) ja (4.30).

$R_A = 138 + 120 + 14 + 11 = 283$; $R_B = 74 + 23 + 7 + 7 = 111$

$$\lambda_B = \frac{R_A}{R_B} = \frac{283}{111} = 2{,}5495; \quad \lambda_A = \frac{R_B}{R_A} = 0{,}3922$$

2. Leiame loodete liigi valemiga (4.24).

$$\chi_B = \frac{7+7}{74} = 0{,}19; \quad \chi_A = \frac{14+11}{138} = 0{,}18$$

Seega on tegemist pooleööpäevaste loodetega ja faasimuut arvutatakse valemiga (4.36).

$\Delta\varphi = 313 - 120 = 193^o$

3. Arvutame maksimaalse hetketasemete vahe tasemevaatluspostis B ja punktis, mis asub sellest suhtelisel kaugusel n, valemiga (4.28). Seda saab lahendada lähendusmeetodil, andes ette n = 0,01, 0,02 ... jne, kuni $(\Delta h_m)_n \geq \delta z$.

n	R_B = 111 cm, λ_B = 2,5495; (λ_B – 1) = 1,5495; $\Delta\varphi = 193^o$			
	K=1 + n(λ–1)	$n \times \Delta\varphi$	cos ($n \times \Delta\varphi$)	$(\Delta h_m)_n$, cm
0,01	1,0155	1,93	0,9998	2,8
0,02	1,0310	3,86	0,9977	8,4
0,03	1,0465	5,79	0,9949	12,6
0,04	1,0620	7,72	0,9909	16,9
0,05	1,0775	9,65	0,9858	21,2

4. Leiame posti B tegevusraadiuse valemiga (4.28).

$$d = S\frac{n\times\delta z}{(\Delta h_m)_n} = 50\frac{0{,}05\times 20}{21{,}2} = 2{,}3\ \text{km}$$

5. Arvutame maksimaalse hetketasemete vahe tasemevaatluspostis A ja punktis, mis asub sellest suhtelisel kaugusel *n*.

n	R_A = 283 cm; λ_A = 0,3922; (λ_A – 1) = – 0,6078; $\Delta\varphi$ = 193°			
	K = 1+ $n(\lambda$-1)	$n \times \Delta\varphi$	cos ($n \times \Delta\varphi$)	$(\Delta h_m)_n$, cm
0,01	0,9839	1,93	0,9998	7,2
0,02	0,9878	3,86	0,9977	19,4

6. Leiame posti A tegevusraadiuse.

$$d = S\frac{n\times\delta z}{(\Delta h_m)n} = 50\frac{0{,}02\times 20}{19{,}4} = 1{,}0\ \text{km}$$

4.6. Parandite leidmine sügavuste taandamisel nullsügavusele

4.6.1. Parandite leidmine loodetega meres ühe tasemevaatlusposti piirkonnas

Teades nullsügavuse väärtust *n* ja määrates tööde piirkonnas hetketaseme väärtuse *f*, võime leida mõõdetud sügavuste *f* parandid vz_f taanduseks nullsügavusele järgmiselt:

$$vz_f = n - f. \qquad (4.37)$$

Kui tasemevaatluspostide tegevusulatused omavad ühisosa, siis võib parandid vz_f arvutada iga vaatlusposti jaoks eraldi. Sel juhul võib suuruse vz_f võtta vahetult tööde perioodiks koostatud graafikult. Vaatlusandmete põhjal genereeritakse hetketasemete muutumise kõver ja nullsügavusele vastav joon. Hetketasemete ordinaatide ja nullsügavuse vahe annab igal sügavuse mõõtmise hetkel parandi vz_f.

Automatiseeritud andmetöötluse korral osutub vajalikuks hetketaseme leidmine diskreetsete lugemite määramisaegade vahepeal. Selle ülesande võib lahendada, koostades programmi lineaarse või paraboolse interpolatsiooni või kuupsplaini kohta.

Lineaarsel interpolatsioonil (see võib rahuldada loodelaine keskosa puhul)

$$f_{t+\Delta t} = f_i + \frac{\Delta t(\, f_{i+1} - f_i\,)}{\Delta T}, \tag{4.38}$$

kus ΔT on ajavahemik kahe järjestikuse standardlugemi f_i ja f_{i+1} vahel; Δt on ajavahemik, mis on möödunud standardlugemist f_i.

Loodetega merel tehakse tasemelugemid iga tunni tagant. Sel juhul on lineaarse interpolatsiooni meetodil saadud vahelmiste väärtuste $f_{t+\Delta t}$ arvutusviga

$$\Delta_\ell \approx 4{,}94\frac{R}{T^2}, \tag{4.39}$$

kus T ja R on loode periood ja amplituud. Kui Δ_ℓ ei ületa etteantud väärtust, siis võib lineaarse interpolatsiooni abil vaatlusandmeid töödelda. Vastasel juhul kasutatakse paraboolset interpoleerimist lugemite f_{i-1}, f_i, f_{i+1} ja f_{i+2} järgi:

$$f_{t+\Delta t} = f_i + b_1\Delta t + b_2\Delta t^2 + b_3\Delta t^3, \tag{4.40}$$

kus kordajad b_i leitakse alljärgnevate valemitega.

$$\left.\begin{aligned} b_1 &= -\frac{1}{6}(\,2\,f_{i-1} + 3\,f_i - 6\,f_{i+1} + f_{i+2}\,) \\ b_2 &= \frac{1}{2}(\,f_{i-1} + f_{i+1} - 2\,f_i\,) \\ b_3 &= -\frac{1}{6}(\,f_{i-1} - 3\,f_i + 3\,f_{i+1} - f_{i+2}\,) \end{aligned}\right\} \tag{4.41}$$

Paraboolse interpolatsiooni täpsust hinnatakse valemiga

$$\Delta_p = 36{,}5\frac{R}{T^4}\cdot \tag{4.42}$$

Suurema täpsuse saavutamiseks hetketasemete vahelmiste väärtuste leidmisel kasutatakse kuupsplaini[16], mille puhul kordajad b_i võrrandis (4.40) määratakse seostega:

[16] **Kuupsplain** on teatud lõigul $[a,b]$ määratud kaks korda pidevalt diferentseeruv funktsioon, mis teatava alajaotuse $a = x_0 < x_1 < \ldots < x_n = b$ korral avaldub igas vahemikus (x_k, x_{k+1}) kuup-polünoomina [Kaasik, 1992].

$$\left.\begin{aligned} b_1 &= \frac{1}{12}(8f_{i+1} - 8f_{i-1} + f_{i-2} - f_{i+2}) \\ b_2 &= \frac{1}{12}(f_{i+3} - 6f_{i+2} + 20f_{i+1} - 28f_i + 15f_{i-1} - 2f_{i-2}) \\ b_3 &= \frac{1}{12}(f_{i-2} - 7f_{i-1} + 16f_i - 16f_{i+1} + 7f_{i+2} - f_{i+3}) \end{aligned}\right\} \quad (4.43)$$

Tähtsaimad punktid veetaset iseloomustaval kõveral on kõrg- ja madalveeseisu hetkedele vastavad punktid. Nende hetkede olemasolu tunnuseks on tasememuudu märgi muutumine kõvera mingis osas. Nende osade määramisel automatiseeritud andmetöötluse korral valitakse välja sellised ajahetked t_{i-2}, t_{i-1}, t_i, t_{i+1}, t_{i+2}, mille vahel tasememuudu märk muutub. Tähistame kõrg- või madalvee saabumise aja sümboliga τ_{eks}. Selle suuruse võib määrata seosest

$$\tau_{eks} = t_i + \Delta t, \quad (4.44)$$

kus Δt on ajamuut, mis leitakse kordajate b_1, b_2, b_3 kaudu valemiga

$$\Delta t = \frac{-b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 3b_1b_3}}{3b_3}. \quad (4.45)$$

Vaadeldaval juhul peab olema täidetud tingimus $\Delta t \in (0;1)$.

Kui $\Delta t < 0$, siis kordajate b_i arvutamist korratakse, kasutades uusi f_i väärtusi, mis saadakse lugemite määramisaegade nihutamisel t_i suhtes ühe standardvahemiku võrra aja vähenemise suunas. Kui $\Delta t > 1$, siis kasutatakse f_i niisuguseid väärtusi, mis on nihutatud ühe standardvahemiku võrra aja suurenemise suunas.

Arvutusnäide 4.3

Leia madalvee moment tabelis toodud tasemelugemite alusel, kasutades kordajate leidmiseks paraboolset interpoleerimist.

f_{cm}	246	135	71	24	20	73	266
	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00
				i –1	i	i+1	i+2
			i –1	i	i + 1	i + 2	

Lahenduskäik:

1. Valime tasemelugemite indeksid vastavalt andmetabeli kolmandale reale.

2. Leiame kordajad b_i vastavalt valemeile (4.41):

$b_1 = -(2f_{i-1} + 3f_i - 6f_{i+1} + f_{i+2})/6 = -(2\times24 + 3\times20 - 6\times73 + 266)/6 = 10{,}7$

$b_2 = (f_{i-1} + f_{i+1} - 2f_i)/2 = (24 + 73 - 2 \times 20)/2 = 28{,}5$

$b_3 = -(f_{i-1} - 3f_i + 3f_{i+1} - f_{i+2})/6 = -(24 - 3 \times 20 + 3\times73 - 266)/6 = 13{,}8$

3. Leiame madalvee hetke valemitega (4.45) ja (4.44)

$$\Delta t = \frac{-b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 3b_1b_3}}{3b_3} = \frac{-28{,}5 \pm \sqrt{28{,}5^2 - 3\times10{,}7\times13{,}8}}{3\times13{,}8} .$$

Kuna Δt lahendid on mõlemad negatiivsed, nihutame t_i ühe tunni võrra vasakule (vt andmetabeli neljas rida) ja arvutame uuesti kordajad b ning Δt*:*

$b_1 = -(2 \times 71 + 3 \times 24 - 6 \times 20 + 73)/6 = -27{,}8$

$b_2 = (71 + 20 - 2 \times 24)/2 = 21{,}5$

$b_3 = -(71 - 3 \times 24 + 3 \times 20 - 73)/6 = 2{,}3$

$$\Delta t = \frac{-21{,}5 \pm \sqrt{21{,}5^2 - 3\times(-27{,}8)\times2{,}3}}{3\times2{,}3} = 0{,}58$$

$\tau_{eks} = 10.00 + 0{,}58 \times 60 = 10.35$

4. Leiame madalvee tasemelugemi valemiga (4.40):

$f_{t+\Delta t} = f_i + b_i\Delta t + b_2\Delta t^2 + b_3\Delta t^3 = 24+(-27{,}8)\times0{,}58+21{,}5\times0{,}58^2+2{,}3\times0{,}58^3 =$ 16 cm

4.6.2. Üldmõisted tasemeparandite leidmisel mitme tasemevaatlusposti järgi

Parandid võib leida mitme tasemevaatlusposti järgi.

Kui mõõtmispiirkondas on paigaldatud mitu tasemevaatlusposti ja nende tööpiirkonnad kattuvad, siis kasutatakse alati lähima vaatlusposti andmeid ja parandid arvutatakse valemitega (4.37)...(4.45).

Kui vaatluspostide tööpiirkonnad ei kattu ja pole võimalik piisaval hulgal ajutisi tasemevaatlusposte rajada, siis saab kasutada parandite arvutamiseks kas interpoleerimise või prognoosimise võtet.

Interpoleerimise printsiip põhineb järgmistel eeldustel: mitteperioodilised tasemekõikumised on harilikult ühesuguse väärtusega tervel vaadeldaval akvatooriumil, loodelaine pikkus ületab mitusada kilomeetrit ja tõusu kõrgus on harilikult vaid mõni meeter. Seega võib merepinda teatud piiratud alal vaadelda kaldtasandina. Sealjuures ei tohi loodelaine hari ega nõgu sattuda tasemevaatluspostide vahele.

Prognoosimise printsiip põhineb eeldusel, et hetketaset mõjutavad seaduspärased protsessid. Iseäranis eeldatakse, et kogu vaadeldaval akvatooriumil säilib loodekõikumiste iseloom ja suurus ning loodelaine levimiskiirus ja suund (amplituud ja faas muutuvad ühtlaselt). Seega on võimalik prognoosida hetketaset antud vaatluspunktis mingil ajamomendil, kui on teada veetaseme väärtused teatud hulgas tasemevaatluspostides neil hetkedel, mis eelnevad laine kulgemiseks vajalikule ajavahemikule.

Arvutuslikult on siiski lihtsaim viis kasutada interpoleerimise analüütilist meetodit.

4.6.3. Interpoleerimise analüütiline meetod

Nagu eelnevast selgus, võib reaalset merepinda vaadelda kaldtasandina.

Kirjutame tasandi võrrandi läbi kolme punkti ristkoordinaatides kujul

$$(X - X_1)\begin{vmatrix}(Y_2 - Y_1)(\Delta z_2 - \Delta z_1)\\(Y_3 - Y_1)(\Delta z_3 - \Delta z_1)\end{vmatrix} - (Y - Y_1)\begin{vmatrix}(X_2 - X_1)(\Delta z_2 - \Delta z_1)\\(X_3 - X_1)(\Delta z_3 - \Delta z_1)\end{vmatrix} +$$

$$+(\nu z - \nu z_1)\begin{vmatrix}(X_2 - X_1)(Y_2 - Y_1)\\(X_3 - X_1)(Y_3 - Y_1)\end{vmatrix} = 0, \qquad (4.46)$$

kus $N(X, Y)$ on kolme tasemevaatluspostiga määratud kolmnurkse piirkonna suvaline punkt; X_i, Y_i – tasemevaatluspostide koordinaadid; νz_i – tasemekõikumise parandid vaatluspostides 1, 2, 3 sügavuse mõõtmisel punktis N ajahetkel t; νz – otsitav sügavuse parand punktis N.

Eeldame, et vaatluspostide koordinaadid X_i, Y_i on teada. Parandid νz_i leitakse valemiga (4.37). Punkti N koordinaadid X, Y määratakse mõõtmistega. Järelikult on võrrandis (4.46) tundmatu vaid parand νz.

Tähistades võrrandis (4.46) $(X_i - X_1) = \Delta X_i$, $(Y_i - Y_1) = \Delta Y_i$; $\nu z_i - \nu z_1 = \delta z_i$, saame

$$\Delta X\begin{vmatrix}\Delta Y_2 & \delta z_2\\ \Delta Y_3 & \delta z_3\end{vmatrix} - \Delta Y\begin{vmatrix}\Delta X_2 & \delta z_2\\ \Delta X_3 & \delta z_3\end{vmatrix} + \delta z\begin{vmatrix}\Delta X_2 & \Delta Y_3\\ \Delta X_3 & \Delta Y_3\end{vmatrix} = 0 \cdot \qquad (4.47)$$

Lahendades viimase võrrandi δz suhtes ja arvestades, et $\delta z = \nu z - \nu z_1$, saame lõpuks töövõrrandi

$$\nu z = \nu z_1 + \frac{\Delta Y(\Delta X_2 \delta z_3 - \Delta X_3 \delta z_2) - \Delta X(\Delta Y_2 \delta z_3 - \Delta Y_3 \delta z_2)}{\Delta X_2 \Delta Y_3 - \Delta X_3 \Delta Y_2}. \quad (4.48)$$

Kui piirkonnas on üle kolme vaatlusposti, siis jaotatakse kogu kontuur kolmnurkadeks ja igale kolmnurgale, mis sisaldab punkti *N*, arvutatakse parand νz valemiga (4.48). Parandi kõige tõenäolisem väärtus $\nu\bar{z}$ leitakse aritmeetilise keskmisena või kui kaalutud keskmine valemiga (4.49)

$$\nu \bar{z} = \frac{\nu z' + \nu z'' + \ldots + \nu z^n}{n}. \quad (4.49)$$

4.7. Parandite leidmine sügavuste taandamisel nullsügavusele loodeteta meres

Kui tegemist on loodeteta merega, siis juhul, kui üheajaliste hetketasemete ja keskmiste tasemete vahede erinevuste maksimaalväärtus $\Delta z_{fi} - \Delta z_{fk} = \Delta H_{max}$ naabervaatluspostides kogu hüdrograafiliste tööde kestel ei ületa sügavuse mõõtmise nõutavat täpsust ε_z, loetakse seda merd tasemevaatluspostidega kindlustatuks ja mõõdetud sügavuste parandid νz_f teisendatakse nullsügavusele lähima vaatlusposti järgi:

$$\nu z_f = m - f, \quad (4.50)$$

kus $\pm m$ on selle vaatlusposti keskmisele tasemele vastav lugem; f – tasemelugem sügavuse mõõtmise hetkel.

Kui maksimaalne tasemete vahe ΔH_{max} ületab sügavuse mõõtmise täpsuse ε_z, siis sügavuste parandid määratakse osapiirkondade kaupa. Nende arv leitakse valemiga (4.51):

$$k = 2\frac{\Delta H_{max}}{\varepsilon_z}. \quad (4.51)$$

Suuruse ΔH_{max} määramisel võetakse arvesse need tasemevaatlused, mis on tehtud stabiilsetes hüdrometeoroloogilistes tingimustes, kui tuule tugevus ei ületa 4 palli.

Sügavusparandeid suvalises piirkonnas *i* teatud standardmomendil võib arvutada valemiga

$$\nu z_f = \nu z_A + (\nu z_B - \nu z_A)\frac{i}{k}, \quad (4.52)$$

kus νz_A ja νz_B on sügavusparandid tasemevaatluspostides A ja B samal standardmomendil.

Sügavuspiirkonnad numereeritakse järgmiselt. Tasemevaatlusposti A osapiirkond loetakse null-osapiirkonnaks. Järgmised osapiirkonnad saavad numbrid alates ühest ja viimase numbri ($i = k$) saab posti B osapiirkond. Näiteks kui $k = 2$ võivad esineda osapiirkonnad A = 0, 1 ja B = 2.

Arvutusnäide 4.4

Lubatav sügavuse mõõtmise viga ε_z = 0,28 m. Vaatluspostide A ja B keskmistele tasemetele vastavad lugemid m_A = 4,17 m ja m_B = 5,30 m. Hetketasemete lugemid ja ajad tasemevaatluspostides on toodud alljärgneva tabeli esimeses kolmes reas (viimased kaks rida on arvutatud). Leidke osapiirkondade arv ja sügavusparandid neis kell 6.00.

TVP/aeg	0.00	6.00	12.00	18.00
$f_{TVP,A}$	4,30	4,42	4,63	4,50
$f_{TVP,B}$	5,32	5,35	5,33	5,30
$vz_{fA} = m_A - f_A$	– 0,13	– 0,25	– 0,46	– 0,33
$vz_{fB} = m_B - f_B$	– 0,02	– 0,05	– 0,05	0,00

Lahenduskäik:

1. Sügavusparandid kõigil standardmomentidel on arvutatud ülaltoodud tabeli kahes viimases reas.
2. Naabervaatluspostide sügavusparandite maksimaalne erinevus

   – 0,46 – (0,05) = 0,41 m on kell 12.00.
3. Kuivõrd 0,41 > 0,28, tuleb leida osapiirkondade arv (valem 4.51)

   $$k = 2\frac{\Delta H_{max}}{\varepsilon_z} = 2\frac{0{,}41}{0{,}28} = 2{,}9 \approx 3,$$

   seega osapiirkonnad on A(0), 1, 2, 3(B).
4. Leiame sügavusparandid osapiirkondades kell 6.00. Vastavalt tabeli neljandale ja viiendale reale $vz_{fA,6.00}$ = – 0,25 m ja $vz_{fB,6.00}$ = – 0,05 m.

   Osapiirkondade 1 ja 2 sügavusparandid leiame valemiga (4.52):

$$vz_{f1} = vz_A + (vz_B - vz_A)\frac{1}{3} = -0{,}25 + (-0{,}05 - (-0{,}25))\frac{1}{3} = -0{,}18\ m$$

$$vz_{f2} = -0{,}25 + (-0{,}05 - (-0{,}25))\frac{2}{3} = -0{,}12 m$$

4.8. Kajaloodi kõrguse saamine RTK GNSSi abil

Sügavusparandi saamine meretaseme vaatluste abil, eriti siis, kui vajatakse täpsemaid mõõtmistulemusi, võib sageli olla komplitseeritud, sest alalised tasemevaatluspostid võivad asetseda mõõdistuspiirkonnast kaugel ning täiendavate või ajutiste postide rajamine on seotud teatud kulutustega ja enam või vähem pikaajaliste vaatlustega.

Sellisel juhul on otstarbekas lisaks kohamäärangule teha ka kõrgusmäärang RTK GNSSi abil. Probleeme võib tekitada vaid asjaolu, et satelliitgeodeesia meetoditega saadakse kõrgus ellipsoidist (geodeetiline kõrgus), aga kõrgused kaartidel antakse geoidist või kvaasigeoidist lähtudes (st kasutatakse vastavalt ortomeetrilisi või normaalkõrgusi, kuid õnneks merepinna puhul neil vahet ei ole). Seega peab teadma geoidi undulatsiooni või kõrgusanomaaliat (kvaasigeoidi kõrgust ellipsoidist). Üldjuhul peaks EST-GEOID 2011 mudel olema salvestatud kasutatavas GPS-vastuvõtjas, sest erinevus ellipsoidi EUREF-EST 97 ja EST-GEOID 2011 vahel, st kõrgusanomaalia, ulatub 16 m Narvas kuni 20,5 m Saaremaal, nii et seda tuleb igal juhul rakendada.

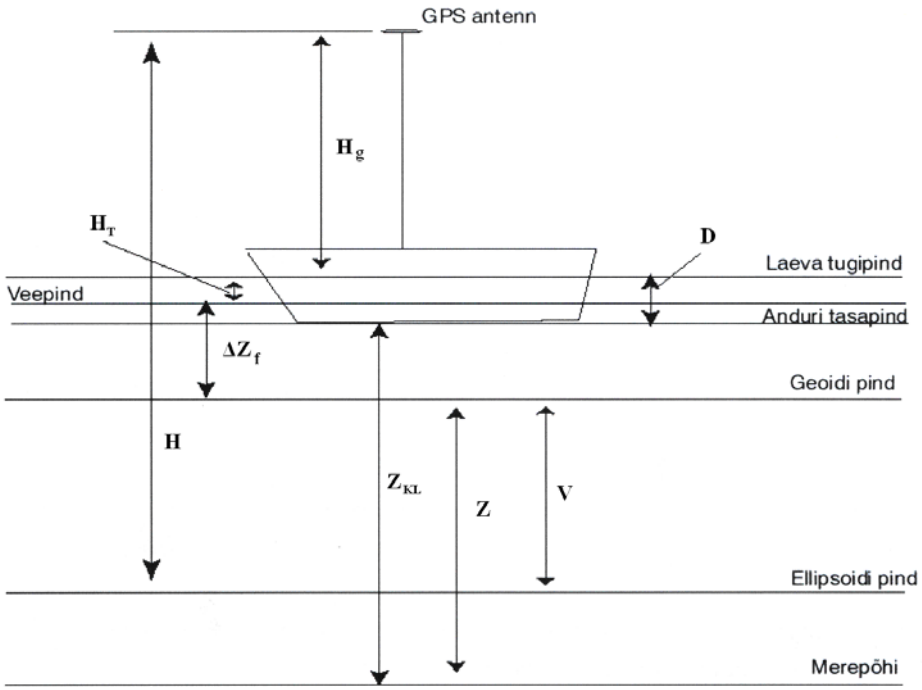
Kui GPS-antenni kõrgus geoidist teatud momendil on vaatlustega määratud, tuleb sellest lahutada GPS-antenni ja kajaloodi antenni vaheline vertikaalkaugus, mis annab kajaloodi antenni kõrguse geoidi suhtes (üldjuhul geoidi pinnast allpool).

Kui mingi piirkonna kohta peaks geoidi mudel puuduma, siis on võimalik leida lokaalset kõrgusanomaaliat N või geoidi kõrgust (undulatsiooni) olemasoleva lähedase reeperi (soovitavalt rohkem kui ühe) järgi, paigutades GPS-antenni selle kohale ja mõõtes geodeetilise kõrguse h. Kõrgusanomaalia leitakse valemist

$$N = h - (H_{\mathrm{Rp}} + i), \tag{4.53}$$

kus H_{Rp} on reeperi kõrgus; i – GPS-antenni kõrgus reeperist.

Algtundmatute lahendamine tuleb sooritada parimatel tingimustel, st maksimaalse (vähemalt viie) satelliidi nähtavusel ja minimaalse (mitte üle 6) DOP kordaja puhul, sest selle lahenduse vead mõjutavad kõiki edasisi mõõtmisi. Seinareeperi kasutamisel tuleb rajada selle ligidale, avatud taevaga kohta abireeper, mille kõrgus määratakse seinareeperilt. Seejärel tsentreerida sellel GPS-antenn ning mõõta antenni kõrgus abireeperist.



Joonis 4.11. Mere sügavuse leidmine RTK GPSi ja kajaloodi abil. V – geoidi kõrgus (täpsemalt kõrgusanomaalia); Z – mere sügavus; Z_{KL} – kajaloodiga mõõdetud sügavus; H – RTK GPS-antenni mõõdetud kõrgus ellipsoidist; ΔZ_f – vee hetketaseme kõrgus (geoidi pinnast); D – laeva taustsüsteemi nulltaseme kõrgus kajaloodi antenni pinnast; H_T – laeva taustsüsteemi nulltaseme kõrgus veepinnast (oleneb laeva õõtsumisest, lastist ja liikumisest tekkinud täiendavast süvisest); H_g – GPS-antenni kõrgus laeva taustsüsteemi nulltasemest [Vahter, 2001]

Arvestades joonist 4.11 leitakse mere sügavus valemiga

$$Z = Z_{KL} + D + H_g - (H - V). \qquad (4.54)$$

Kolmas osa

HÜDROGRAAFILINE MÕÕDISTAMINE JA MÕÕTEMÄÄRAMATUS

5. KOHAMÄÄRANGU MEETODID HÜDROGRAAFILISTEL TÖÖDEL

5.1. Kohamäärangu teoreetilised alused

5.1.1. Kohamäärangu põhinõuded

Hüdrograafilisi mõõdistustöid tehakse põhiliselt laevadel ja kaatritel, aga ka helikopterite ning lennukite abil või süvaveeaparatuuriga.

Selleks et saadud informatsiooni üle kanda fikseeritud punktidesse (vee pinnal või vee all), tuleb kohamääranguks valida sellised meetodid, mis vastaksid järgmistele põhinõuetele:

- vajalikke mõõtmisi peab olema võimalik sooritada (enamasti) liikuvalt aluselt;
- mõõtmised tuleb teha kiiresti, sest mõõdistusaluse tegelikku teekonda on vaja määrata pidevalt;
- mõõteriistade tööulatus peab kindlustama kohamäärangu kogu mõõtmispiirkonnas;
- mõõdistatava piirkonna kõigi vajalike objektide õigeks kaardile kandmiseks peab kohamäärang olema piisavalt täpne.

Vahendite ja meetodite otstarbekust hinnatakse selle järgi, kuivõrd nad rahuldavad mainitud põhitingimusi. Lisaks tuleb arvestada ka meetodi lihtsust, usaldatavust ja maksumust.

Kohamäärangu täpsus antakse harilikult ette lubatava keskmise ruuthälbega, mõõtmiste üksikasjalikkus aga punktide vahekaugustega. Seadmete tegevusulatuse valik sõltub mõõdistatava piirkonna suurusest.

Konkreetsed nõuded kohamäärangu täpsuse ja üksikasjalikkuse osas olenevad paljudest tingimustest, eelkõige aga mõõtmiste ülesannetest ja eesmärkidest.

Süvaveealade (sügavus üle 1000 m) mõõdistamisel on kohamäärangu täpsus 100 m navigatsiooni tarbeks täiesti aktsepteeritav [IHO, 2008]. Enamiku detailuuringute korral (nt sadamaalad) peab olema tagatud paarimeetrine täpsus ning vahel tuleb teha isegi täpsemaid mõõtmisi. Mida täpsem peab olema kohamäärang, seda suurem on mõõtmistööde ajakulu ning maksumus. Seetõttu on tarvis leida kohamäärangu lubatava hälbe piir, mis praktiliselt ei halvendaks mõõtmiste kvaliteeti.

Süstemaatiliste hüdrograafiliste uuringute lubatav mõõtmismääramatus on fikseeritud IHO standardis nr 44 2008. a (lk 208), kusjuures mõõtmismääramatus oleneb põhiliselt uuritava ala navigatsioonilisest tähtsusest, sügavusest ja põhja iseloomust. Kui varem seostus kohamäärangu nõutav täpsus kaardi mõõtkava ja joonestusvõimaluste piiratusega, siis tänapäeval võimaldab digitaalne andmetöötlus esitada andmeid suvalises mõõtkavas. Seega peavad kaasaegsed mõõdistustööd rahuldama kõiki kasutatavaid kaartide ja plaanide mõõtkavasid (kuni sadamate plaanideni mõõtkavas 1:2000 – EVA, Regio, 1996), kusjuures mõõdistamise täpsusklasse nähakse ette neli (IHO, 2008).

5.1.2. Kohamäärangu viisid ja vahendid

Hüdrograafid kasutavad koordinaatide määramiseks mitmesuguseid viise. Konkreetse meetodi valikul lähtutakse ülesandest ja olukorrast, vajalikust täpsusest ning olemasolevast aparatuurist.

Kõik tänapäeva hüdrograafilistes uuringutes kasutatavad kohamääramise meetodid võib tinglikult jagada viide rühma:

- vahetu vaatlus;
- raadiotehnilised meetodid;
- astronoomilised meetodid;
- hüdroakustilised meetodid;
- satelliitkohamäärang.

Vahetu vaatluse korral peavad ranna tugipunktid või mõõdistusalus olema nähtavad, sest mõõtmisi tehakse optikariistade abil. Selle rühma meetoditest kasutatakse kõige enam polaarmeetodit, nurgalist ja joonelist otselõiget.

Otselõige sooritatakse koordineeritud lähtepunktidest, kusjuures elektrontahhümeetritega mõõdetakse üheaegselt kaks (soovitavalt kolm) suunda või kaks (soovitavalt kolm) kaugust laeva reflektorile.

Navigatsioonis võib erandjuhul kasutada ka vastulõiget, sel juhul mõõdetakse sekstandiga üheaegselt kaks nurka navigatsiooniorientiiride suundade vahel, koha-

määrangu viga (tõenäosusega 95%) ulatub isegi kogenud vaatlejal ligikaudu 6...8 m/10 km.

Polaarmeetodi puhul mõõdetakse ranna tugipunktis elektrontahhümeetri abil laeva asukoht veaga 0,3...1,0 m/2 km tõenäosusega 95% [IHO, 2011].

Kõigile vahetu vaatluse meetoditele seavad piirangud meteoroloogilised tingimused ja Maa kumerus. Viimase suurus 10 km kaugusel ulatub peaaegu 8 meetrini [Tšebotarjov, 1959], kuid 2 km kaugusel on see veel kõigest 0,6 m.

Nagu eeltoodust selgub, saab vahetu vaatlusega sooritada kohamäärangut ainult hea nähtavuse korral ning siis, kui tööde piirkond jääb ranna lähedale. Tänapäeva hüdrograafias võiks kasutada polaarmeetodit, kui satelliitgeodeesia pole mingil põhjusel võimalik või otstarbekas.

Raadionavigatsioonisüsteemid (RNS). Siia kuulusid üleilmsed raadionavigatsioonisüsteemid Decca (lõpetas tegevuse 2000. a), Omega (Venemaa Alfa) ja Loran-C (Venemaa Tšaika). Neist viimased lõpetasid töö 2008. a [De Jong, 2010]. Loran-C töökaugus tugijaamadest oli kuni 200 km. Omega täpsus oli erinevatel andmetel 0,2...2 km, Loran-C puhul 10...180 m [Ingham, 1992, Rüdja, 2013]. Individuaalsete süsteemide (Trisponder, Syledis, Artemis) kasutamine ei ole välistatud ka tänapäeval vastava aparatuuri olemasolul. Nende tööraadius oli keskmiselt 30 km, kaugusemõõtmise standardhälve 1 m ja nurgamõõtmise standardhälve 1’. (Vaata selle kohta ka Laigna, Kala, 1994.)

Satelliitgeodeesia (GNSS) on üleilmne ööpäeva ringi toimiv kohamäärangu süsteem, mis seisneb kauguste mõõtmises nelja või rohkema spetsiaalse satelliidini, mille **efemeriidid**[17] on igal ajahetkel teada. Nii saab ruumilise trilateratsiooni meetodil arvutada (see toimub vastuvõtjas automaatselt) vastuvõtja antenni asukoha. GNSSi alla kuuluvad mitmed süsteemid (GPS, GLONASS, GALILEO jne). Madalaima täpsusega (standardhälve üldjuhul 3 m) on nn absoluutne kohamäärang. Tunduvalt kõrgema täpsusega on diferentsiaalne kohamäärang DGNSS, mille kvaliteetseadmetega on võimalik saavutada täpsus alla meetri. See nõuab aga teatud tugijaama olemasolu (Läänemere ümber on mitu riiklikku tugijaama, millest vastuvõtja ei tohiks üldjuhul liikuda kaugemale kui 200 km). Hüdrograafilistel mõõtmistel võib rakendada ka kodeeritud signaali kandevsageduse interferomeetrilist mõõtmist kasutavat nn reaalaja kinemaatilise RTK GNSS-meetodit, mille eelisteks on kõrge täpsus (standardhälve on ideaaljuhul 2...3 sentimeetrit, kusjuures saab määrata ka antenni kõrguse standardhälbega 4...6 cm) ja asjaolu, et individuaalse tugijaama võib paigutada igasse küllaldase täpsusega koordineeritud punkti. RTK individuaaltugijaamade koordinaate võib määrata samuti signaali kandevsageduste interferomeetrilist mõõtmist kasutava staatilise GNSS-meetodi abil. Vajadus individuaaltugijaama järel on aga võrdlemisi väike, sest Eesti rannaalad on kaetud HadNET RTK GNSSi tugijaamade võrguga. Samuti on võimalik kasutada ülemaailmseid kommertstugisüsteeme.

[17] Efemeriidid – satelliitide orbiitide parameetrid, ligikaudseid efemeriide nimetatakse almanahh-andmeteks.

Astronoomilised meetodid kasutavad kohamääranguks astronoomilisi mõõtmisi. Need on võrdlemisi ebatäpsed (laeval sooritatud mõõtmiste täpsus on üldjuhul 1...2 NM) ja siinkohal neil pikemalt ei peatuta.

Asukoha määramise **hüdroakustilised meetodid** põhinevad helivõnkumiste levimise seaduspärasustel merevees. Nii laevadele kui ka mere põhja võib paigaldada hüdroakustilised vastuvõtu-kiirgusseadmed. Kiirgurid ehk antennid muundavad elektrivõnkumised kõrgsageduslikeks mehaanilisteks võnkumisteks, mis omakorda tekitavad ultrahelilaineid merevees. Peale peegeldumist registreerib neid võnkumisi vastuvõtu-aparatuur. Vastuvõtjates toimub vastupidine protsess: mehaanilised võnkumised muundatakse elektrilisteks.

Kiirgavate ja vastuvõtvate seadmete kogum moodustab hüdroakustilise navigatsioonisüsteemi. Põhiline mõõdetav parameeter on aeg *t*, mis kannab endas informatsiooni geomeetriliste parameetrite (kaugus, suund, kaugusvahe) kohta.

Hüdroakustilised süsteemid jaotatakse kolme rühma: kaugusmõõdu-asimuudilised süsteemid; kaugusmõõdusüsteemid; kaugusvahede mõõtmise süsteemid.

Kaugusmõõdu-asimuudilise süsteemi abil mõõdetakse hüdrograafialaevadel hüdroakustilise majaka kaugus ja suund. Selle süsteemi puhul on võimalik teha kohamäärang ainult ühe majaka järgi, mis on vaieldamatu eelis. Teisalt aga piirab süsteemi kasutamist hüdrograafias suuna mõõtmise madal täpsus.

Kaugusmõõdusüsteemid võimaldavad sooritada kohamäärangu kahe või enama majaka kauguse samaaegse mõõtmisega. Need süsteemid on levinud teatud vesiehitiste rajamisel, sest on küllaltki kõrge täpsusega.

Kaugusvahesid mõõtvad süsteemid kasutavad kolme ja enamat vaatlusmajakat. Samal ajal mõõdetakse vähemalt kahte kaugusvahet majakast laevani või laevast majakani. Ka need süsteemid on kõrge täpsusega.

Meetodite puuduseks on üldjuhul väike tegevuskaugus.

5.2. Kohamäärangu andmetöötluse analüütiline meetod

5.2.1. Üldised alused

Kohamäärangu andmetöötluse analüütiline meetod põhineb analüütilise geomeetria põhitõdedel. Kohamäärangul mõõdetud suurusi nimetatakse hüdrograafias **navigatsiooniparameetriteks**. Selleks et arvutuskäigus ei tekiks vigu, peaks mõõtmiste arvutuste (sh valemite) täpsus olema ühe suurusjärgu võrra kõrgem mõõdistamistulemuste nõutavast täpsusest.

Kohamäärangul mõõdetakse sageli ainult suundi (direktsiooninurgad α, asimuudid *A*) ja kaugusi (*s*), mis kujutavad endast punkti polaarkoordinaate.

Nende koordinaatide kasutamine on enamasti seotud võrrandite mahukate teisendustega, seepärast kasutatakse kohamäärangul võtet, mis seisneb polaarkoordinaatide teisendamises ristkoordinaatideks lihtsate valemite abil:

$$\left.\begin{aligned} x &= x_0 + s\cos\alpha \\ y &= y_0 + s\sin\alpha \end{aligned}\right\}, \tag{5.1}$$

kus x_0 ja y_0 on lähtepunkti ristkoordinaadid.

Ranged arvutusvalemid hüdrograafia kohamääranguülesannete lahendamiseks ellipsoidil on võrdlemisi keerulised. Seepärast, sõltuvalt koordinaatide nõutavast täpsusest ja hälvetest navigatsiooniparameetrite mõõtmisel ning lähtudes asjaolust, et ka algparameetrites on tegemist mõõtmismääramatusega, kasutatakse sageli lihtsustatud valemeid.

Kui tegemist on väikeste aladega, võib neid vaadelda tasandilistena ja lahendada ülesanded lihtsate kahemõõtmelise analüütilise geomeetria valemitega.

Kaugusi, mille puhul Maa pinda võib vaadelda tasandina, nimetatakse tinglikult väikesteks kaugusteks.

Kui taandusülesande lahendamisel tasandil osutub määramatus lubatust suuremaks, peab ülesande lahendama sfääril.

Kui kaugus *s* ja asimuut *A* mõõdetakse sfääril, on samuti lihtne minna üle polaarkoordinaatidelt sfäärilistele. Tähistame lähtepunkti koordinaadid ϕ_1 ja Λ_1, määratava punkti koordinaadid ϕ_2 ja Λ_2, teisendame mõõdetud kauguse sfääriliseks ja lahendame geodeesia otseülesande sfääril.

$$\left.\begin{aligned} \sin\phi_2 &= \cos\sigma\sin\phi_1 + \sin\sigma\cos\phi_1\cos A \\ \sin\Delta\Lambda &= \frac{\sin\sigma}{\cos\phi_2}\sin A \\ \Lambda_2 &= \Lambda_1 + \Delta\Lambda \end{aligned}\right\}, \tag{5.2}$$

kus kaarepikkus $\sigma = \frac{s\rho}{R}$; *R* on Maa raadius ja ρ– radiaani väärtus, *s* – sama joone pikkus meetrites.

Geodeesia pöördülesande sfääril saab lahendada järgmiste valemitega:

$$\left.\begin{aligned} \cos\sigma &= \sin\phi_1\sin\phi_2 + \cos\phi_1\cos\phi_2\cos(\Lambda_2 - \Lambda_1) \\ \sin A_1 &= \frac{1}{\sin\sigma}\left[\sin(\Lambda_2 - \Lambda_1)\cos\phi_2\right] \\ \sin A_2 &= \frac{1}{\sin\sigma}\left[\sin(\Lambda_2 - \Lambda_1)\cos\phi_1\right] \end{aligned}\right\}, \tag{5.3}$$

kus ϕ_1, Λ_1 ja ϕ_2, Λ_2 on geodeetiliste joonte otspunktide geograafilised koordinaadid; A_1 – geodeetilise joone asimuudi rumbiline väärtus lähtepunktis, A_2 – vastuasimuudi rumbiline väärtus lõpp-punktis; s – arvutatud kaugus (m); σ – sfääri kaare väärtus; a - ellipsoidi pikem pooltelg (m).

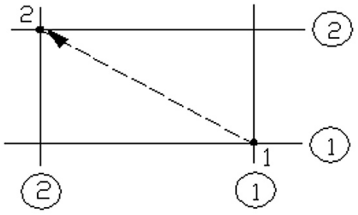
Tõelise otseasimuudi saab II ja III veerandis $180^o - A_1$ ning neljandas veerandis $360^o + A_1$. Vastuasimuut on otseasimuudi I ja IV veerandis $180^o + A_2$ ja II ning III veerandis $360^o - A_2$.

Veerand tuleb enne graafiliselt määrata. (Programmeerimise algoritmides määratakse veerand vahede $\Phi_2 - \Phi_1$ ja $\Lambda_2 - \Lambda_1$ kombinatsioonidest.)

Arvutusnäide 5.1

Kaare otspunktide koordinaadid $\phi_1 = 59^o$, $\phi_2 = 59^o46'32{,}91''$, $\Lambda_1 = 24^o$, $\Lambda_2 = 23^o06'24{,}26''$. Maa raadius on 6388000 m. Määra punktide 1 ja 2 vahelise kaare pikkus ja arvuta nende punktide vahelise joone asimuut ja vastuasimuut.

Lahenduskäik: Kasutame valemeid (5.3), kuid enne määrame asimuudi veerandi ligikaudse skeemi abil.



Kanname skeemile punktide 1 ja 2 meridiaanide ja paralleelide orienteeruvad omavahelised suhtelised asendijooned (nende numbrid on ringikestes). Nende ristumispunktides saame punktid 1 ja 2. Ühendades punktid 1 ja 2 joonega, ilmneb et $A_{1.2}$ on IV veerandis.

$\cos\sigma = \sin 59^o \sin 59^o 46'32{,}91'' + \cos 59^o \cos 59^o 46'32{,}91'' = 0{,}999876823$

$$\sigma = 0{,}899306122^o \text{ ehk } s = \frac{\sigma R}{\rho} = \frac{0{,}899306122 \times 6388000}{57{,}2957795} = 100265{,}107\ m$$

Nurkade väärtused on nüüd ja edaspidi täpsuse suurendamiseks viidud vahearvutustes detsimaalsüsteemi.

$$\sin A_1' = \frac{\sin(23{,}10674139° - 24°)\cos 59{,}77580927°}{\sin 0{,}899306122°} = -0{,}499999998$$

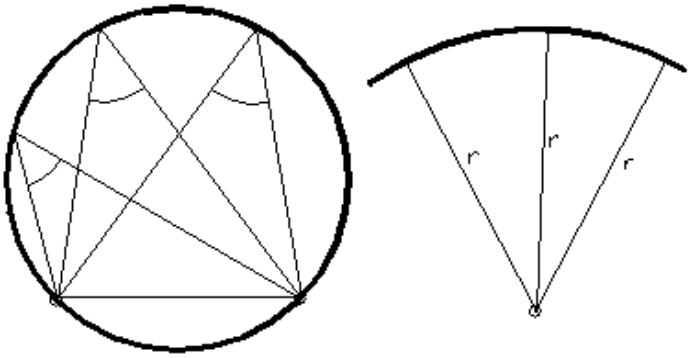
$A_1 = -29{,}99999987^o + 360^o = 330{,}0000001^o = 330^o00'00{,}0''$

$$\sin A_2' = \frac{\sin(23{,}10674139° - 24°)\cos 59°}{\sin 0{,}899306122°} = -0{,}511574910$$

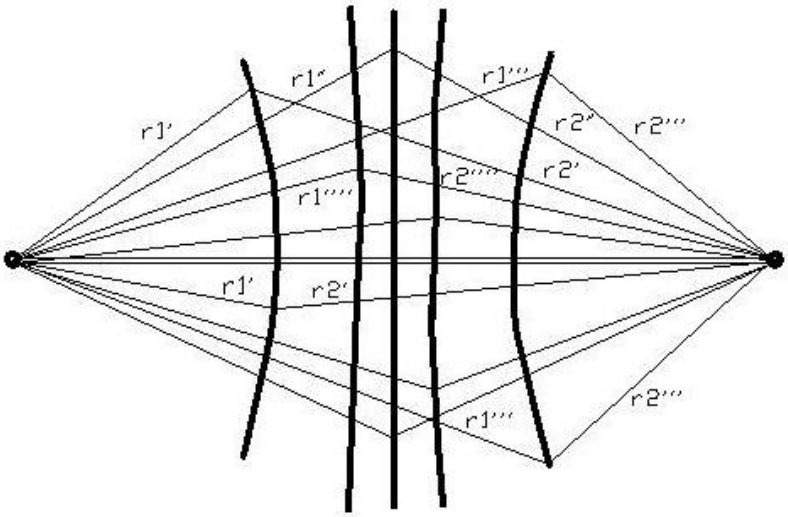
$A_2 = -30{,}76879076 + 180 = 149{,}2312093^o = 149^o13'52{,}4''$

5.2.2. Samajooned

Hüdrograafiliste mõõtmistega kaasnevad üldjuhul alati kohamäärangud. Kõik need põhinevad mingite suuruste mõõtmisel, mis on koordinaatidega seotud teatud funktsioonide abil. Nende funktsioonide arvutatud või mõõdetud väärtustele (navigatsiooniparameetritele) vastavad teatavad **samajooned**, st mõõdetud parameetri konstantsele väärtusele vastavate punktide geomeetrilised kohad. **Samajoonte lõikepunkt määrab mõõdistatud punkti asukoha**. Samajoonte võrkudega navigatsioonikaarte koostati ja kasutati üleilmsete RNS Omega ja Loran-S puhul. Tänapäeval on samajooni vaja mõnikord kohamäärangul hüdroakustiliste meetoditega. Vaatleme mõnd samajoont lühidalt joonistel 5.1 ja 5.2.



Joonis 5.1. Vasakul on samanurgajoon ehk **isogoon** (kõik kolm ringjoonele ja sellelesamale kõõlule toetuvat nurka on võrdsed) ja paremal samakaugusjoon ehk **stadiomeetriline samajoon** (ringjoone punktid on keskmest võrdsel kaugusel). Seega, isogoon ja samakaugusjoon on ringjooned



Joonis 5.2. **Kaugusvahede samajooned** (hüperboolid). Iga joone suvalise punkti kauguste erinevus lähtepunktidest on võrdne, näiteks parempoolseimal kõveral kehtib igal pool võrdus $r1''' - r2''' = const$

Erinevalt paljudest mittelõikuvatest samajoontest (nt isobaat, isohüps, isoterm, isobaar) ei kujuta siin käsitletud samajooned pinnamoodi ja nende kasutamise efekt tuleneb nimelt lõikumistest.

5.3. Kohamäärangu täpsuse hindamine

Viga on mõõtmistulemuse ja mõõdetava suuruse tõelise väärtuse vahe. Enamikul juhtudel aga tõelist väärtust ei teata (geodeesias ja ka hüdrograafias esineb siiski juhuseid, kus tõeline väärtus või leppeline tõeline väärtus on teada). Seetõttu on tänapäeval hakatud kasutama mõõtetäpsuse hinnanguna **mõõtemääramatust**, mis on hinnanguline väärtus selle vahemiku ulatusele mõõtmistulemuste ümber, kuhu mõõdetava suuruse tõeline väärtus etteantud tõenäosusega sattuda võiks (varem nimetati seda ka usalduspiirkonnaks).

Kohamäärangu täpsuse hindamise viise ja nende teoreetilisi aluseid käsitletakse täpsemalt mõõtmistulemuste matemaatilise töötlemise õpikuis (nt Kala, 2009). Siinkohal vaadeldakse selle kursuse olulisemaid momente.

Mõõtmistega kaasnevad hälbed liigitatakse jämedateks, süstemaatilisteks ja juhuslikeks hälveteks.

Jämedad hälbed on põhjustatud vaatleja eksimustest, instrumendi riketest ja mõõtmistingimuste järsust muutusest. Sellised hälbed ületavad mõõtmistolerantsi ja mõõtmistulemusi ei saa andmetöötluseks kasutada.

Süstemaatilisteks hälveteks (ξ) nimetatakse hälbeid, mis ühe ja sama suuruse korduval mõõtmisel ei muutu või muutuvad kindla seaduspärasuse järgi. Nende keskväärtus erineb nullist oluliselt. Süstemaatiliste hälvete mõju saab suurel määral kõrvaldada mõõtmistulemuste analüüsi ja sellele järgneva parandite kasutamisega.

Juhuslikeks hälveteks (δ) nimetatakse elementaarseid hälbeid, mis muutuvad ühe ja sama suuruse korduval mõõtmisel juhuslikult. Nende keskväärtuse erinevus nullist on tühine. Absoluutväärtuselt võrdsed positiivsed ja negatiivsed juhuslikud hälbed on võrdvõimalikud, kuid mida suurem on juhuslik hälve, seda väiksem on selle esinemise tõenäosus. Antud mõõtmistingimustel (instrument, vaatleja, objekt, välistingimused) ei ületa juhuslikud hälbed antud tõenäosusega teatud piirväärtust. Kui juhuslikel hälvetel on loetletud tunnused, siis võib väita, et need alluvad normaaljaotusele. Üldjuhul, kui hälbed on tingitud paljudest teguritest, alluvad need **normaaljaotusele**[18].

Elementaarseid juhuslikke hälbeid pole sageli võimalik otseselt määrata, kuid nende kogumõju võib leida teatud statistiliste arvutuste abil.

Matemaatilise statistika meetoditega saab usaldusväärse hinnangu mõõtemääramatusele anda peamiselt siis, kui üht ja sama suurust mõõdetakse palju kordi. Asukoha määrangul sooritatakse mõõtmised reeglina aga liikuvatelt alustelt ja seetõttu pole enamasti võimalik neid täpselt korrata. Siiski saab küllaltki usaldusväärse täpsushinnangu võrdtäpsete kaksikmõõtmiste vahede meetodil. Eeldatava täpsuse saab prognoosida ka aprioorsete hinnangute abil. Selleks uuritakse enne tööde algust mõõtmismetoodikat tingimustes, mis vastavad tulevasele mõõtmispiirkonnale, et selgitada välja süstemaatilised hälbed ning saada juhuslike hälvete hinnang vaatlusridade abil. Hiljem kasutatakse neid hinnanguid tööde piirkonnast saadud mõõtmistulemuste töötlemisel.

Et aprioorne hinnang antakse statistiliste materjalide (tegelikult ka kordusmõõtmiste) põhjal, mis pole saadud mõõtmispiirkonnast, siis ei pruugi see kajastada tegelikke mõõtmisi adekvaatselt. Seetõttu tuleb aprioorseid hinnanguid täpsustada mõõtmiste käigus.

Tuleb arvestada ka asjaolu, et mitte alati ei allu mõõtmishälvete jaotus normaaljaotusele. Kõrvalekaldumine on tingitud tavaliselt mõõtmiste (st kontrollmõõtmiste) väikesest arvust, sest statistilised seaduspärasused avalduvad adekvaatselt vaid suurte arvude puhul. Sel juhul kasutatakse normaaljaotuse asemel ***t***- ehk **Studenti** jaotust või χ^2-**jaotust**.

Järgnevalt esitatakse kokkuvõtlikult hüdrograafias kasutatavad mõõtmishälvete määratlused ja valemid.

---

[18] Juhuslik suurus allub **normaaljaotusele** (Gaussi jaotusele), kui ta on mõjutatud paljude erinevate faktorite poolt, kusjuures iga üksiku faktori mõju juhuslikule suurusele on tühine ning domineerivad faktorid puuduvad.

Absoluutne mõõtmishälve on hälve, mida väljendatakse mõõdetava suuruse mõõtühikutes. Mõõtmishälve Δ koosneb süstemaatilisest hälbest ξ ja juhuslikust hälbest δ.

$$\Delta = \delta + \xi \tag{5.4}$$

Parandiks v nimetatakse vahet mõõdetud suuruse **tõenäoseima väärtuse** $\overline{U}$ ja **mõõdetud väärtuse** U_i vahel.

$$v_i = \overline{U} - U_i \tag{5.5}$$

Parand on tõenäoseima hälbe vastandväärtus.

Suuruse tõenäoseima väärtuse hinnanguks võrdtäpsete mõõtmiste korral on tulemuste aritmeetiline keskmine:

$$\overline{U} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} U_i \,, \tag{5.6}$$

erineva täpsusega mõõtmiste korral aga kaalutud keskmine ehk **keskväärtus**:

$$\overline{U} = \frac{\sum p_i U_i}{\sum p_i} \,, \tag{5.7}$$

kus $p_i = \dfrac{1}{m_i^2}$ on mõõtmiste kompleksi kuulunud ühe teatud mõõtmise kaal.

Mõõtmistäpsuse hinnanguna hüdrograafias kasutatakse mõõtmistulemuste **standardhälvet**[19] σ, mida võib nimetada ka **keskmiseks ruuthälbeks (KRH)** ja mis leitakse valemiga (5.8):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum \left(U_i - \overline{U}\right)^2} \,. \tag{5.8}$$

Standardhälbe võib leida ka EXCELi abil, kasutades käsklusi (Windows 10 puhul) INSERT+FORMULAS+STATISTICAL+STDEV.S, kusjuures argumendiks on andmemassiiv.

[19] Ühemõõtmeliste suuruste normaaljaotuse puhul jääb 68% hälvetest **standardhälbe** piiridesse, 95% 2σ piiridesse ja 99% 2,5σ piiridesse. Kahemõõtmeliste suuruste puhul eeldatakse hälbe jäämist teatud parameetritega ellipsi (standardellipsi) piiridesse. Sageli loetakse seda lihtsustatult ringiks, mille raadiuseks on standardhälve. Eeldatakse, et hälve jääb selle piiridesse tõenäosusega 39,4%. Korrutades standardhälbe kordajaga kaks, saame ellipsi (või ringi), millesse hälve jääb tõenäosusega 86,5%, aga kordaja 2,45 puhul jääb hälve selle ellipsi (või ringi) piiridesse tõenäosusega 95,0%.

Kui üksikmõõtmised ei ole võrdtäpsed, kasutatakse statistiliseks hinnanguks kaaluühiku standardhälvet.

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum p_i \left(U_i - \overline{U}\ \right)^2} \tag{5.9}$$

Ühe suuruse mõõtmiste rea lõplikuks töötlemiseks kasutatavaid tõenäoseimaid tulemusi hinnatakse mõõtmiste keskväärtuse standardhälbega.

Süstemaatiliste hälvete kõrvaldamiseks viiakse mõõtmistulemustesse parandid. Sealjuures võidakse osa parandeid teha kõigile mõõdetud parameetritele ja osa mõnele neist.

$$\left.\begin{aligned} \sigma_{\overline{u}} &= \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum \left(U_i - \overline{U}\right)^2}{n(n-1)}} \\ \sigma_{\overline{u}} &= \frac{\mu}{\sqrt{\sum p_i}} = \sqrt{\frac{\sum p_i \left(U_i - \overline{U}\right)^2}{(n-1)\sum p_i}} \end{aligned}\right\} \tag{5.10}$$

Juhuslike suuruste statistilist sõltuvust iseloomustatakse **korrelatsioonikordajaga.**

$$r = \frac{R_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \tag{5.11}$$

kus R_{xy} on kahe juhusliku suuruse X ja Y korrelatsioonimoment; σ_x, ja σ_y nende suuruste standardhälbed. Korrelatsioonikordaja saab leida ka EXCELi abil, kasutades näiteks Windows 10 käsklusi INSERT+FORMULAS+MORE FUNCTIONS+STATISTICAL+CORREL ja argumente (Massiiv 1; Massiiv 2).

Võrrandi (5.11) elementide statistilised hinnangud saadakse piiratud arvu mõõtmiste tulemusel järgmistest valemitest:

$$\left.\begin{aligned} R_{xy} \approx \tilde{R} &= \frac{\sum \left(X - \overline{X}\right)\left(Y - \overline{Y}\right)}{n-1} \\ r_{xy} &= \frac{\tilde{R}}{\sigma_x \sigma_y} \end{aligned}\right\}. \tag{5.12}$$

Kui mõõtmiste arv on alla 30, on punkthinnangute asemel (ka standardhälvet kasutatakse punkthinnanguna) otstarbekas kasutada mõõdetud parameetrite **vahemikhinnanguid**.

Keskväärtuse vahemikhinnang saadakse valemiga

$$\overline{U} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} t \le U_\beta \le \overline{U} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} t \,. \tag{5.13}$$

Keskmise ruuthälbe vahemikhinnang saadakse valemiga

$$\frac{\sigma\sqrt{n-1}}{\sqrt{\chi_2^2}} \le \sigma_\beta \le \frac{\sigma\sqrt{n-1}}{\sqrt{\chi_1^2}}, \tag{5.14}$$

kus t on Studenti kriteerium, mille väärtus saadakse vastavaist tabeleist **usaldusnivoo** β ja **vabadusastmete arvu** $r = n - 1$ (n – kordusmõõtmiste arv) järgi või EXCELi abil, kasutades käsklusi INSERT+ FORMULAS+MORE FUNCTIONS+ STATISTICAL+T.INV 2T ning argumente $(1 - \beta)$ ja r.

χ_i^2 valitakse vastavaist tabeleist vabadusastmete arvu ja arvutatud tõenäosuste $\frac{1-\beta}{2}$ ja $\frac{1+\beta}{2}$ järgi vastavalt χ_2^2 ja χ_1^2 jaoks. Ka χ^2 saab EXCELi abil käsklustega INSERT+FORMULAS+MORE FUNCTIONS+STATISTICAL+CHI SQ INV RT, kasutades arvutatud tõenäosust $\frac{1-\beta}{2}$ ja r ning $\frac{1+\beta}{2}$ ja r.

Hüdrograafias on kasutusel üldjuhul mõõtemääramatuse usaldusnivoo (usaldatavuse tõenäosus) $\beta = 0{,}95$.

Hüdrograafilistel mõõtmistel saadakse täpsushinnang sageli võrdtäpsete kaksikmõõtmiste abil, st ühte suurust (nt teatud punkti sügavust) mõõdetakse kaks korda. Täpsushinnangul arvutatakse esmalt ühe suuruse kaksikmõõtmiste vahed $d = x' - x''$. Kui mõõtmised oleksid hälveteta, siis $d = 0$, seega d nullist erinev väärtus on iseenese tõeline viga!

$$m_d = \sqrt{\frac{[d^2]}{n}} \tag{5.15}$$

Siin ja järgnevates valemites nurksulud on Gaussi summamärk.

Kui süstemaatilisi hälbeid ei ole, siis on ühe mõõtmise keskmine ruuthälve

$$m_\Delta = \sqrt{\frac{[d^2]}{2n}} \,. \tag{5.16}$$

Süstemaatiliste hälvete olulisust võib kontrollida võrratusega

$$\left|\left[d\right]\right| \le 0{,}25\left[\left|d\right|\right]. \tag{5.17}$$

Võrratuse kehtimisel olulisi süstemaatilisi hälbeid ei esine, vastasel korral tuleb leida **süstemaatiline jääkhälve**

$$\xi = \frac{\left[d\right]}{n}. \tag{5.18}$$

Järgnevalt kõrvaldatakse see jääkhälve mõõtmistulemustest, st leitakse väärtused

$$\varepsilon = d - \xi \tag{5.19}$$

ja lõpuks leitakse ühe mõõtmise standardhälve

$$\sigma = \sqrt{\frac{\left[\varepsilon^2\right]}{2(n-1)}}. \tag{5.20}$$

Arvutusnäide 5.2

Hüdromeetrilise liitsihi loodimisel saadi rida tabelis toodud sügavusi (m).

8,7	8,9	8,4	8,2	8,0	8,5	8,9

Leia keskmine sügavus $\bar{z}$ ja sügavuste keskmine ruuthälve σ_z usaldusnivooga β = 0,95.

Lahenduskäik:

1. Keskmine sügavus on 8,51 m. Keskmise ruuthälbe saab valemiga (5.8) või EXCEL+ FORMULAS+ MORE FUNCTIONS+ STDEV.S = 0,34 m.

2. Leiame keskmise sügavuse usalduspiirkonna, arvestades et $(1 - \beta) = 0{,}05$ ja $r = 7 - 1 = 6$.

2.1. Leiame Studenti kordaja t EXCEL+FORMULAS+MORE FUNCTIONS+ STATISTICAL+ TINV.2T(0,05;6) = 2,45.

2.2. Leiame keskmise sügavuse usalduspiirid valemiga (5.13)

$$\bar{z} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} t = 8{,}51 \pm \frac{0{,}34}{\sqrt{7}} 2{,}45 = 8{,}51 \pm 0{,}31$$ st. $\bar{z}\text{min} = 8{,}82$ m, $\bar{z}\text{min} = 8{,}82$ m

3. Leiame standardhälbe usalduspiirkonna.

3.1. Leiame χ^2 väärtuste argumendid.

$$\chi_2^2\left(\frac{1-\beta}{2};r\right)=\chi_2^2\left(\frac{1-0{,}95}{2};6\right)=\chi_2^2(0{,}025;6),$$
$$\chi_1^2\left(\frac{1+\beta}{2};r\right)=\chi_1^2\left(\frac{1+0{,}95}{2};6\right)=\chi_1^2(0{,}975;6).$$

3.2. Leiame χ^2 väärtused, kasutades EXCEL+FORMULAS+MORE FUNCTIONS+ STATISTICAL+ CHISQ INV RT().

$$\chi_2^2(0{,}025;6)=14{,}44 \quad \chi_1^2(0{,}975;6)=1{,}24$$

3.3. Leiame standardhälbe usalduspiirid.

$$\sigma_{\min}=\frac{\sigma\sqrt{r}}{\sqrt{\chi_2^2}}=\frac{0{,}34\sqrt{6}}{\sqrt{14{,}44}}=0{,}22\text{ m} \qquad \sigma_{max}=\frac{\sigma\sqrt{r}}{\sqrt{\chi_1^2}}=\frac{0{,}34\sqrt{6}}{\sqrt{1{,}24}}=0{,}75\text{ m}$$

5.4. Kohamäärang vahetu vaatlusega

5.4.1. Kohamäärang nurgalise otselõikega

Kohamäärang nurgalise otselõikega seisneb merel asuva objekti suundade üheaegses määramises kahest rannapunktist. Põhivahendina suundade määramisel kasutatakse digitaalteodoliiti..

Suuna samajooneks on lühim joon, mis ühendab viseeritavat objekti vaatluspunktiga. Tasandil on selleks sirge, sfääril ja ellipsoidil – geodeetiline joon.

Otselõikega leitakse määratav punkt tavaliselt kahe suuna lõikepunktina. Täpsuse suurendamiseks määratakse tihti ka kolmas suund, mis võimaldab leida määratava punkti tõenäoseimaid koordinaate ja tõstab usaldatavust.

Rannapunktid, kuhu paigutatakse elektrontahhümeetrid asukoha määramiseks otselõikega, määratakse aegsasti mõõdistuspõhiste punktidena.

Suundade saamiseks tugipunktides 1 ja 2 mõõdetakse vahetult direktsiooninurgad. Selleks suunatakse instrument naabertugipunktile ja sisestatakse instrumendi mälusse selle suuna (st tugipunktidevahelise baasi) direktsiooninurk $\alpha_{(1.2)}$ või $\alpha_{(2.1)}$. Seoses sellega, et vaadeldavad objektid liiguvad, tuleb mõõtmised teha täpselt ühel ja samal ajal ning ainult vertikaalringi ühe asendi juures. Mõõtmiste üheaegsus tagatakse ühe instrumendi operaatori poolt raadio teel antavate käsklustega, näiteks „Valmistu!" ja „Null!". Käskluse „Valmistu!" järel suunatakse instrumendi vertikaalniit mõõdistuslaeva mastile ja hoitakse seal suunamiskruvi abil. Käskluse „Null!" peale salvestatakse otsekohe (klahvivajutusega) nurga lugem.

Kui kohamäärang märgitakse halsside planšetile vahetult mõõtmisprotsessis laevadel või kaatritel, siis mõõtjate töö juhtimiseks ja mõõtmistulemuste edastamiseks ujuvvahendeile organiseeritakse kahepoolne raadioside. Kui märkimine planšetile toimub pärast tööpäeva lõppu baasis, siis mõõtjate töö juhtimisel võib piirduda visuaalsete sidevahenditega.

Meetodi puudused: sõltuvus meteoroloogilistest tingimustest; vajadus organiseerida sidet vaatlejatega; arvukas isikkoosseis, kellest osa on tegevuses kohamääramisega ja osa andmeedastusega; tegevusulatus on piiratud nähtavuskaugusega, täpsus jääb maha kõigist vahetu vaatluse meetoditest (v.a vastulõige sekstandiga), mõõtmistempo on aeglane ja töö pingeline.

Kokkuvõttes võib järeldada, et hüdrograafilistel töödel jääb otselõike meetod alla nii vahetu vaatluse polaarmeetodile kui RTK GNSS meetodile.

Täpsuse poolest rahuldab meetod 1. täpsusklassi mõõdistamist, kuid töömahukuse tõttu on tänapäeval väga harva kasutatav.

Otselõike puhul on määratav punkt vaatekiirte lõikepunkt. Sel juhul mõõdavad suundi erinevad vaatlejad, järelikult suundade mõõtmise tulemusi võib lugeda sõltumatuteks. Tähistame lõikesuundade ja baasi vahelised nurgad ε ja β.

Harilikult on kasutatavad instrumendid võrdtäpsed, st $\sigma_\varepsilon = \sigma_\beta = \sigma$, mistõttu nurgalise otselõike vea võrrandile võib anda kuju

$$\sigma_W = \frac{\sigma}{\rho \sin(\varepsilon + \beta)} \sqrt{s_1^2 + s_2^2}, \qquad (5.21)$$

kus s_1 ja s_2 on tugipunktide kaugused määratavast punktist.

Valemit (5.21) kasutatakse eelneval täpsuse hindamisel, võttes iseloomulikud kaugused s_1 ja s_2 planšettidelt või kaartidelt.

Täpsete tööde puhul on vaja arvestada ka tugipunktide koordinaatide määramise keskmisi ruutvigu σ_{WA} ja σ_{WB} ja siis saab valem (5.21) järgmise kuju

$$\sigma_W = \frac{\sqrt{\left(s_1^2 + s_2^2\right)\frac{\sigma^2}{\rho^2} + \left(\frac{\sigma_A^2 + \sigma_B}{2}\right)\left(1 + \frac{s_1^2 + s_2^2}{b^2}\right)}}{\sin(\varepsilon + \beta)}, \qquad (5.22)$$

kus b on tugipunktide vahekaugus.

5.4.2. Kohamäärang polaarmeetodil

Kui GNSSi ei saa mingil põhjusel kasutada, on rannamere või jõgede mõõdistamisel saanud perspektiivseks mõõtmisviisiks polaarmeetod, seda eelkõige elektrontahhümeetrite kiire arengu tõttu. Polaarmeetodi korral paigutatakse elektrontahhümeeter ühte ranna tugipunkti ja instrument orienteeritakse, viseerides teisele ranna tugipunktile, ning mõõdetakse mõõdistusaluse kaugus, suunanurk ja vertikaalnurk. Mõõdistuslaevale paigutatava kaugusmõõturi reflektor peaks asuma võimalikult kajaloodi antenni vertikaali ligidal. Määratavate punktide koordinaadid leitakse valemitega

$$\left.\begin{aligned} x &= x_{TP} + s\cdot\cos\alpha;\\ y &= y_{TP} + s\cdot\sin\alpha. \end{aligned}\right\}, \tag{5.23}$$

kus x_{TP}, y_{TP} on ranna tugipunkti koordinaadid.

Kogu tsükli, alates koordinaatide arvutamisest kuni nende plaanile kandmiseni ja samasügavusjoonte joonestamiseni, saab vastavate programmide abil automatiseerida.

Otstarbekas on kasutada Mercatori põikprojektsiooni, Gaussi–Krügeri või Lamberti koonilise konformse polaarprojektsiooni ristkoordinaate. Kui samasügavusjoonte oletatav suund lubab kasutada riikliku koordinaatidesüsteemi *x*- või *y*-teljega paralleelseid halsse või luuakse vastav kohalik koordinaatide süsteem, saab raadio abil pidevalt korrigeerida mõõdistusaluse kurssi.

Elektrontahhümeetri abil sooritataval kohamäärangul on veel üks eelis: mõõdistamine ei sõltu meretaseme kõikumisest. Kui tugipunkti kõrgus on teada, siis võib mõõdistusaluse hetkekõrguse määrata vertikaalnurga mõõtmise abil.

Kajalooodi antenni kõrgusmuut ranna tugipunkti suhtes väljendub valemiga

$$h_{1.2} = s\tan\nu + \frac{s^2}{2R} - \left(\ell_2 - \ell_1\right), \tag{5.24}$$

kus s on mõõdetud kaugus; ν – mõõdetud vertikaalnurk; R – maaellipsoidi keskmine raadius antud piirkonnas; ℓ_2 – reflektori kõrgus kajaloodi antennist; ℓ_1 – instrumendi horisondi kõrgus seisupunkti märgist (kõik mõõtmed on meetrites). Valemit (5.24) tegelikult polegi vaja kasutada, sest tänapäeva instrumendid arvutavad kõrguskasvu automaatselt, kui ℓ_1 ja ℓ_2 on sisestatud. Instrumendi pakutavaid vertikaalrefraktsiooni koefitsiente ei tuleks kasutada, sest merel on nende väärtused võrdlemisi ettearvamatud.

Valem (5.24) kehtib üldjuhul kaugustel kuni 1 km. Suurematel kaugustel tuleb arvestada loodjoone kõrvalekaldeid ja kõrgusanomaaliaid, kusjuures need parandid tuleks kameraalse andmetöötluse jaoks programmeerida. Nimetatud parandeid vaadeldakse kõrgema geodeesia kursuses. Kõige suuremaid probleeme tekitab aga

vertikaalrefraktsioon, mis on võrdlemisi ettearvamatu, seda enam, et selle muutumist mere kohal ei ole põhjalikult uuritud.

Kohamäärangu instrumentaalne täpsus avaldub järgmiste valemitega:

$$\left.\begin{aligned}\sigma_x &= \sqrt{\sigma_s^2\cos^2\alpha + \frac{s^2\sin^2\alpha\cdot\sigma_\alpha^2}{\rho^2}}\\ \sigma_y &= \sqrt{\sigma_s^2\sin^2\alpha + \frac{s^2\cos^2\alpha\cdot\sigma_\alpha^2}{\rho^2}}\end{aligned}\right\}, \qquad (5.25)$$

kus α on mõõdistuslaeva suuna direktsiooninurk; σ_s – kauguse mõõtmise keskmine ruuthälve; σ_α – mõõdistuslaeva suuna direktsiooninurga keskmine ruuthälve (lähteandmete vigu arvestamata võrdub nurgamõõtmise keskmise ruuthälbega).

Kõrgusmuutude instrumentaalne keskmine ruuthälve, kui laev asub kuni 1 kilomeetri kaugusel, avaldub valemiga

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_s^2\tan^2\nu + \frac{s^2\sigma_\nu^2}{\cos^4\nu\rho^2}}\,. \qquad (5.26)$$

Valem (5.26) annab piirkaugustel paremad tulemused kui tegelikult, sest kaugustel ligikaudu 1 km võib vertikaalrefraktsioon vähendada mõõdetud kõrguskasvu 2 cm ja rohkem, samuti ei ole Eesti tingimustes samal kaugusel haruldane loodjoone kõrvalekaldest tingitud viga 2 cm ja kõrgusanomaaliast tingitud viga 1 cm (mida hüdrograafilistel mõõtmistel võib küll lugeda tühisteks). Suurematel kaugustel viimased kaks viga kasvavad ligikaudu võrdeliselt kauguse suurenemisega, kuid refraktsiooniviga kasvab võrdeliselt kauguse ruuduga.

Firma *Geodimeter* on välja töötanud spetsiaalsed elektrontahhümeetrid hüdrograafiliste mõõtmiste tarbeks.

Võib kasutada ka geodeetilisi robottahhümeetreid, millel on automaatne prisma jälgimise süsteem ja aktiivne prismasüsteem. Viimane on elektroonilises ühenduses tahhümeetriga ning hoiab ära valele (suvalisele) peegeldavale objektile viseerimise. Tuleb arvestada, et hüdrograafilistel mõõtmistel on vajalik mõõtmiste sagedus suur, aga näiteks *Trimble S6* vajab jälgimisrežiimil (kauguse mõõtmise täpsus 10 mm + 2 ppm) aega 0,4 s. Kuivõrd mõõtmised toimuvad ühe poolvõttega, siis nurgamõõtmise täpsus on kaks korda väiksem kui DIN 18723 vastav nominaaltäpsus 2″. Seega *Trimble S6* kasutamisel ei tohiks 3000 m kaugusel asuva laeva puhul kohamäärangu KRH ideaalis ületada 60 mm, mida võib hüdrograafias pidada tühiseks. Tegelikult võib viga olla suuremgi (arvestades 5.1.2 näiteks 0,15...0,50 m). Instrumenti saab sisestada ellipsoidile ja kaardiprojektsiooni viimise parandi.

Kauguseni kuni 2 km rahuldab kohamäärangu täpsus eelnimetatud elektrontahhümeetri abil kõiki täpsusklasse [IHO, 2011].

Kõrgusmäärangu keskmine ruuthälve (vertikaalrefraktsiooni arvestamata) on 3 km kauguse puhul 60 mm, mis on kõrguse puhul juba arvestatav suurus ja lähedal asuva tasemevaatlusposti (TVP) abil võib saada täpsemaid tasemeparandeid.

Kui mõõtmistel on jälgitav kujutise võbelemine, millega kaasneb alati tugev refraktsioon, siis ei ole kõrgusmäärangud kindlasti usaldusväärsed.

Kui instrumendil saab refraktsiooni ja Maa kumeruse parandit eraldi sisse lülitada, siis tuleb kasutada ainult Maa kumeruse parandit. Kui instrumendil on võimalik ainult ühine Maa kumeruse ja refraktsiooni parand, siis tuleb see välja lülitada ja Maa kumeruse parand (valem 5.24 teine liige) lisada andmetesse järeltöötlusel.

Kohamäärang polaarmeetodil võib olla otstarbekas jõgede hüdrograafilisel mõõdistamisel ja mõningatel juhtudel kõrgete vesiehitiste ümbruse põhjareljeefi mõõdistamisel, kui satelliidid on ehitise konstruktsioonidega või kõrghaljastusega varjestatud.

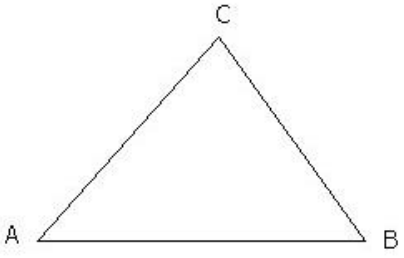
5.4.3. Kohamäärang kauguste järgi ehk joonlõike meetod

Meetodit, mille puhul kohamäärangul kasutatakse ainult kaugusi, nimetatakse joonlõike meetodiks.

Kauguse mõõtmiseks võib kasutada erinevaid vahendeid, kuid tänapäeval on otstarbekaim kauguste sünkroniseeritud mõõtmine kahe elektrontahhümeetriga (rannajaamades). Viimase meetodi eelis nurgalise otselõike ees seisneb veidi väiksemas vajalikus viseerimistäpsuses.

Kuivõrd mõõdetavad joonepikkused on suhteliselt lühikesed (kuni 10 km), kasutatakse koordinaatide ja kauguste arvutamiseks kahemõõtmelise analüütilise geomeetria valemeid.

Teades baasjoone (*AB*) pikkust (joon. 5.3) ja määratava punktini mõõdetud joonepikkusi (*AC*) ja (*BC*), võib määrata koosinuslausega lõike baasjoone ja ühe mõõdetud joone, näiteks (*BC*) vahelise nurga.



Joonis 5.3. Punkti *C* mõõdistamine joonlõigete *AC* ja *BC* abil. *A* ja *B* on instrumentide seisupunktid teadaolevate koordinaatidega

$$\cos B = \frac{(AB)^2 + (BC)^2 - (AC^2)}{(AB)\times(BC)} \tag{5.27}$$

Nüüd võime arvutada joone (*BC*) direktsiooninurga

$$\alpha_{BC} = \alpha_{BA} + B\,. \tag{5.28}$$

Nurk *B* liidetakse, kuna suund *BC* on suunast *BA* päripäeva eespool. Järgneb punkti C koordinaatide leidmine geodeesia otseülesandega.

Tänapäeva mõõteriistades taandatakse joonepikkused ellipsoidile ja projektsiooni tasandile automaatselt pärast lähteandmete sisestamist. Mõõtmiste tehnoloogia ja kasutuspiirkond on sarnane nurgalise otselõike meetodiga, ka puudused on analoogilised.

Joonlõike keskmine ruuthälve leitakse järgmise valemiga

$$\sigma_W = \frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}{\sin\theta}, \tag{5.29}$$

kus θ on lõikejoontevaheline nurk.

Kui kauguste mõõtmise hälbed rannajaamades on võrdsed ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$), siis

$$\sigma_W = \frac{\sigma\sqrt{2}}{\sin\theta}. \tag{5.30}$$

5.5. Satelliitgeodeesia (GNSS-) meetodid

5.5.1. Üldmõisted

Satelliitgeodeesia meetodite kasutamist käsitleti lühidalt juba alapunktis 5.1.2. Selle levinuim liik **NAVSTAR GPS** (täieliku nimetusega *NAVigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*) oli algselt USA militaarotstarbeline ööpäevaringne üleilmne navigatsioonisüsteem. See kasutab geodeetilist 3D taustsüsteemi WGS-84, millega on seotud geotsentriline ellipsoid WGS-84. GPSi kosmosesegment koosneb vähemalt 24 satelliidist, mis tiirlevad ümber Maa 6 orbiidil 20 200 km kõrgusel.

Kontrollsegment koosneb 16 seirejaamast, millest osa on ühtlasi sidejaamad. Nende ülesandeks on jälgida satelliite, arvutada nende täpseid efemeriide, kontrollida satelliitide kellasid ja korrigeerida orbiite. Peajuhtimisjaam asub Colorado Springsis (USA).

Kasutajasegment koosneb ühe- ja kahesageduslikest antennidega vastuvõtjatest. Ühesageduselised vastuvõtjad mõõdavad vaid ühe kandevlaine faasi, st **faasipseu-**

dokauguseid ja sellesse moduleeritud koodsignaale (*C/A – Coarse Acquisition*), st **koodipseudokauguseid**. Kahesageduselised vastuvõtjad mõõdavad mõlema kandevlaine (L1 ja L2) faasierinevusi ja lisaks moduleeritud koodsignaalidele (peale *C/A* ka *P* ehk *Precise*) ka signaalide Doppleri nihet. Peale nimetatud signaalide saadavad satelliidid veel **navigatsioonisõnumi**, mis sisaldab kõigi satelliitide ligikaudsed efemeriidid, seisundi- ja kellaandmed. Uuemad satelliidid kasutavad veel kandevlainet L2C, millega antakse edasi täiustatud navigatsiooniteade CNAV ja L5, mis on ohutusteenuse kandevlaine. See informeerib kasutajat tõrgetest süsteemi töös (nt satelliidi rike) ja seda kasutatakse eelkõige õhutranspordi ohutuse tagamiseks.

Peale GPSi kasutatakse ka Venemaa GLONASS süsteemi (*GLObal NAvigation Satellite System*), kusjuures täpsemad vastuvõtjad kasutavad GPSi ja GLONASSi koos. Tänapäeval on ka teised riigid asunud oma satelliitnavigatsiooni süsteeme looma, kusjuures üks edukamaid on Hiina oma süsteemiga BeiDou (BEIDOU, Beidou). Peaaegu lõppjärgus on Euroopa süsteem GALILEO.

GNSS mõõtmiste (nagu igasuguste geodeetiliste mõõtmiste) puhul on tegemist hulga vigade allikatega, mille loetelu esitatakse allpool.

Esimesed viis neist on suuresti vaatlejast sõltumatud, viimast nelja võib vaatleja osaliselt või täielikult elimineerida vaatlusaja ja vaatluskoha valikuga ning hoolika eeltööga.

1) orbiidi parameetrite vead ja efemeriidide ebatäpsused (andmete järeltöötlusel saab kasutata ka nn täpseid, st täpsemaid) efemeriide;
2) vastuvõtja sagedusstandardi vead ja vastuvõtja elektroonika müra;
3) antenni geomeetrilise ja faasikeskpunkti erinevusest tingitud viga (õnneks on selle mõju hüdrograafilistele mõõtmistele tühine);
4) ionosfääri ja troposfääri refraktsiooni vead;
5) satelliidi trajektoorihäired, mis on tingitud Maa gravitatsioonivälja mõjust, Päikese ja Kuu mõjust, õhutakistusest, Päikese kiirguse survest;
6) signaali mitmeteelisus, mille mõju hüdrograafilistel mõõtmistel on raske vältida;
7) satelliidigeomeetriast olenev DOP[20] kordaja, mis on eriti mõjuv absoluutse GPSi puhul **(**absoluutse GPS kohamäärangu puhul ei tohiks DOP kordaja olla üle 4, kiirmõõtmistel üle 5, muidu üle 8);
8) Päikesest tingitud magnettormid või suur päikeselaikude arv (selle tuvastamiseks kasuta www.spaceweather.com või www.swpc.noaa.gov teenuseid ja elimineeri vastavad mõõtmised);
9) lähedal asuvate TV-antennide, raadioantennide, mobiilsidemastide, radarite ja isegi elektriõhuliinide mõju;

[20] DOP (*Dilution of Precision*) – satelliidigeomeetriast olenev asukoha täpsuse vähenemise kordaja (absoluutse GNSSi puhul) või arv (teised GNSSi liigid). DOP geomeetriline väljund on GDOP (geomeetrilise täpsuse vähenemine), mille komponendid on PDOP (kohamäärangu täpsuse vähenemine), HDOP (horisontaaltäpsuse vähenemine), VDOP (vertikaaltäpsuse vähenemine), TDOP (ajamääramistäpsuse vähenemine).

10) vaatleja tehtud vead (vead andmete sisestamisel, antenni ebatäpne tsentreerimine ja valesti mõõdetud antenni kõrgus jms).

Hüdrograafias kasutatakse mõõdistamisel põhiliselt järgmisi GNSS meetodeid: absoluutne kohamäärang, suhteline kohamäärang reaalajas koodipseudokauguste abil (diferentsiaalne GNSS ehk DGNSS), suhteline kohamäärang reaalajas faasipseudokauguste abil (*Real Time Kinematic* ehk RTK GNSS). Individuaaltugijaamade koordinaatide määramisel kasutatakse veel faasipseudokaugustel töötavat staatilist GNSSi ja vahetu vaatluse lähtepunktide kohamääranguks võidakse kasutada samuti faasipseudokaugustel töötavat kiirstaatilist GNSSi.

Tänapäeval tegutseb ka rida kommertssüsteeme, näiteks Trimble RTX, NavCom ja Fugro, mis kasutavad **SeaSTAR**i satelliite. Vastuvõtjad SeaSTAR VBS, mis töötavad GPS L1 sagedusel, võimaldavad ülemaailmselt saada DGNSS parandeid otse tugisatelliidilt. SeaSTAR HP kasutab GPS L1 ja L2 sagedusi, mille tugisüsteem on saadaval Euroopas, Ameerikas, Lähis-Idas ja Aasias. Tootja andmeil on selle horisontaalne täpsus (tõenäosusega 95%) 10 cm ja vertikaalne täpsus 15 cm. Trimble RTX (kasutab Omnistar tugisatelliite) ja NavCom (kasutab Starfire tugisatelliite) täpsus on 4...5 cm [Rüdja, Sander, 2013].

5.5.2. Absoluutne kohamäärang

Absoluutse kohamäärangu põhimõte seisneb signaali kulgemisaja määramises, mille abil tehakse kindlaks satelliidi ja vastuvõtja vaheline koodipseudokaugus. Kohamääranguks on vaja vähemalt nelja satelliidi koodipseudokaugust (merel aitab üldjuhul isegi kolmest, kuid see pole soovitav, sest täpsus on väike ja niikuinii saab avamerel ühenduse rohkemate satelliitidega), mis annavad ruumilise lõike teadaolevate koordinaatidega satelliitidest. Saavutatav täpsus on 3 m [Rüdja, Sander, 2013]. Ei saa öelda, et see täpsus madal oleks, sest tegemist on Maa keskmest määratud vektoriga, mille suhteline viga on seega ~ 1 : 2 000 000. Huvipakkuvam on kaugus määratavate punktide vahel Maa pinnal, mis saadakse palju väiksema suhtelise täpsusega ja rahuldab vaid avamere navigatsiooni või hüdrograafilisi töid piirkonnas, kus puuduvad navigatsiooniohud [IHO Standard, 2008].

Liikumatu punkti pikema aja jooksul salvestatud andmete järeltöötlusel võib täpsus küll tublisti kasvada, kuid navigatsioonis on tarvis liikuva objekti kohamäärangut. Ka reaalaja üksikpunkti täpne kohamäärang (*Precise Point Positioning* – **PPP**), mis põhimõtteliselt on kui üks absoluutse kohamäärangu liik ja mida intensiivselt arendatakse, ei suuda veel RTK GNSS-meetodiga võistelda.

5.5.3. Diferentsiaalne koodmõõtmine

Diferentsiaalsed globaalsed satelliit-navigatsioonisüsteemid (**DGNSS**) kasutavad samuti koodipseudokauguseid, kuid liikurvastuvõtjatele edastatakse raadio teel **RTCM**i (*Radio Technical Comission for Maritime Services*) formaadis piirkondlikus või individuaalses tugijaamas määratud parandid reaalajas. Tugijaama antenn

peab asuma teadaolevate koordinaatidega punktis. Eeldatakse, et parandid on 500 km raadiuses küllaltki sarnased, kuid üldjuhul püütakse hoida mõõtmiskaugust tugijaamast 200 km piirides. Eesti territoriaalvetes on see täiesti võimalik, sest Veeteede Ameti tugijaamad asuvad Narva-Jõesuus ja Ristnas. Peale nende on veel Soome tugijaam Porkkalas ning võrdlemisi ligidal ka Rootsi tugijaamad.

Lisaks eelnimetatutele tegutsevad veel kommertstugijaamad: Eesti Maaülikooli jaam Tartus ning OÜ Geosoft jaam Tallinnas. On võimalik kasutada ka **EGNOS**e (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) geostatsionaarset satelliiti, mille andmeid tarbib põhiliselt lennuliiklus. Kirjalike allikate põhjal võib sellega saada sageli halvemaid tulemusi kui hariliku DGNSSi kasutamisega [Liibusk jt, 2007], sest me asume EGNOSe äärealal ja meie geograafilise laiuse tõttu on selle satelliidid ka madalal. Abiks võib olla ka analoogiline süsteem **WAAS**, kuid see on täpsem USAs ning Vaiksel ja Atlandi ookeanil, mitte meil.

DGNSS parandite täpsus väheneb kaugenemisel tugijaamast 0,5 cm/km, kuna tugijaama signaali töötlemine, parandite arvutamine ja saatmine liikurvastuvõtjasse võtab teatava aja. Pealegi väljastatakse parandid 40 s ja väiksema perioodiga. Selle aja jooksul jõuab parand muutuda. Mida väiksem on periood, seda suurem täpsus. Meetodi täpsus on 0,5... 1 m ja seda kasutatakse täppisnavigatsioonis ning avamere hüdrograafilistel töödel. Kui hüdrograafiliste tööde piirkond on tugijaamadest kaugel, tuleb luua individuaaltugijaam, mille aparatuur koosneb GNSS-vastuvõtjast ning raadiosaatjast. Tugijaama koordinaadid tuleb eelnevalt määrata staatilise GPSi abil vähemalt 10 cm täpsusega. DGNSS võimaldab teha hüdrograafilist kohamäärangut, mis vastab eritäpsusklassi nõuetele.

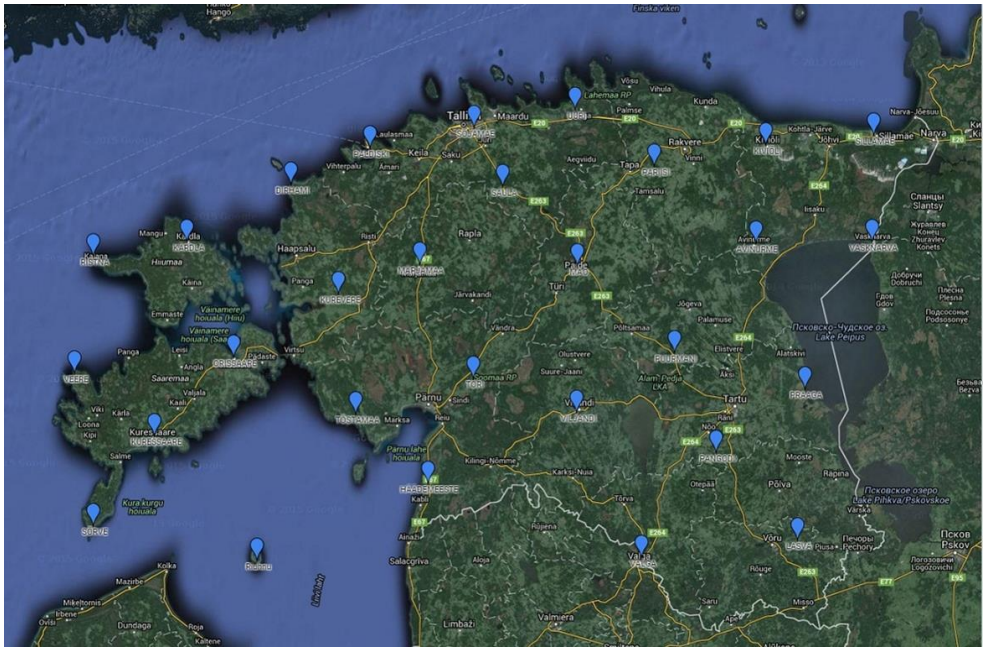
5.5.4. Reaalajas kinemaatiline mõõtmine

Tänapäeval kasutatakse faasipseudokauguste-põhisel RTK GNSS mõõdistamisel valdavalt **OTF** (*On The Fly*) meetodit, mille puhul on soovitav kahesageduseline vastuvõtja. Rannalähedase avamere mõõdistamisel tuleks kasutada Eestis alaliselt tegutsevat **HadNET**i tugijaamade võrku koos Veeteede Ameti tugijaamadega (joon. 5.4), mille tööpiirkonnad katavad merd rohkem kui teised. Kasutada saab ka **GeoNET**i või Maa-ameti tugijaamade võrku. Neist esimese tööpiirkond ulatub Ida-Virumaal, Lääne-Virumaal, Tallinna piirkonnas, Hiiumaast põhja poole, Kuressaarest kagu suunas ja Kablist lääne suunas maksimaalselt 30 km merele. Tugijaamadega on kaetud ka Väinameri. (Veeteede Ameti andmetel on RTK GPS VRS täpne veel 50 km kaugusel tugijaamast.)

RTK võimaldab teha kõigi täpsusklasside kohamäärangut ja adekvaatse geoidimudeli puhul ka kõrgusmäärangut individuaaltugijaamast kuni 20 km kaugusel [IHO Manual, 2011], kuid individuaaltugijaamu kasutatakse tänapäeval harva. (Vt ka kommertssüsteemide võimalusi.)

Ühenduseks tugijaamaga võib kasutada raadiosidet RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) formaadis andmeedastuse kiirusega vähemalt 4800 bitti sekundis, kuid nüüdisajal saab tarvitada ka **GPRS**[21]- sidet, mille andmeedastuse kiirus mobiiltelefoniga on vähemalt 2400 bitti[22] sekundis, kusjuures telefon ja vastuvõtja peaksid olema soovitatavalt ühendatud *Bluetooth*iga[23].

Otstarbekas on valida virtuaalse referentsjaama (VRS - *Virtual Reference System*) meetod, mille puhul arvutab vastuvõtja esmalt oma esialgse asukoha koordinaadid ja edastab need serverisse. Nende koordinaatidega punktis luuakse virtuaalne jaam, milles kasutatakse sinna taandatud lähima tõelise püsijaama mõõtmisandmeid ning ka võrgu teiste püsijaamade parandeid. Seejärel saadetakse virtuaalse jaama jaoks loodud andmed vastuvõtjale ning viimane määrab oma täpsed koordinaadid virtuaalse jaama suhtes. VRSi eeliseks on asjaolu, et baasjooned vastuvõtja ning virtuaaljaama vahel on lühemad kui vastuvõtja ja püsijaama vahel ja referentsandmetes pole püsijaama vigu (näiteks mitmeteelisus).



Joonis 5.4. HadNET RTK tugijaamad [Hades Geodeesia OÜ]

[21] GPRS – GSM võrgu raadioandmeside teenus.

[22] Bit (*binary digit*) ehk kahendnumber, informatsiooni mõõtühik, vähim töödeldava info hulk.

[23] *Bluetooth* – tehnoloogia, mis võimaldab kaablivaba andmevahetust kõigi osalevate seadmete vahel.

Need mõõtmised nõuavad häid tingimusi, vähemalt 5 ühise satelliidi nähtavust ja PDOP arvu kuni 6. Väga tähtis on heade mõõtmistingimuste olemasolu **algtundmatute**[24] määramise ajal. Mõõta tuleb minimaalse salvestusintervalliga (0,1 või 0,05 s), sest mõõdistuslaev võib liikuda kiirusega 7 m/s.

Kui mõõtmispiirkond ei asu püsivõrgu tööpiirkonnas, võib rajada individuaalbaasjaama, mille koosseisu kuulub kahesageduseline GPS-vastuvõtja, GPS-antenn, raadiomodem, raadioantenn, võimendi, aku, kaks statiivi ja kaablid. Ka liikuvjaamal peab olema raadioantenn. Siinjuures tuleb arvestada maksimaalset kaugust baasjaama ja liikurvastuvõtja vahel, mida mõjutab Maa kumerus. Selle võib leida Langley valemiga [Liibusk, 2003]

$$d = 3{,}75\sqrt{k}\left(\sqrt{h_s} + \sqrt{h_{vv}}\right), \tag{5.31}$$

kus k on refraktsioonikoefitsient, mis (*Иордан* jt, 1963) andmetel on merel väga muutuv – üldjuhul 0...0,25 piirides; h_s – saatja raadioantenni kõrgus merepinnast (m), h_{vv} – liikuvjaama raadioantenni kõrgus (m).

Individuaalbaasjaama koordinaadid tuleb määrata staatilise GNSSi abil.

5.5.5. Staatiline mõõtmine

Staatilisel kohamäärangul kasutatakse faasipseudokaugusi, mille abil määratakse tundmatute punktide asendid tuntud punktide suhtes, st baasjooned ehk vahevektorid (ΔX, ΔY, ΔZ). Antennid asuvad lähtepunktide ja määratavate punktide kohal kogu **mõõtmissessiooni**[25] jooksul, kusjuures eeldatakse, et vastuvõtjad on **lukustatud**[26] samade satelliitidega üheaegselt. Kogu sessiooni vältel tuleb kasutada üht tüüpi vastuvõtjaid koos ühesuguste antennidega.

Kui vaatlushetked ei ole samad, on võimalik taandada need samadele **epohhidele**[27] järeltöötlusel. Kui eeskirjadega ei ole teisiti ette nähtud, siis minimaalse satelliitide arvu lukustusel peab vaatlusaeg ühesageduseliste vastuvõtjate puhul olema vähemalt 30 min + 3 min/km ja kahesageduseliste vastuvõtjate puhul 20 min + 2 min/km (st vaatlusaeg oleneb kaugusest võrgupunktide vahel kilomeetrites). Pika vaatlusaja tõttu ei ole **tsüklivääratused**[28] ohtlikud. PDOP väärtus ei tohi olla üle 6,

---

[24] Algtundmatu – kandevsageduse täislainepikkuste arv antennist satelliidini mõõtmiste alghetkel.

[25] Mõõtmissessioon on periood, mille jooksul teatud hulk vastuvõtjaid töötab üheaegselt samas mõõtmisskeemis.

[26] Vastuvõtja loetakse satelliidiga lukustatuks, kui ta on satelliidi navigatsioonisõnumi identifitseerinud.

[27] Epohh on teatud ajasüsteemiga seotud ajamoment, mille kohta on määratud taevakeha või GNSSi antenni koordinaadid. GPSi standardepohh on 6. jaanuar 1980, millest loetakse aega nädalais ja sekundeis.

[28] Tsüklivääratus (ka faasikatkestus, faasihüpe või signaalikatkestus) on satelliidi lukustuse katkemine mõõtmistel faasipseudokaugustega, mistõttu tuleb leida uus algtundmatu.

vaatlusintervall on harilikult 10, 15 või 30 s. Kui mõõtmissessioonis kasutatakse ka püsijaamu, siis tuleks kasutada püsijaamade standardset salvestusintervalli 30 s. Andmed saadakse, erinevalt eelpool vaadeldud meetoditest, järeltöötlusel.

Kuni 20 km pikkusi baasjooni võib (ja mõnedel andmetel on isegi soovitav) mõõta ühesageduseliste vastuvõtjatega.

Staatiline GNSS on kõige täpsem mõõtmismeetod, täpsus ideaaljuhul 3 mm + 0,5 ppm, mistõttu seda kasutatakse tugipunktide koordinaatide ja kõrguste määramiseks.

5.5.6. Kiirstaatiline mõõtmine

Kiirstaatiline meetod erineb staatilisest lühema vaatlusaja poolest, mis üldjuhul on vähemalt 10 min + 1 min/km. Selleks kasutatakse kahesageduselisi vastuvõtjaid ja tulemused töödeldakse spetsiaalses tarkvara moodulis, kusjuures algtundmatud lahendatakse statistiliste meetoditega. Lukustatud satelliite peab olema vähemalt 5...6, PDOP arv ei tohi olla üle nelja ja vaatlusintervall on enamasti 5...10 s. Mõõdetakse kuni 20 km pikkuseid baasjooni, mõõtmistäpsus normaaltingimustel 10 mm + 1 ppm, kusjuures üks vastuvõtja (antenn) asetseb teatud koordinaatidega punkti kohal ja teine liigub mööda määratavaid punkte. Et mõõtmistulemused oleksid usaldatavamad, tuleks statsionaarne vastuvõtja (antenn) paigutada veel teise tugipunkti kohale ja mõõtmisi korrata. Tulemused saab järeltöötlusel. Kiirstaatilist meetodit võib kasutada vahetul vaatlusel lähtepunktide koordinaatide määramiseks.

5.5.7. GNSS ja inertsiaaalsüsteemid

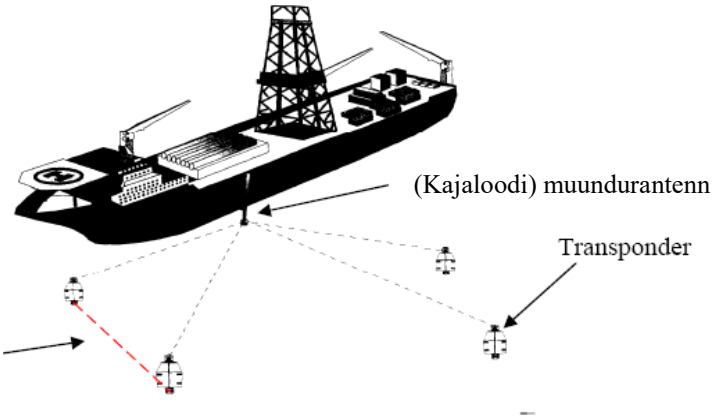
Nii koha- kui ka asendimäärangul kasutatakse tänapäeval sageli GNSSi ja inertsiaalsüsteeme koos. **Inertsiaalsensorid** (*Inertial Measurement Unit,* IMU) koosnevad üldjuhul kolmest aktseleromeetrist (kiirendussensorist), mis on monteeritud kolmele ortogonaalsele teljele, ja kolmest analoogiliselt monteeritud nurkkiiruse andurist (güroskoobist). Nende sensorite esmane ülesanne on mõõdistuslaeva asendi, st püstõõtsumise, rullumise ja pikikõikumise kohta andmete saamine, et leida vastavad parandid (vt alajaotis 8.6). Kuid võib esineda olukordi, kus tuleb teha ka kohamääranguid ja kursimääranguid, näiteks kaob ühendus satelliitidega sildade alt läbisõidul või kõrgete sadamaehituste tõttu. Satelliitide lukustuse katkemisel tagab näiteks POS MV 320 RTK inertsiaalsüsteem esialgu kursimäärangu keskmise ruuthälbega 0,02° ehk 1,2’ [Parker, Mallace, 2005]. Samas tuleb arvestada, et vead kasvavad proportsionaalselt GNSSi mittetoetatava kasutusaja ruuduga [Torge, Müller, 2012]. Õnneks tänapäeva RTK OTF lahendab algtundmatud peaaegu kohe pärast satelliitide lukustuse taastamist.

POS MV on kasutajasõbralik käivitusvalmis süsteem, mis on ette nähtud laeva täpse asukoha, kursi, kiiruse, rullumise ja piki- ning püstõõtsumise andmete määramiseks. POS MV on kavandatud kasutamiseks koos mitmekiirelise kajaloodiga, kusjuures ta ühendab GNSSi kohamäärangu ja asimuudi mõõtmise süsteemi and-

med inertsiaalse mõõtmismooduli (IMU) nurkkiiruse ja kiirenduse andmetega, saades stabiilse ja täpse kuue vabadusastmega kohamäärangu ja orientatsiooni lahenduse. Instrumendi kasutamine koos mitmekiirelise kajaloodiga tagab IHO standardid isegi kiirelehviku avanurkadel üle 75°.

5.6. Veealune akustiline kohamäärang

5.6.1. Pikkade baasjoonte meetod



Joonis 5.5. Pikkade baasjoonte meetod [IHO Manual, 2011]

Kirjeldatav meetod põhineb merepõhja ankurdatud **transpondritel**[29] (vt joonis 5.5), mille omavahelised kaugused (baasjooned) võivad ulatuda, olenevalt eeskätt piirkonna sügavusest ja teistest looduslikest tingimustest ning akustiliste võngete sagedusest, 50 meetrist 6 kilomeetrini ja enam. Transpondrid seotakse omavaheliste hüdroakustiliste kaugusmõõtmistega geodeetiliseks ruumiliseks trilateratsioonivõrguks, mis tasandatakse vähimruutude meetodil. Kui süsteemi lülitada laeva kajaloodi muundurantenn[30] (*transducer*) ja GNSS-vastuvõtja, saab kogu merepõhja akustilise süsteemi siduda koordinaatsüsteemiga WGS-84. Üksteisest eristamiseks töötavad transpondrid erinevatel sagedustel. Baasjoone pikkus oleneb sügavusest ja merepõhja reljeefist, baasjoonte pikkusest omakorda oleneb kasutatav sagedus.

[29] Transponder – automaatsaatja/-vastuvõtja.

[30] Kajaloodi muundurantenn muundab kajaloodi saatja elektrilised võnkumised ultraheli-võngeteks või võtab vastu peegeldunud helilained ja muundab need elektrilisteks võngeteks (ka kajaloodi muundursensor).

Sagedus	Maksimaalne kaugus
8–16 kHz	> 10 km
18–36 kHz	2–3,5 km
30–64 kHz	1500 m
50–110 kHz	< 1000 m
200–300 kHz	< 100 m

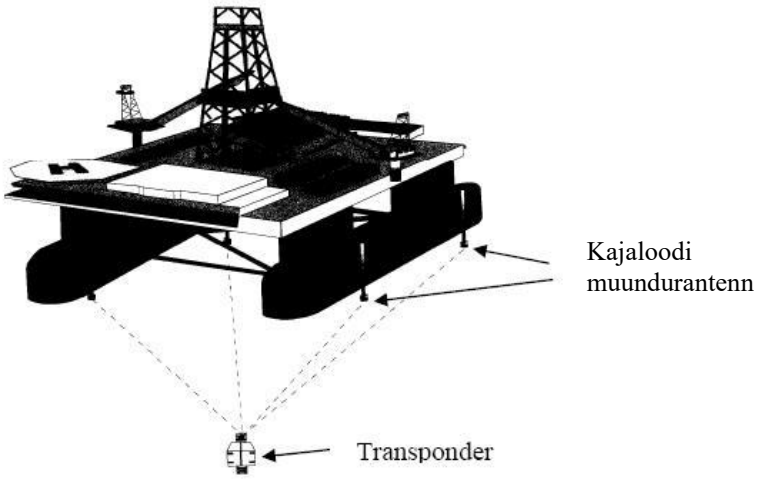
5.6.2. Lühikeste baasjoonte meetod

Selle meetodi puhul kasutatakse merepõhjas olevatest transpondritest koosneva baasvõrgu asemel laeva või näiteks naftaplatvormi põhjale kinnitatud vastuvõtja antennidest koosnevat süsteemi, kusjuures antennide omavaheline kaugus on 10...100 m.

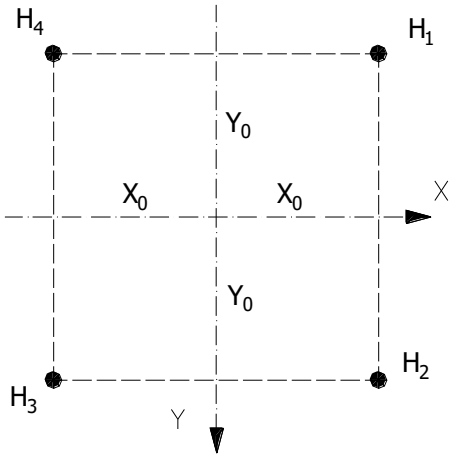
Süsteemi baasmärgiks on merepõhja ankurdatud transponder, mille koordinaadid määratakse algselt laeva GNSSi abil koos joonelise lõikega laeva kajaloodi muundurantennidest (joon. 5.6).

Süsteemisisene suhteline täpsus võib olla küllaltki kõrge ja ulatuda sentimeetri täpsusklassi ning on insenerlike lahenduste jaoks parim. Sidumine teatud taustsüsteemiga (WGS-84) on tunduvalt madalama täpsusega ja oleneb kasutatavast GNSSi liigist.

Väga oluline on siin täpne vee temperatuuri ja soolsuse määramine, sest 1°C temperatuuri muutust annab helikiiruse muutuse 4,5 m/s ja iga promill soolsuse muutust põhjustab helikiiruse muutuse 1,2 m/s.



Joonis 5.6. Lühikeste baasjoonte meetod [IHO Manual, 2011]



Joonis 5.7. Lühikeste baasjoonte meetodi kohalik koordinaatide süsteem. H_i – muundurantennid

Eeldades, et muundurantennid on kohaliku koordinaatide süsteemi suhtes paigutatud rangelt sümmeetriliselt (joon. 5.7), võib transpondri koordinaadid leida järgmistest võrranditest:

$$x = \frac{R_3^2 - R_1^2 + R_4^2 - R_2^2}{8x_0},$$

$$y = \frac{R_1^2 - R_2^2 + R_3^2 - R_4^2}{8y_0}, \tag{5.32}$$

$$z = 0{,}25\left(\begin{array}{l}\sqrt{R_1^2 - (x-x_0)^2 - (y-y_0)^2} + \sqrt{R_2^2 - (x-x_0)^2 - (y-y_0)^2} + \\ + \sqrt{R_3^2 - (x+x_0)^2 - (y+y_0)^2} + \sqrt{R_4^2 - (x+x_0)^2 - (y-y_0)^2}\end{array}\right),$$

kus R_i on transpondri ja muundurantennide vahekaugused $\left(R = \frac{ct}{2}\right)$. Siin on c helikiirus vees ja t signaali kulgemise aeg muundurantennist transpondrini ja tagasi.

5.7. Liitsihijoone arvutus Mercatori (normaal-) projektsioonis

Liitsihijoon (näiteks tuletornide vahel) kujutab endast ortodroomi, mis on määratud eesmise (ELS) ja tagumise (TLS) liitsihimärgiga (joon. 5.8). Kui liitsihi asimuut ei ole teada ja punktid *ELS* ja *TLS* on määratud riikliku põhivõrgu punktidelt tasandiliste ristkoordinaatidega, siis esmalt arvutatakse liitsihi direktsiooninurk α ja seejärel liitsihi loksodroomiline asimuut, mis on taandatud esimese liitsihimärgi keskmesse.

$$A_L = \alpha + \gamma - \psi, \tag{5.33}$$

kus α on liitsihi direktsiooninurk; γ – meridiaanide koonduvus punktis *ELS*;

ψ – ortodroomiline parand.

Meridiaanide koonduvuse võib arvutada lihtsustatud valemiga

$$\gamma = (\lambda_{ELS} - \lambda_0) \sin\varphi_{ELS}, \tag{5.34}$$

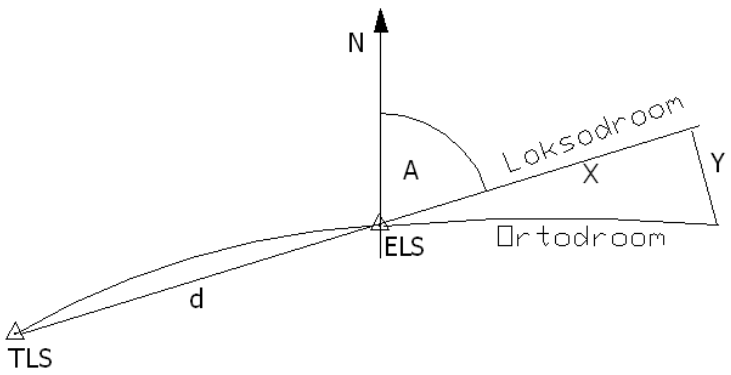
kus λ_{ELS} on esimese liitsihimärgi geograafiline pikkus; λ_0 – telgmeridiaani geograafiline pikkus; φ_{ELS} – esimese liitsihimärgi geograafiline laius.

Kui *ELS* ja *TLS* geograafilised koordinaadid on teada, leitakse asimuut valemiga (3.3), kusjuures liitsihimärgi meridionaalosa *D* leitakse sfääriliste koordinaatide puhul valemiga (3.2), aga geodeetiliste koordinaatide puhul valemiga

$$D = \rho' \left[ln\, tan\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) - e^2\, sin\,\varphi - \frac{e^4\, sin^3\,\varphi}{3} \right]. \tag{5.35}$$

Ortodroomiline parand arvutatakse lihtsustatud valemiga

$$\psi = \frac{1}{2}\left(\lambda_{ELS} - \lambda_{TLS}\right)\sin\varphi_{ELS}. \tag{5.36}$$



Joonis 5.8. Liitsihijoone ordinaadi leidmine

Loksodroom kantakse kaardile ja märgitakse sellele iga 5...10 cm järel abstsissid *x*. Saadud punktidest moodustatakse loksodroomi normaalid lähema pooluse vastassuunas. Normaalidele kantakse **ortodroomi ordinaatide** väärtused, mis leitakse valemiga

$$y = \frac{x(x+d)\psi' m}{d\rho'}, \tag{5.37}$$

kus *d* on liitsihipunktide omavaheline kaugus; ψ'– ortodroomiline parand kaareminutites; *m* – kaardi mõõtkava; ρ' – radiaani väärtus minutites.

5.8. Kiirtevõrgu arvutamine ja joonestamine

Mitmesuguste graafiliste ülesannete lahendamiseks kas kaardil või planšetil kasutatakse suundasid, kusjuures suundade samajoonteks on sirged, mis ühendavad tugipunkte määratavate punktidega. Neid sirgeid nimetatakse kiirteks.

Sõltuvalt tugipunktide asetusest kaardi või planšeti raami suhtes ja täpsusest kasutatakse erinevaid mooduseid kiirtevõrgu joonestamisel.

Neil juhtudel, kui tugipunktid asetsevad väljaspool planšetti ja on viimasest kaugel või kui lahend peab olema võimalikult täpne, ehitatakse kiirtevõrk kiirte ja planšeti raami külgede lõikepunktide järgi (nt liitsihid).

Iga planšetti läbiv kiir lõikab selle raami kahte külge. Piki raami ükskõik millist külge jääb aga üks koordinaatidest (*x* või *y*) muutumatuks. Järelikult on kiire asendi määramiseks tarvilik ja piisav arvutada ainult kaks koordinaati.

Tuletame valemid kiirte ja planšeti raami lõikepunktide tasandiliste ristkoordinaatide määramiseks.

Selleks tähistame: *P* – tugipunkt, millest moodustatakse kiiri; x_P, y_P – tugipunkti koordinaadid; α – kiire direktsiooninurk; x_S, x_N, y_W, y_E – planšeti külgede abstsissid ja ordinaadid; *E, F, K, L* – kiire lõikepunktid planšeti raami külgede või nende pikendustega.

Joonestame läbi punktide *E, F, K, L* ja *P* koordinaattelgedega paralleelsed sirged (joon. 5.9). Tekivad kolmnurgad *PRE, PBF, PCK* ja *PDL*, mida kasutame kiirte ja raami külgede lõikepunktide koordinaatide määramiseks.

Vaatleme kolmnurka *PRE*. Punktis *E* lõikab kiir planšeti läänekülje pikendust ja järelikult on teada tema ordinaat y_W. Jooniselt näeme, et punkti *E* abstsiss

$$x_W = x_P + (y_W - y_P)\cot\alpha. \tag{5.38}$$

Punktis *F* lõikab kiir raami lõunakülge. Järelikult on teada lõikepunkti abstsiss x_S. Kolmnurgast *PBF* määrame punkti *F* ordinaadi

$$y_S = y_P + (x_S - x_P)\tan\alpha\,. \tag{5.39}$$

Analoogiliselt saame kolmnurkadest *PDL* ja *PCK* punkti *L* abstsissi ja punkti *K* ordinaadi

$$x_E = x_P + (y_E - y_P)\cot\alpha\,, \tag{5.40}$$

$$y_N = y_P + (x_N - x_P)\tan\alpha\,.$$

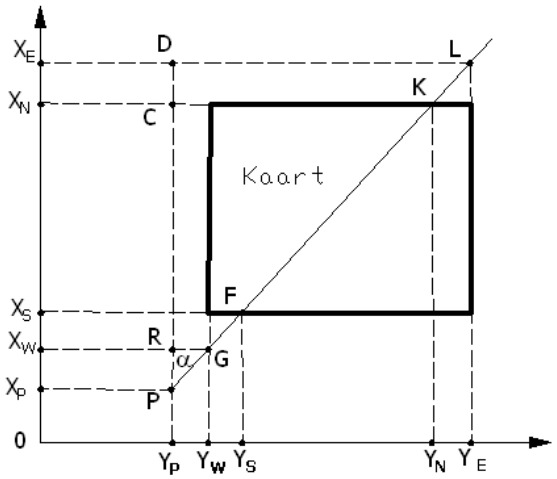
Planšetile on otstarbekas kanda koordinaatide absoluutsete väärtuste asemel nende muudud raami *SW*-nurga suhtes, mida nimetatakse **kaardikoordinaatideks**[31].

Selleks kasutame analüütilisest geomeetriast tuntud koordinaatide teisendamise valemeid. Pärast teisendusi saame punktide *E, L, F* ja *K* jaoks vastavalt:

$$\begin{aligned} x'_W &= \left[(x_P - x_S) + (y_W - y_P)\cot\alpha\right]m, \\ x'_E &= \left[(x_P - x_S) + (y_E - y_P)\cot\alpha\right]m, \\ y'_S &= \left[(y_P - y_W) + (x_S - x_P)\tan\alpha\right]m \\ y'_N &= \left[(y_P - y_W) + (x_N - x_P)\tan\alpha\right]m, \end{aligned} \tag{5.41}$$

Planšeti mõõtkava tähistab siin *m.*

Valemitega (5.41) arvutatud koordinaate x'_W, x'_E, y'_S, y'_N on lihtne nurgast *SW* kanda raami külgedele.



Joonis 5.9. Joone kandmine kaardile väljaspool asuva punkti abil

[31] Kaardikoordinaadid, ka indeksvõrgu koordinaadid – koordinaadid millimeetrites või sentimeetrites kaardi *SW*- nurga suhtes, kusjuures kaardi lõunaraam võetakse *y*-teljeks ja selle normaal *SW*- nurgast (täisnurksete kaartide puhul – lääneraam) on *x*-teljeks.

5.9. Üleminek ortodroomilt loksodroomile Mercatori projektsioonis

Ranna tugipunktide suundade vahel mõõdetud nurkade haarad kujutavad endast ortodroome. Mercatori projektsioonis kaardil on ortodroom lähema pooluse poole kumerdunud joon.

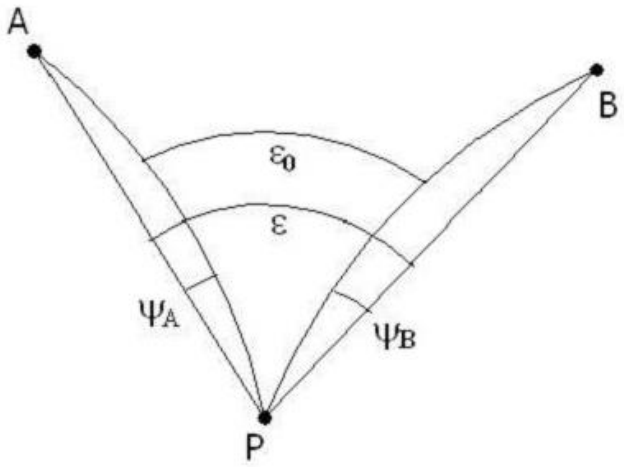
Vaatleme tugipunktide *A* ja *B* suundade vahelist horisontaalnurka ε_0 (joon. 5.10). Selle nurga haarade kujutised Mercatori projektsioonis kaardil on kõverjooned. Ühendame punkti *P* sirgete abil tugipunktidega *A* ja *B*. Saadud sirged on loksodroomid. Nurk nende sirgete vahel olgu ε. Kaarte *PA* ja *PB* puutujate suunad alguspunktides erinevad vastavalt sirgete *PA* ja *PB* suundadest nurkade (ortodroomiliste parandite) ψ_A ja ψ_B võrra.

Joonise 5.10 põhjal võime eeldada, et nurk ε_0 saadi kui suundade *PB* ja *PA* vahe, seega saame koguparandi kui parandite ψ_B ja ψ_A vahe, niisiis (**antud juhul!)**

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \psi_B - \psi_A. \qquad (5.42)$$

Saadud valem ei ole üldine, sest valemis (5.42) toodud ψ_A ning ψ_B märgid kehtivad ainult joonte *PA* ja *PB* joonisel 5.10 toodud orientatsiooni puhul.

Tegelikult tuleks parandite lõplike märkide leidmiseks koostada alati ilmakaarte järgi orienteeritud skeem, nagu on seda tehtud joonisel 5.10.



Joonis 5.10. Nurga loksodroomiliste ja ortodroomiliste haarade ja ortodroomiliste parandite skeem Mercatori normaalprojektsioonis

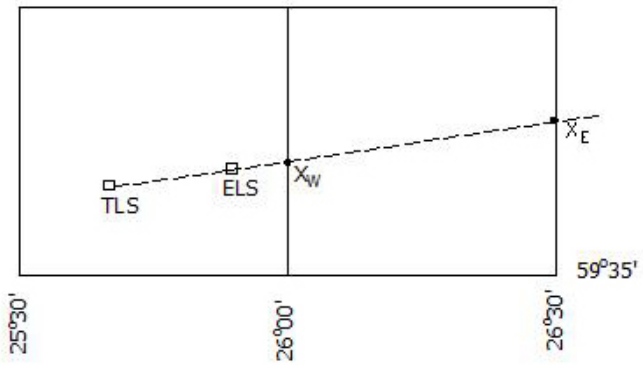
Parandeid ψ_i kasutatakse ortodroomiliste suundade või nurkade teisendamisel loksodroomilisteks, kusjuures valemis (5.42) tuleb arvestada ka valemis (5.43) saadud väärtuste ψ märke.

Vastavad arvutused tehakse valemitega

$$\left.\begin{aligned} \psi_B &= \frac{1}{2}(\lambda_B - \lambda_P)\sin\varphi_K \\ \psi_A &= \frac{1}{2}(\lambda_A - \lambda_P)\sin\varphi_K \end{aligned}\right\}. \qquad (5.43)$$

Arvutusnäide 5.3

Liitsihi määravad ELS (ϕ = 59º38,23’; Λ = 25º48,67’) ja TLS (ϕ = 59º37,02’; Λ = 25º40,15’). Punktid asuvad vasakpoolsel planšetil (joon. 5.11).



Joonis 5.11. Liitsihi asend naaberplanšettidel

Liitsihiga määratud ortodroom peab ulatuma ka parempoolsele planšetile. Seetõttu tuleb Mercatori projektsioonis planšetil loksodroomi TLS-ELS pikendamiseks arvutada viimase lõikepunktid (x_W ja x_E) planšeti raami külgedega valemi (5.41) abil. Valemites kasutame koordinaadi x asemel meridionaalosasid ja koordinaadi y asemel geograafilisi pikkusi minutites. Väikese pinna tõttu kasutame arvutustes sfäärilisi koordinaate, kusjuures Maa raadiuseks võtame R = 6388000 m. Arvutustel kasutame kaareühikuid detsimaalsüsteemis. Mõõtkava 1 : 10 000.

Lahenduskäik:

1. Leiame liitsihi punktide ja planšeti raami lõunakülje meridionaalosad.

$$D_{ELS} = \rho' \,\mathrm{lntan}\left(45° + \frac{\Phi}{2}\right) = 3437{,}7468 \times \mathrm{lntan}\left(45° + \frac{59{,}63717}{2}\right) = 4484{,}0650$$

$$D_{TLS} = 3437{,}7468 \times \mathrm{lntan}\left(45° + \frac{59{,}51700}{2}\right) = 4481{,}6715$$

$$D_S = 3437{,}7468 \times \mathrm{lntan}\left(45 + \frac{59{,}58333}{2}\right) = 4477{,}6796$$

2. Leiame loksodroomi asimuudi.

$$A = \mathrm{atan}\frac{(\Lambda_{ELS} - \Lambda_{TLS})'}{D_{ELS} - D_{TLS}} = \mathrm{atan}\frac{(25{,}81117 - 25{,}66917) \times 60}{4484{,}0650 - 4481{,}6715} = 74{,}3085°$$

3. Leiame x_W meridionaalosa.

$$D_{XW} = D_{ELS} + \frac{\Lambda_W - \Lambda_{ELS}}{\tan A} = 4484{,}0650 + \frac{(26 - 25{,}66917) \times 60}{\tan 74{,}3085°} = 4487{,}2473$$

4. Leiame x_E meridionaalosa.

$$D_{XE} = D_{XW} + \frac{\Lambda_E - \Lambda_W}{\tan A} = 4487{,}2473 + \frac{(26{,}5 - 26) \times 60}{\tan 74{,}3085°} = 4495{,}6751$$

5. Leiame liitsihi pikkuse kaareühikuis valemiga (5.3).

$$\sigma = \mathrm{acos}[\sin\phi_{TLS}\sin\phi_{ELS} + \cos\phi_{TLS}\cos\phi_{ELS}\cos(\Lambda_{ELS} - \Lambda_{TLS})] =$$
$$= a\cos[\sin 59{,}6170°\sin 59{,}6372° +$$
$$+ \cos 59{,}6170°\cos 59{,}6372°\cos(25{,}8112° - 25{,}6692°)] =$$
$$= 0{,}07457164°$$

6. Leiame liitsihi pikkuse meetrites.

$$d = s = \frac{\sigma R}{\rho} = \frac{0{,}07457164 \times 6388000}{57{,}29578} = 8314{,}114 \text{ m}$$

7. Leiame ortodroomilise parandi valemiga (5.36).

$$\psi = 0{,}5\left(\Lambda_{ELS} - \Lambda_{TLS}\right)' \times \sin \phi_{ELS} =$$

$$= 0{,}5\left(25{,}8112 - 25{,}6692\right) \times 60 \times \sin 59{,}6372° = 3{,}6757'$$

8. Leiame ortodroomilise ordinaadi valemiga (5.37).

$$y = \frac{x\left(x + d\right)\psi' m}{d\rho'} = \frac{20000\left(20000 + 8314\right)3{,}6757 \times 0{,}0001}{8314 \times 3437{,}7} =$$

$$= 0{,}0073 \text{ m} = 7{,}3 \text{ mm}$$

6. MEREPÕHJA PINNAMOE MÕÕDISTAMISE SEADMED

6.1. Üldmõisted

Peamine teave merepõhja pinnamoest ehk reljeefist saadakse sügavuste mõõtmise teel. Vastavalt füüsikalistele põhialustele liigitatakse merepõhja reljeefi navigatsioonilise mõõdistamise seadmed kolme rühma: mehaanilised, optilised ja hüdroakustilised.

Mehaanilised seadmed. Nendega fikseeritakse loodjoonte pikkused lineaarmõõdus vahetult pikkuste mehaaniliste ekvivalentide abil. Selle rühma seadmetest on kasutusel vintsloodid, käsiloodid ja sügavuse mõõtelatid. Neid kasutatakse rohkete vesikasvudega veekogudes ja loodimisel vesiehitiste (kaid, sillasambad jms) vahetus läheduses, kus kajaloodi helilained võivad olla kõrvalpeegelduste tõttu moonutatud. Käsiloodide raskused peaksid olema 150 mm läbimõõduga ja 3,2 kg raskused roostevabast materjalist kettad, milles on neli tollise läbimõõduga auku [EM 1110–2–1003, 2002].

Optikaseadmed. Merepõhja pinnamoe uurimisel kasutatakse fotograafia ja valguslokatsiooni võimalusi. Vastavate seadmete kasutamise efektiivsuse ja ulatuse määravad merevee optilised omadused, merepõhja pinnamoe vormide mõõtmed, sügavus ning peegeldusomadused.

Merevee optilised omadused olenevad põhiliselt vee puhtusest, selles lahustunud tahketest ainetest ja tahketest lisanditest – hõljumist.

Vett läbiv valgusvoog neeldub (osaliselt) ja hajub. Sügavuse suurenemine kutsub esile valguse nõrgenemise. Kõik see mõjutab mõõtmiste kvaliteeti, eelkõige täpsust.

Merepõhja reljeefi uurimiseks pildistamise abil kasutatakse enamasti aerofotograafiat. Vastavat aparatuuri kannavad lennukid ja kopterid.

Merepõhja mikroreljeefi uuritakse allvee-stereoaparatuuriga. Selleks suletakse fotokaamerad veekindlatesse kestadesse. Valgusallikatena kasutatakse võimsaid impulss-seadmeid. Stereovõtted annavad merepõhja ruumilise kujutise. Tulemusi halvendavad aga merevee väike läbipaistvus, pinnase spektraalsed erinevused ja valguse peegeldumine veepinnalt.

Aerolasersondeerimise (*Airborne laser sounding* – ALS) eeliseks aerofotograafia ees on asjaolu, et laserkiir tungib vees sügavamale kui valguskiir (lõunameredes isegi üle 50 m).

Hüdroakustiliste seadmete töö aluseks on ultraheli vees levimise seaduspärasused ning omadus peegelduda tihedama keskkonna piirilt, mistõttu on need peamised merepõhja reljeefi mõõdistamise vahendid. Eristatakse nelja hüdroakustilise seadme põhitüüpi: ühekiirelised kajaloodid (*Single beam echo sounders* – **SBES**),

kajatraalid (*Multiple transducer sweep*), mitmekiirelised kajaloodid (*Multibeam echo sounders* – **MBES** või *Multibeam sonar systems* **MBSS**) ja külgvaatesonarid.

Tuleb märkida, et sageli nimetatakse ka kajaloode sonariteks[32], kuid see ei ole täpne, sest sonarite või sonartehnika või sonarsüsteemide alla kuulub suhteliselt lai nomenklatuur seadmeid, mis on seotud infohanke ja -edastusega vees rõhulainete abil. Sinna kuulub näiteks ka mitmesugune militaartehnika, nagu kuuldepoid (passiivsed sonarid), hüdrolokaatorid jms [Arro, 1998].

Peale eelnimetatud liikide kasutatakse mereuuringuteks veel **kaugseiret.** Okeanograafia uuringuteks võib kasutada näiteks **satelliitaltimeetriat,** kus veetaseme üldistatud määramiseks rakendatakse satelliidile paigutatud mikrolaine radarit kandevsagedusega 13...14 GHz (sellel sagedusel peegeldab ookeani pind kõige paremini). Okeanograafiline satelliit Topex/Poseidon ja selle uuemad Jason tüüpi variandid kordavad oma Maa pinnal mõõdetud trassi 10 päeva järel. Aparatuur määrab ookeani pinna kõrguse radari abil ja põhjareljeefi suurte elementide olemasolu ookeani pinna kõrgusanomaaliate järgi keerukate arvutuste abil. Saadud andmete põhjal saab leida ookeanide hoovuseid mõjutavaid või tööndusliike mereolevuste eluks sobivaid suuri põhjareljeefi elemente, teha nafta ja gaasi leiupaikade uuringuid jms. Kuid navigatsioonikaartide koostamiseks on satelliitaltimeetria eraldusvõime liiga väike. Kaugseires kasutatakse veel teisigi satelliite, mitmesuguste globaalsete ülesannete lahendamiseks, näiteks raskuskiirenduse andmete kogumiseks ehitatud satelliidid LAGEOS, CHAMP, GRACE, GOCE, ent ka nende mõõtmisseadmed on vastavate **terrestriliste** (st maismaa-) meetoditega võrreldes madalama eraldusvõimega ning väiksema ulatusega raskuskiirenduse muutused jäävad märkamatuks.

Kaugseire alla võib lugeda põhimõtteliselt ka optilised meetodid, nagu aerofotograafia ja aerolasersondeerimise (ALS), kuid nendest täpsemalt edaspidi.

6.2. Ühekiirelised kajaloodid

Kajaloodid (leiutas füüsik A. Behm 1913. a) mõõdavad laeva põhja alla paigutatud ultrahelikiirgurist lähtuva helisignaali merepõhja jõudmiseks ja sealt peegeldunud signaali tagasisaabumiseks kuluvat aega.

Kajaloodiga sügavuse leidmise põhimõtteline valem on

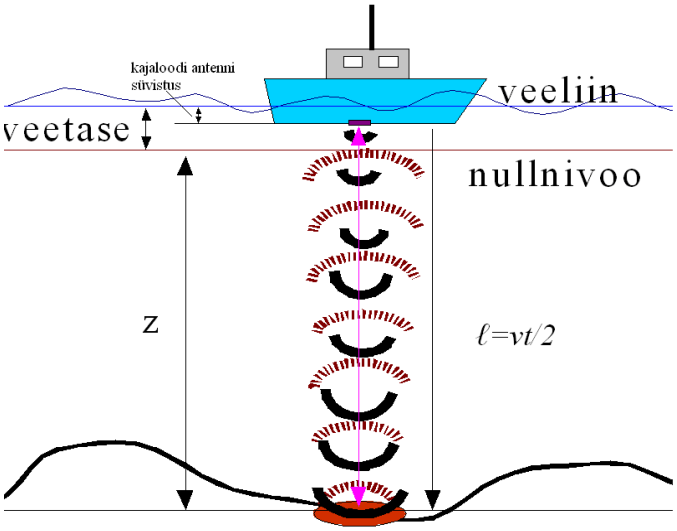
$$z = c\frac{t}{2}, \qquad (6.1)$$

kus c on helikiirus, t – aeg, mis kulub helisignaali merepõhja ja sealt tagasi jõudmiseks. Tõelise sügavuse saame põhimõtteliselt, kui kajaloodi antenni sügavusele

[32] *Sound Navigation and Ranging* (akustiline navigatsioon ja kauguse mõõtmine).

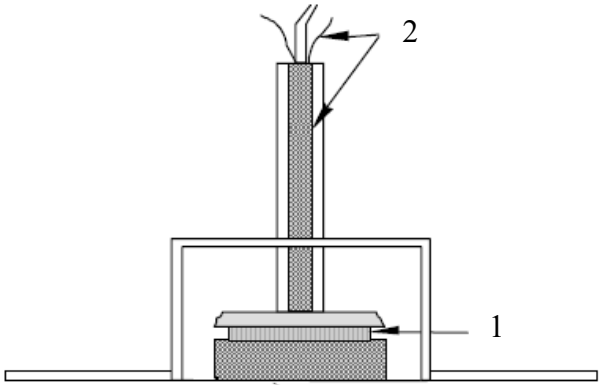
liidame kajaloodi antenni süvistuse veeliinist ja lahutame vee (hetke)taseme nullnivoo suhtes (vt joon. 6.1)

Kogu mõõdistussüsteemi tööd juhib sünkroniseeriv seade (ühtse aja juhtsüsteem), üldjuhul GNSS pardavastuvõtja, mille täpsus on ± 100 ns GPSi ajastandardi järgi [Parker, Mallace, 2005], mis töötsükli algmomendil aktiveerib sondeeriva signaali allika ja saatja ning tagab antenni kommutaatori sellise asendi, et signaal jõuab muundursensorini. Signaaliga edastatud elektriline impulss sunnib muundurantenni diafragma vibreerima. **Piesoelektrilise muundurantenni** (joon. 6.2) puhul on kvartsplaat asetatud kahe metallplaadi – elektroodi vahele. Rakendades elektroodidele kiiresti vahelduvat elektripinget, hakkab kvartsplaat võnkuma, sest erinimeliste elektrilaengute tõttu plaat kas paisub või tõmbub kokku.



Joonis 6.1. Hüdroakustiline sügavuse mõõtmine. ℓ– kajaloodi antennist esmaselt mõõdetud sügavus. Helikiirus vees on tähistatud v; Z – nullnivoost (vt alajaotis 4.2) määratud sügavus. Pane tähele: laeva kajaloodi tase, veeliin (hetketaseme ja laeva lõikejoon) ja nullnivoo ei ühti, seega tuleb kasutada nullnivoole taanduse parandeid. Joonisel peegelduvad helilained punasest alast põhjas [Väling, 2005]

Kuna muundurantenni välispind puutub kokku veega, siis tekitab see vibratsioon suunatud akustilise laine, mis jõuab veekogu põhjani, peegeldub sealt, ja see osa, mis saabub tagasi diafragmale, sunnib selle uuesti vibreerima. See uus vibratsioon genereerib kindla sagedusega elektrivoolu, mis läheb parameetrite mõõturisse ja annab ajamõõtjale lõppimpulsi.



Joonis 6.2. Piesoelektriline muundurantenn kvartskristallplaadiga (1), (2) – kuumakindel kõrgsageduskaabel [De Jong jt, 2010]

Muundurantennides kasutatakse ka magnetostriktsiooni, mille puhul ferromagneetikud magneetumisel pikenevad magnetvälja suunaga ühtivas ja ristuvas suunas ning muundavad vahelduvvooluenergia võnkeenergiaks. Tänapäeval kasutatakse siiski põhiliselt elektrostriktsiooni, mille puhul tekitab võnkumise dielektriku deformatsioon vahelduva tugevusega elektrivälja mõjul. Need on tööpõhimõttelt võrdlemisi sarnased piesoelektrilistega, kuid palju kergemad.

Kajaloodi tehniliste karakteristikute orienteeruval määramisel on vaja teada helisignaali minimaalset intensiivsust min I_c, mis tagab müra ja häirete antud intensiivsuse juures peegeldunud signaali õige vastuvõtu ettenähtud tõenäosusega.

Ka heliimpulsside väljastusperiood peab olema suurem ajast Δt, mida signaal vajab kauguse $2z$ läbimiseks, sest muidu hakkavad peegeldunud impulsid väljastatavaid impulsse segama. Heliimpulsside sagedus

$$f_{vp} < \frac{c_0}{2z}. \tag{6.2}$$

Impulsi kestus $\tau_{\ell v}$ määrab kajaloodi lahutusvõime, s.o objektide minimaalse vahekauguse, mille korral neid on veel võimalik eraldi registreerida. Tavaliselt antakse see suurus ette mitterange võrratusega

$$max\,\tau \le \frac{z}{3c_0}. \tag{6.3}$$

Et vältida mõõtmisvigu, mis tekivad merepõhja ebatasasusest, peab signaali ruuminurk Ω olema võimalikult väike. Selle vähendamiseks tuleb suurendada kiirgava pinna joonmõõtmeid ja kajaloodi töösagedust f_0. Teisest küljest, mida suurem on sagedus, seda suurem on ka võimsuskadu. Üldjuhul kasutatakse sügavustel kuni 100 m sagedusi üle 200 kHz, sügavustel üle 100 kuni 1500 m sagedusi 200...50

kHz, sügavustel üle 1500 m sagedusi 50...12 kHz [IHO Manual, 2011]. Siinjuures töösagedus $f_0 = c_0/\lambda$, kus λ on impulsi lainepikkus.

Kajaloodi eeliseks teiste sügavusmõõtevahendite ees on tema suur mõõtmistäpsus ja lahutusvõime. Kaasaegseid kajaloode on võimalik lülitada laevajuhtimise automatiseeritud süsteemi ja nii saab pidevalt informatsiooni merepõhja reljeefi ja sügavuse kohta (joon. 6.3).

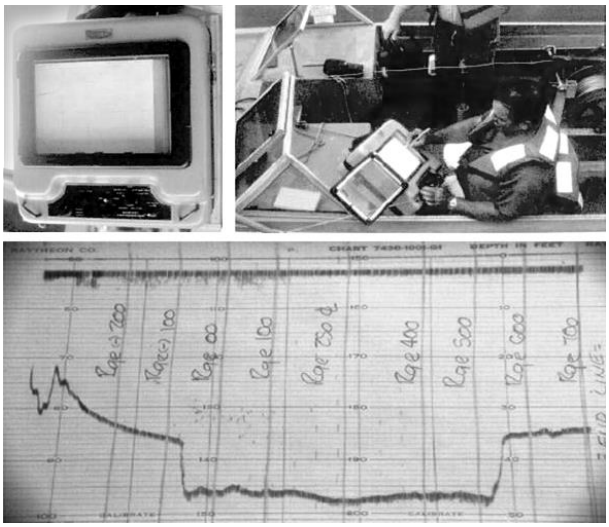
Kajaloodi peegeldunud signaali tugevuse (EE) olenevust kasutustingimustest võib väljendada alljärgneva **(**6.4**) sonari võrrandiga [**IHO Manual, 2011]

$$EE = SL - 2TL - (NL - DI) + BS - DT, \qquad (6.4)$$

kus *SL* on antenni tase; *TL* **–** edastuskadu; *NL* – müratase; *DI* **–** suunaindeks; *BS* – tagasipeegelduse tugevus; *DT* – tuvastuslävi, oleneb kasutatavast süsteemist. Võrrandi komponendid leitakse valemitega (6.5) … (6.9) ja väljendatakse detsibellides (dB), kusjuures detsibell on logaritmiline mõõtühik ja väljendab mõõdetud väärtuse ning lähteväärtuse suhet (6.5).

$$SL = 10\log\frac{I_I}{I_{Ref}}, \qquad (6.5)$$

kus I_I on akustilise signaali intensiivsuse ruutkeskväärtus 1 meetri kaugusel antennist; I_{Ref} – taustintensiivsus 1 μPa [IHO Manual, 2011].



Joonis 6.3. Ülal vasakul – kajaloodi monitor; ülal paremal – hüdrograaf mootorpaadis oma töölaua taga; all – ühekiirelise kajaloodi kajagramm[33], kus jäme joon ülaservas tähistab veepinda ja osaliselt jäme joon alaosas tähistab veekogu põhja profiili [EM 1110-2-1003, 2002]

[33] Kajagramm – tänapäeval halsi põhjaprofiil ja veepinnajoon arvuti monitori ekraanil.

Signaali edastuskadu valemis (6.4) avaldub valemiga

$$\mathrm{TL} = 20\log r + ar, \tag{6.6}$$

kus r on peegeldava pinna kaugus muundurantennist (m); a – neeldumiskoefitsient (oleneb vee füüsikalis-keemilistest omadustest ja signaali sagedusest).

Signaali müratase valemis (6.4) avaldub valemiga

$$\mathrm{NL} = N_0 + 10\log W, \tag{6.7}$$

kus N_0 on inimtekkeline ja looduslik spektraalne müratase (viimase näiteks lained, vihm, mereorganismid jms); W– muundurantenni impulsi ribalaius vastuvõtu ajal.

Suunaindeksi valemis (6.4) leiame valemiga

$$\mathrm{DI} = 10\log \frac{2L_1}{\lambda}, \tag{6.8}$$

kus L_1 on ristkülikukujulise muundurantenni pikkus laeva pikitelje suunal (m); λ – kajaloodi impulsi lainepikkus ($L >> \lambda$).

Signaali tagasipeegelduse tugevuse valemis (6.4) leiame järgmistest valemitest:

$$\mathrm{BS} = \mathrm{SB} + 10\log A \text{ dB},$$

$$\text{vertikaalkiire puhul SB} \sim -15 \text{ dB}, \tag{6.9}$$

$$\text{kaldkiire puhul SB} \sim -30 \times \cos^2\beta \text{ dB},$$

kus A on põhjaala (jälgpind), millelt peegeldub impulss (m^2); β – impulsi langemisnurk. Siin toodud tagasipeegelduse koefitsiendi SB väärtused võivad varieeruda ± 10 dB.

Ühekiirelise kajaloodi puuduseks on asjaolu, et mõõdistamishalssidevahelised alad jäävad üksikasjalikult uurimata. Seepärast on loodud mitmekiirelised kajaloodid, mis võimaldavad mõõdistada merepõhja pinnamoodi ettenähtud riba kogu pindala ulatuses.

Käesolevas õpikus vaadeldakse eeskätt siiski ühekiirelisi kajaloode, sest viimaste alusel on kajaloodi üldisi tööpõhimõtteid ja parandeid lihtsam selgitada. Neid küsimusi käsitletakse peatükkides 7 ja 8. Mitmekiirelisi kajaloode puudutatakse vaid niivõrd, et üliõpilased aduksid nende konstruktsioonilisi erinevusi ja sellest tulenevat erinevat mõõdistamistehnoloogiat. Andmetöötluse erinevused ei kuulu hüdrograafia aluste ainesse, vaid seda käsitletakse hüdrograafilise andmetöötluse praktikumides.

6.3. Helikiire (impulsi) suuna ja laiuse reguleerimine

Üksiku kiire laius oleneb muundurantenni mõõtmetest ja akustilise impulsi sagedusest. Seega saab kajaloodi impulssi käsitleda nii kiirena kui ka laineprotsessina. Teades helikiirust vees (c) ja impulsi sagedust (f), leiame lainepikkuse.

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{6.10}$$

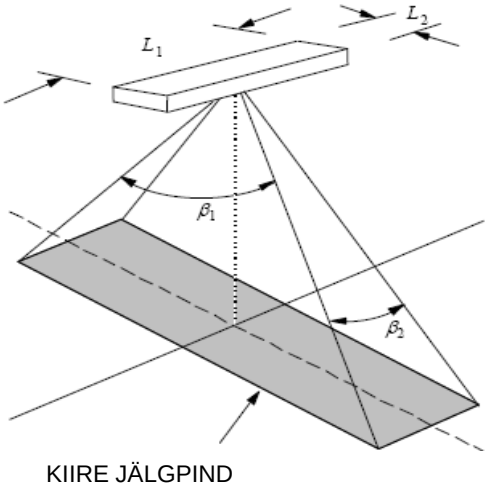
Nüüd saab arvutada ringikujulise ristlõikega ja diameetriga D muundurantenni kiire avanurga (tasemel miinus 3 Db, st kaugusel muundurantennist kuni punktini, kus signaali ja tausta intensiivsuste suhe on 0,001) valemiga

$$\beta_w = \frac{60\lambda}{D} \ (^{\circ}). \tag{6.11}$$

Ristkülikukujulise muundurantenni puhul (joon. 6.4) pikkusega L_1 ja laiusega L_2 saame samal kaugusel muundurantennist kiire pikkuse avanurgaks β_1 ja laiuse avanurgaks β_2

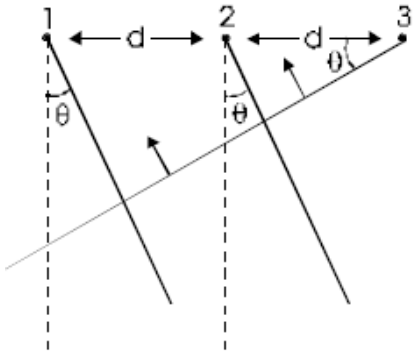
$$\beta_1 = \frac{50\lambda}{L_1}; \ \ \beta_2 = \frac{50\lambda}{L_2} \ (^{\circ}). \tag{6.12}$$

Kui siinjuures arvestame, et lainepikkus λ oleneb helikiirusest vees c ja impulsi sagedusest f, siis võib konstateerida, et jälgpind oleneb ka impulsi sagedusest.



Joonis 6.4. Ristkülikukujulise muundurantenni moodustatud kiire jälgpind

Kiire suund on üldjuhul risti muundurantenni võrega, kuid mitmekiireliste kajaloodide antennivõrede puhul on kiire suunda sageli tarvis muuta kiire stabiliseerimiseks või vastuvõtufaasis kiire moodustamiseks.



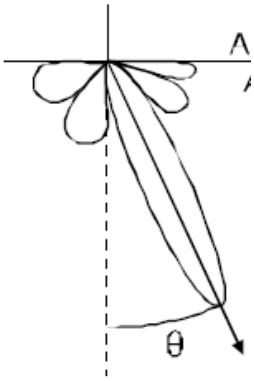
Joonis 6.5. Lainefront kohtub antennivõrega nurga θ all [SeaBeam Instruments, 2000]

Vaatleme juhust, kui lainefront kohtub antennivõrega nurga θ all (joon. 6.5). Seega läbivad helilaine osad erinevaid teepikkusi, muutes nii kulgemisaega, jõudmaks hüdrofoni[34] eri elementideni (1, 2, 3). Kui hüdrofonielementide vahekaugus on d ja helikiirus c, saame kohamäärangu hilistuseks

$$\Delta t = \frac{d \cdot \sin\theta}{\mathrm{c}}, \tag{6.13}$$

mis tekitab signaali faasinihke. Teades neid hilistusi, võib tekitada antennivõre maksimaalset tundlikkust teatud nurga θ puhul vertikaalist, kus lainefrondid segunedes võimenduvad, mida nimetatakse kiire juhtimiseks või roolimiseks. Siinjuures peab meeles pidama, et antenni endaga midagi ei juhtu, muutub ainult andmetöötlus. Nii on võimalik moodustada hulk virtuaalseid antenne, mis on kõrge tundlikkusega suure arvu kaldenurkade θ puhul.

[34] Hüdrofon – üldnimetus seadmetele, mida kasutatakse vees levivate helivõngete vastuvõtmiseks ja nende elektrivõngeteks muundamiseks.



Joonis 6.6. Pealiistak on kallutatud nurga θ võrra pärast hilistuse rakendamist. Kõrval on abiliistakud palju väiksema tundlikkusega [SeaBeam Instruments, 2000]

6.4. Mitmekiirelised kajaloodid

Mitmekiirelised kajaloodid (MBES) on hüdroakustilised seadmed, mille abil teatavas sügavuses luuakse kitsas ruuminurgas suunatud akustiline väli, millel on suur ulatus vaid laeva külgsuundades. Akustilise välja generaatorid töötavad kajaloodi põhimõttel. Kiirgust genereeritakse spetsiaalsete antennide abil. See tagab suure täpsuse ja lahutusvõime. Harilikult kasutatakse ultrahelikiirguse saatmiseks ja vastuvõtmiseks eraldi antennivõresid, kusjuures projektor on orienteeritud laeva pikitelje suunale ja vastuvõtja (hüdrofon) sellega risti. Hüdroakustilise välja geomeetria iseärasuste põhjal jagatakse akustilised seadmed kahte liiki:

- seadmed, milles akustiline väli tekitatakse vertikaalsete kiirtega. Siinjuures paigaldatakse hulk akustilisi antenne pardavälistele kandjatele (hüdrograafilised traalsüsteemid – *Sweep Systems*);
- seadmed, milles akustiline väli tekitatakse kaldkiirtega (skaneerivad ehk lehviksüsteemid – *Swath Systems*). Akustilised antennid paigaldatakse sel juhul vahetult laeva kerele, kusjuures genereeritakse väikeste vahemike järel hulk elliptilise ristlõikega ultrahelisignaale, enamasti erineva sagedusega. Impulsside suunad muutuvad pidevalt, kusjuures ühes tsüklis on laeva teljega ristsuunaline avanemisnurk 120 ... 180^o ja laeva telje suunaline avanemisnurk 0,5 ... 2^o. Akustilise välja struktuurist lähtudes eristatakse **interferomeetrilisi** (vt 6.4.2) ja **kiiremoodustajaid** (*beamformer*) **süsteeme.**

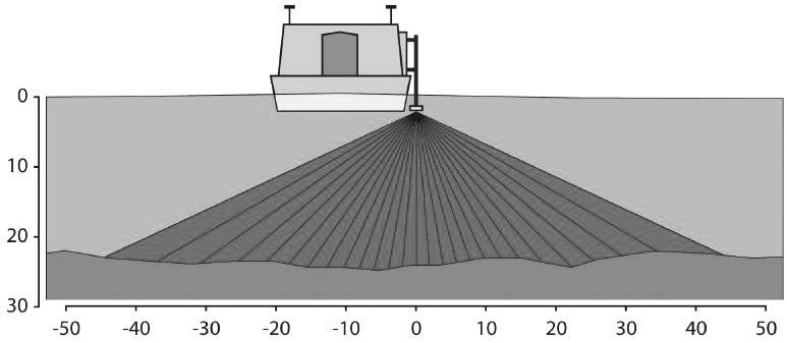
6.4.1 Kiiremoodustajad süsteemid

Kiiremoodustajad (*beamformer*) kajaloodid kuuluvad nn lehvikkajaloodide hulka. Sellist tüüpi kajaloode hakati kõigepealt kasutama militaarotstarbel 1960. aastate algul. Esimene tsiviilotstarbeline kiiremoodustaja kajalood Sea Beam Classic (hilisem firma Sea Beam) paigutati Austraalia mõõdistuslaevale HMAS Cook 1977. a. Tehnoloogia arenedes aastatel 1980–1990 hakati kiiremoodustajaid üha rohkem

kasutama navigatsioonilisel kaardistamisel ja geoloogilistel ning okeanograafilistel, aga ka merealuste nafta ja gaasi leiupaikade uuringutel ning merealuste kaablite trasseerimisel.

Enamik uuemaid süsteeme saadab välja lehvikukujulise impulsi (joon. 6.7), mis on mõõdistuslaeva pikitelje normaali suunas lai ja liikumissuunas kitsas (ligikaudu üks kraad). Kuivõrd loodimine kaldkiirega on väga tundlik mitmesuguste mõjutuste suhtes, tuleb pidevalt määrata püstõõtsumise, pikiõõtsumise, rullumise, seegamise[35] ja kursi parandeid.

1990. aastatel hakati kiiremoodustajaid laialdasemalt kasutama madalveealade (sadamad ja merekitsused) mõõdistamisel: 1998. a kehtestatud uus hüdrograafilise mõõdistamise standard nõudis 100% ülekatet ja kõrget täpsust, hüdrograafiliste traalide tootlikkus oli aga madal.

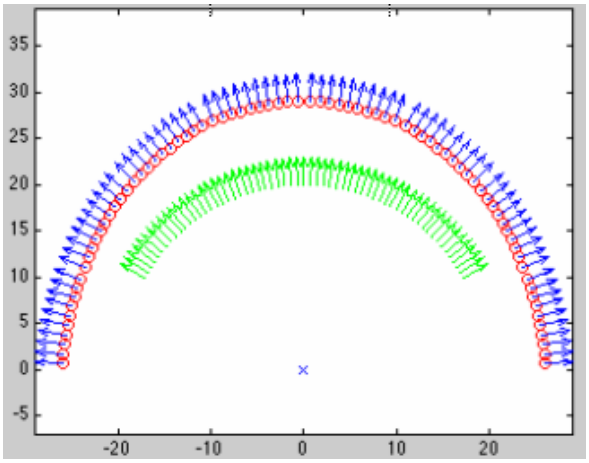


Joonis 6.7. Kiiremoodustaja signaalide lehvik [Griffin, 2016]. Horisontaalteljel on kaugused ja vertikaalteljel sügavused meetrites

Kiiremoodustajad süsteemid kasutavad suunafiltreid kas riistvaras (füüsikalised süsteemid) või tarkvaras (elektroonilised süsteemid), mis määravad iga üksiku kiire suuna. Süsteem otsib iga peegeldunud kiire maksimaalse amplituudi, mille suunal määratakse veekogu põhja kaugus signaali kulgemisaja järgi, kusjuures suuna saab peegeldunud maksimaalse amplituudiga kiire ja antenni vahelise kaldenurga järgi (arvestades sealjuures antenni kallet vertikaalist).

Seega, kiiremoodustaja on suunafilter, mis talitab antennivõre sensoreid, selleks et võimendada **koherentse** (ajas muutumatu faasivahega) lainefrondi amplituudi taustamüra suhtes. Võimenduseks kasutatakse suundinterferentsi, kombineerides antennivõre elemente, nii et teatud suundades esineb tugevdav ja teatud suundades kahandav interferents. Joonisel 6.8 on kujutatud hüdrofoni antenni kaarvõret.

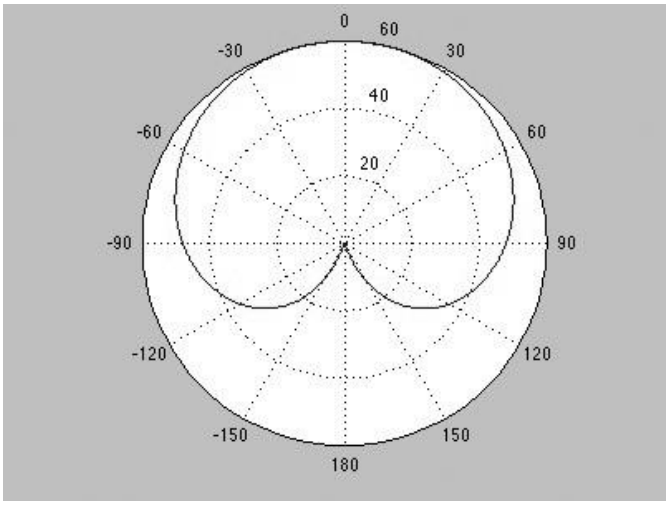
[35] Seegamine – laeva masskeskme sinusoidaalne võnkumine halsi suhtes, mis on põhjustatud hüdrometeoroloogilistest tingimustest, laeva mehhanismide töö ebastabiilsusest, kursi ja kiiruse indikaatorite inertsist ja vahiroolimehe individuaalsetest iseärasustest.



Joonis 6.8: Hüdrofoni antenni kaarvõre [Allen, 2016]

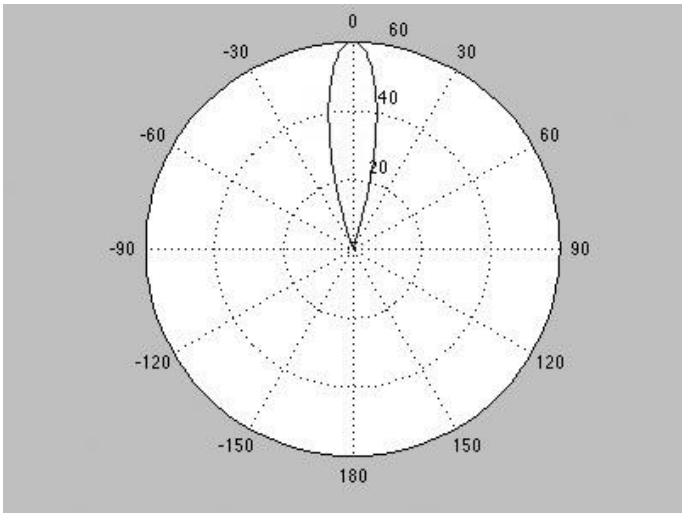
Igal sensoril (punane kaar) on teatud koordinaadid (*x*, *y*), kusjuures sensorid on sihitud teatud suundadele (sinised nooled), aga me soovime saada kiiri, mis peavad olema sihitud valitud suundadele (rohelised nooled). Sensorite sihitud suundi nimetatakse maksimaalse tundlikkuse suundadeks (MTS).

Nende sensorite tundlikkuse graafik on joonisel 6.9 esitatud polaardiagrammil, kus nurk on hälve MTS suhtes ja raadius on amplituudi näitaja (dB) antud suunal. Elementide tundlikkus (määratud 3 dB lähtepunkti suhtes) on väga lai, antud juhul ligikaudu 90º.



Joonis 6.9. Kiiremoodustaja sensorite tundlikkuse polaardiagramm [Allen, 2016]

Kiiremoodustaja eesmärgiks on liita paljud elemendid, et saavutada kitsamat tundlikkust valitud suunal MTS (joon. 6.10), mis tähendab, et kui võtame vastu teatud kiire signaali, siis teame ka, millisest suunast see tuleb (tegelikel sooritustel saame küll ka nn külgliistakud, st võimsustundlikkuse abisektorid (vt joonis 6.6), ja tühiväärtused, mida siinkohal aga ei vaadelda).



Joonis 6.10. Valitud suuna tundlikkuse diagramm [Allen, 2016]

Ajadomeeni kiiremoodustamine toimub aeglustades ja muundurantennide varjestatud väljundeid lisades. Sensorite väljundite valikuline varjestamine tehakse selleks, et parandada kiire ruumilise tundlikkuse näitajaid, see protsess on ligikaudu sarnane „akendusega“ digitaalses signaalitöötluses (DSP). Iga kiir formeeritakse sensori elementide aeglustamise ja summeerimise teel. Siinjuures peab märkima, et me ei vaja iga kiire jaoks kõiki sensoreid. Kuna antennivõre on kumer, siis iga sensor toetab iga kiirt eraldi. Kui võreelemendi ja kiire suund ühtivad, siis tundlikkus on kõrge. Elemendid, mille tundlikkus jääb alla teatud lävendit, nullitakse välja ja kiiri moodustatakse ainult mitte-nullelementidest.

Kiiremoodustaja süsteem kasutab tänapäeval üldjuhul kuni 512 kiirt, kusjuures naaberkanalid suurel määral kattuvad. See ei ole nii müratundlik kui interferomeetriline, st signaali/müra suhe on suur ja halbade punktide protsent suhteliselt väike.

Tänapäevased kiiremoodustajad kasutavad näiteks sagedusi 293, 300, 307 kHz, kusjuures kahepoolse antenniseade puhul on enamasti töösügavus kuni 200 m ja lehviku avanurk on kuni 200º (nt Kongsberg EM 3002).

Erijuhtudel kasutatakse ka väiksema sagedusega instrumente, näiteks Kongsberg EM 122, mis kasutab töösagedust 12 kHz ja võimaldab seetõttu mõõta sügavusi kuni 11 000 m. Mõõdistatava riba laius võib ulatuda kuuekordse sügavuseni, kuid

maksimaalselt 30 km. Kahekordse lehviku avanurk on 140° ja maksimaalne kiirte arv 864. Vajaduse korral võib kasutada vähendatud lehviku laiust, kusjuures kiirte arv jääb samaks, st tihedus tõuseb. Koos **põhjakihtide profileerijaga** SBP 120/300 on võimalik määrata ka merepõhja kihistust.

Kiiremoodustaja muundurantennide paigutusel võib esineda kolm moodust: antenni võib kinnitada laeva kiilule, paigutada teisaldatavalt või pukseerida. Esimesel juhul võib olla kolm varianti:

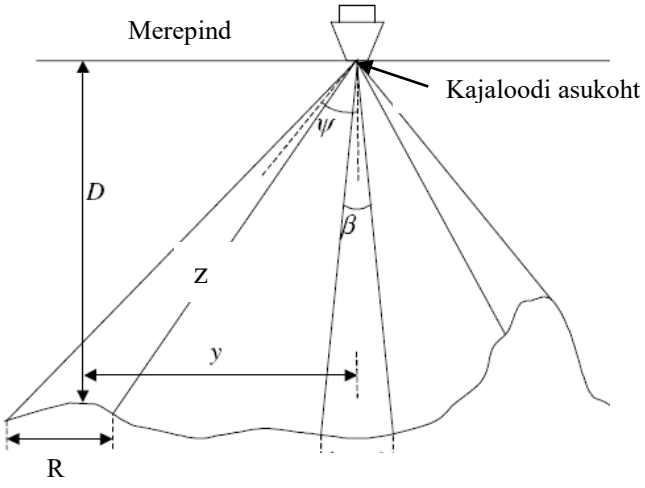
- muundurantenn kinnitatakse laeva kere (kiilu) välispinnale. See meetod ei vaja erilisi kinnituskonstruktsioone, kuid puuduseks on laeva enda müra mõju;
- muundurantenn paigutatakse väiksesse voolujoonelisse konstruktsiooni laeva kere välispinnale. See vähendab mööduva vee müra, kuid nõuab spetsiaalset kaitsekonstruktsiooni;
- muundurantenn paigutatakse laeva kiilu alla gondlisse. Seda moodust kasutatakse süvavee suurte muundurantennide puhul. Eelised ja puudused on nagu eelmisel, lisaks suureneb laeva süvis ning on oht gondlit vigastada.

Teisel juhul paigutatakse muundurantenn laeva käila või küljele. Kasutatakse väikestel mõõdistuslaevadel madalveealade loodimisel. Muundurantenni kinnituskonstruktsioon peab olema jäik.

Kolmandal juhul (külgvaatesonari puhul) on muundurantenn pukseeritav.

Kuivõrd sügavuse kasvades lehvik laieneb, siis lehviku jälgpind veekogu põhjas on lehviku esialgselt kiiratud pinnast tunduvalt laiem. Põhja konaruste tõttu peegeldub tagasi hulgaliselt elementaarsignaale, mis annavad informatsiooni eeskätt põhja sügavuse kohta kiiritatud riba erinevates punktides.

Kiirte arv, nende moodustamise meetodid ja infotöötlus võib erinevate mudelite puhul oluliselt erineda.



Joonis 6.11. Kajaloodi lehviku tipunurga ψ ja jälgjoone R suhe [de Jong jt, 2010], β - kiire avanurk, y - kiire jälgpinna kaugus kajaloodi vertikaalist

Üksiku kiire jälgpinna asukoha (sügavus z ja hälve kajaloodi vertikaalist y) saab valemitega

$$z = 0{,}5c \times \Delta T \times \cos\psi, \qquad (6.14)$$
$$y = 0{,}5c\Delta T \times \sin\psi,$$

kus c on akustilise laine levikiirus keskkonnas; z – põhja sügavus; y – kiire jälgpinna kaugus kajaloodi vertikaalist (eeldatakse, et viimased kaks on korrigeeritud aluse rullumise, pikiõõtsumise, püstõõtsumise ning seegamise paranditega). Akustilise refraktsiooni parandi leidmiseks igale kiirele peaks olema määratud helikiiruse profiil vees. Mõõdistushalsside vahekaugus peab tagama ribade ülekatte.

Olgu kiire avanurk β (joon. 6.11). Vertikaalkiire puhul $\psi = 0^o$ ja laeva kursiga ortogonaalse jälgjoone pikkus on r, kaldkiire puhul ($\psi > 0^o$) on jälgjoone maksimaalne pikkus R. Nende väärtused saab järgmiste valemitega.

$$r = 2z \cdot \tan\frac{\beta}{2}$$
$$R = z\left[\tan\left(\psi + \frac{\beta}{2}\right) - \tan\left(\psi - \frac{\beta}{2}\right)\right] \qquad (6.15)$$

Näiteks süvavee-kajaloodi puhul on $2^o \times 2^o$ ristlõikega kiire jälgjoon 500 m sügavusel ligikaudu 17 m ja jälgpind ~ 290 m^2. Kui süsteemil on lehviku maksimaalne avanurk 140^o (70^o kummalegi poole vertikaaltelge), siis impulsi maksimaalne jälgjoon sügavusel 500 m on ligikaudu 136 m ja jälgpind ~ 2310 m^2, kusjuures jälgpind kasvab sügavusega.

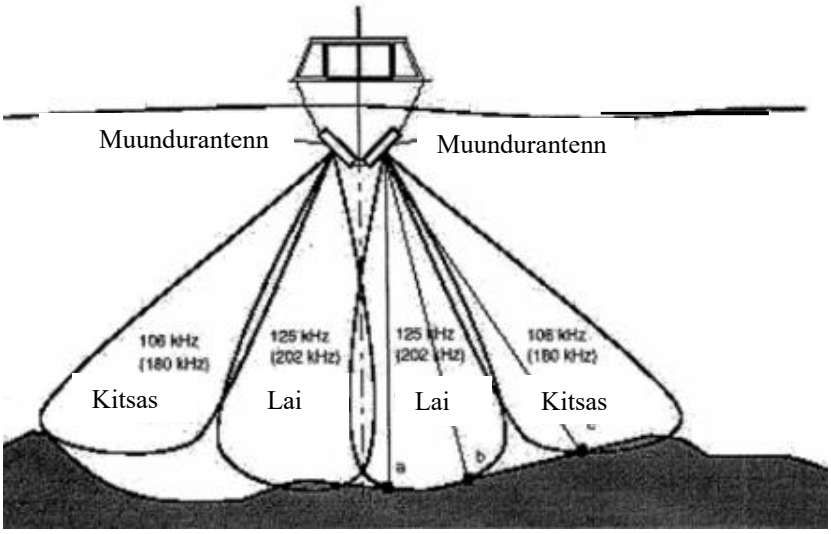
Siinjuures peab märkima, et ka jälgpinna mõõdetud sügavuse viga on lehviku suurte avanurkade puhul suurem, hoolimata kasutatavatest paranditest. Mõõdistussüsteemides on üldjuhul nõutav, et rullumine ja pikiõõtsumine oleksid määratud täpsusega 0,05^o, kurss täpsusega 0,2^o ja püstõõtsumine täpsusega 5–10 cm [IHO, Manual, 2011].

Kui arvestada ka aparatuuri elektroonikasüsteemis esinevaid vigu, siis kiiremoodustajate lehvikkajaloodide olulisemad mõõtmisvead on järgmised:

- aparatuuri elektroonikasüsteemi vead, mis mõjutavad mõõdetud pikkust kajaloodi antenni ja põhja peegelduspunkti vahel;
- kiire laiusest (avanurgast) tingitud sügavuse mõõtmise viga (sama nagu ühekiirelistel kajaloodidel);
- aparatuuri elektroonikasüsteemi häiretest tingitud kiire nurga vead; selle vea mõju kasvab koos lehviku avanurga ψ suurenemisega; viga on palju suurem kui ühekiireliste kajaloodide puhul;
- refraktsioonist tingitud akustilise leviku vead, mis kasvavad koos lehviku avanurga suurenemisega;
- laeva asendist tingitud vead (rullumine, pikikõikumine ja seegamine), mis kasvavad koos lehviku avanurga suurenemisega.

6.4.2. Interferomeetrilised süsteemid

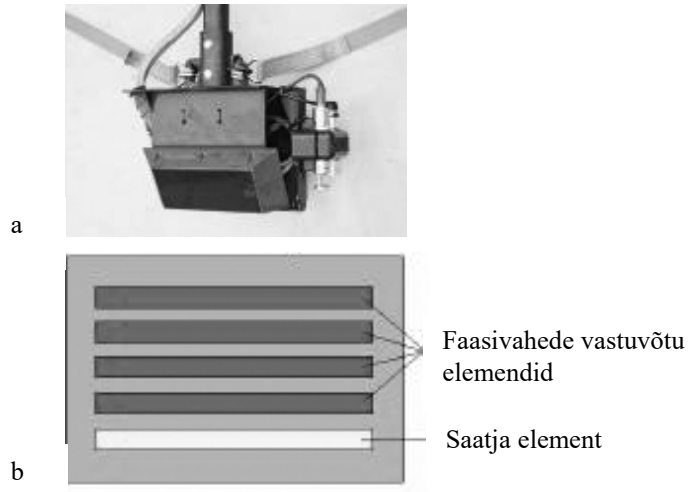
Interferomeetriline süsteem (nimetatakse ka faasimõõtja kajaloodiks ehk PDBS, st *Phase Differencing Bathymetric Sonar*) kasutab kummaski muundurantennis (joon. 6.12) kahte või enamat üksteise kohal asetsevat antennivõret. Üks neist moodustab laeva liikumissuunaga perpendikulaarsed lehekujulised ultraheliimpulsid, need peegelduvad põhjakonarustelt hulga erineval ajal saabuvate impulssidena ja võetakse vastu teise antennivõrega (joon. 6.13). Iga kiire ja antenni vaheline nurk määratakse selle kiire faasi mõõtmise abil. Põhja kaugused saadakse signaali kulgemisaja järgi. Kummalegi poole laeva kiiratakse üks või kaks impulssi (viimasel juhul on välimised madalama sagedusega).



Joonis 6.12. Atlas Fansweep 20 interferomeetrilise süsteemi kiiratud elliptilised signaalid. Välimised on madalama sagedusega. Sulgudes olevaid sagedusi kasutatakse 200 kHz aparatuuri puhul. Süsteem võib kasutada ka kiiremoodustaja režiimi

Ühes tsüklis võetakse vastu 256...1440 peegeldunud punkti. Meetodil on suur eraldusvõime, mistõttu võib seda kasutada ka külgvaatesonarina. Süsteem on müratundlik ja sobib enam tasasele põhjale.

Interferomeetrilist mitmekiirelist kajaloodi ei peetud veel mõni aeg tagasi korrektseks veekogu põhjareljeefi mõõdistamise instrumendiks selle ülemäärase mõõtemääramatuse ning nadiiripiirkonna katte puudumise tõttu. Pealegi osutus süsteem madalaveelisel alal (mille mõõdistamiseks ta eeskätt oligi kavandatud) esialgu kohmakaks.



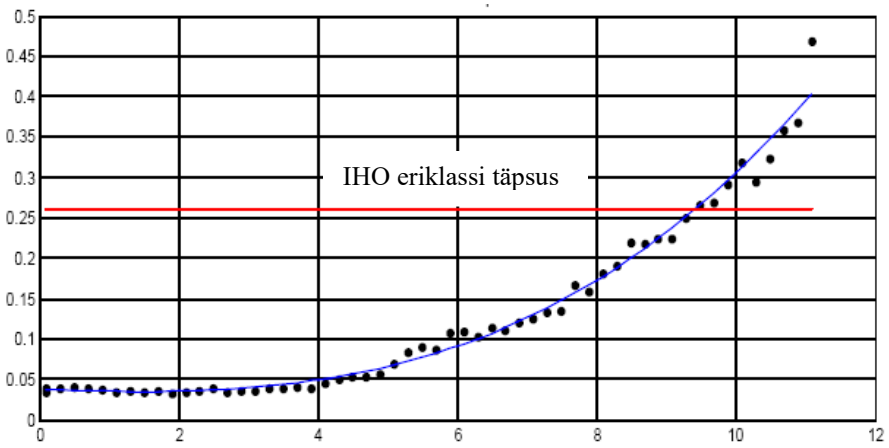
Joonis 6.13. *a* – GeoSwath interferomeetriline kajalood. Süsteemil on kaks muundurantenni, mis on kallutatud vertikaalist ~ 30°. Pane tähele ühekiirelist kajaloodi (nadiiri mõõdistamiseks) ja helikiiruse mõõtjat süsteemi paremal küljel; *b* – kajaloodi põhimõtte skeem [Gostnell, 2005]

Tänapäeval on see tehnoloogia aga kiiresti arenenud ja nüüdisaegsed interferomeetrilised kajaloodid on igati sobivad mõõdistamiseks nii madalaveelisel (sügavus kuni 35 m) alal kui ka suuremates sügavustes (sageli 50–200 m ning SRD Ltd 80 ATR isegi sügavuseni 1 km). Näiteks PDBS *Edge Tech* 6205 kombineeritult *Edge Tech* 6205 külgvaatesonariga annab tarnijate hinnangul hea eraldusvõimega (vt joon. 6.14) veekogu põhjareljeefi 3D-kaardi, kasutades kahesageduselisi külgskaneerimise ja sügavusmõõtmise andmeid. Süsteemi kanalite suur arv võimaldas oluliselt kõrvadada signaalide mitmeteelisuse mõjusid ja akustilist müra. Samuti kaeti mõõtmistega nadiiri piirkond. Analoogiliselt kiiremoodustajatega peavad tulemused olema parandatud rullumise, püstõõtsumise, pikiõõtsumise ja seegamise paranditega. Probleeme võib tekitada helikiiruse profiili muutus ajas ja ruumis.

Süsteemi eraldusvõime oleneb saadetud impulsi kiire läbimõõdust ja signaali ribalaiusest. Ribalaius W on põhifaktor, millest sõltub kauguse eraldusvõime ΔR:

$$\Delta R = \frac{c}{2W}, \tag{6.16}$$

kus c on helikiirus keskkonnas.



Joonis 6.14. *Edge Tech* 6205 vertikaalne mõõtemääramatus (sinine joon ja punktid) olenevalt mõõdistusriba laiusest 10 m sügavuse kordades. Horisontaalteljel – mõõdistusriba laius, vertikaalteljel – vertikaalne mõõtemääramatus meetrites tõenäosusega 0,95. IHO eriklassi mõõdistamise nõutav täpsus ± 26,1 cm on märgitud punase joonega. Pane tähele, et nõutav täpsus on tagatud ka siis, kui lehviku laius on üle 90 m [Brisson jt, 2014]

Mida suurem on ribalaius, seda kõrgem on vastuvõtva muundurantenni kauguse eraldusvõime (st ΔR on väiksem), mis kujutab endast võimet vahet teha peegelduva signaali ja mingi külgneva sihtmärgi vahel. Kuna muundurantenni ribalaius on proportsionaalne töösagedusega, siis suurema töösageduse korral kaasneb ka suurem eraldusvõime. Tänapäeval kasutatakse valdavalt lairibasignaale. Üldjuhul moodustab muundurantennide ribalaius 10% töösagedusest [Sărăcin, Calin, 2011], seega näiteks töösagedusel 250 kHz (250 000 Hz) ja keskmisel helikiirusel 1500 m/s on kajaloodi eraldusvõime 0,03 m.

Ka nurgaline eraldusvõime ($R\theta$ väiksus) on proportsionaalne sagedusega.

$$R\theta = \frac{c}{FL}, \tag{6.17}$$

kus F on töösagedus ja L – muundurantenni apertuur[36].

Nurgaline eraldusvõime on võime määrata tagasipeegeldunud signaali suunda. See oleneb kiire läbimõõdust θ_{bw}, mille võib esitada järgmiselt:

$$R\theta \approx \theta_{bw} = 0{,}89\frac{\lambda}{L}, \tag{6.18}$$

kus λ on akustiline lainepikkus.

[36] Apertuur – valgust läbilaskev ava optikasüsteemis.

Kuivõrd eeldatavalt tasasele põhja elementaarpinnale satub kaldkiire (langemisnurgaga ϕ) impulss, siis momentaanselt ei sondeerita mitte tervet jälgpinda, vaid ainult kiirega perpendikulaarset ala *A*.

$$A = \frac{\Delta R \times R\theta}{\sin\phi} = \frac{c}{2W\sin\phi} \times \frac{Rc}{FL}. \tag{6.19}$$

Võrrandist järeldub, et kiire (impulsi) poolt üheaegselt sondeeritav ala on võrdeline sonari ja jälgpinna vahelise kaldkaugusega *R* ja pöördvõrdeline töösagedusega *F* ning kajaloodi antenni apertuuriga *L*, mistõttu kõrgem sagedus toob kaasa kõrgema ruumilise eraldusvõime lehviku ristsuunas. Lisaks, kuna nimetajas on ka sagedusest olenev ribalaius *W*, siis ribalaiuse suurenemisega tõuseb ka eraldusvõime lehviku suunal.

Akustilise kiire ruumiline eraldusvõime erineb mõningal määral ülalkirjeldatust, olenedes veel jälgpinna mõõtmetest. Iga kiir toodab ühe sügavusmõõtmise. Veekogu põhja määrang kiire piirides sõltub nii selle jälgpinnast kui ka kiire läbimõõdu, langemisnurga ja sügavuse funktsioonist. Jälgpinna mõõtmed põiki laeva (lehviku suunal) L_o saab võrrandist

$$L_o = \frac{2z}{\cos^2\Phi} \tan\frac{\varphi}{2}, \tag{6.20}$$

kus *z* on mõõdetud sügavus, Φ – langemisnurk, φ – vastuvõetud kiire avanurk lehviku suunal.

Eeltoodust võib järeldada, et tasase pinna ja konstantse sügavuse puhul langemisnurga kasvades jälgpinna mõõtmed kasvavad. Seetõttu peaks eraldusvõime olema maksimaalne nadiiri piirkonnas ja vähenema järk-järgult lehviku äärealadel.

Sonari tõeline apertuur on piiratud kaugusest oleneva lehviku ristsuunalise eraldusvõimega. Selleks et saavutada kõrget lehvikusuunalist eraldusvõimet, tuleb kasutada väga kõrget sagedust ja väikest kaugust. Nii aga väheneb mõõdistusala kattuvuse aste ja meetod muutub ebapraktiliseks suurte alade mõõdistamisel. Sellele probleemile on leitud lahendus: kasutades töötlust sünteesapertuuriga, mille puhul järjestikused impulsid on koherentselt (faasivahesid muutmata) ühendatud, sünteesimaks pikemat antenni.

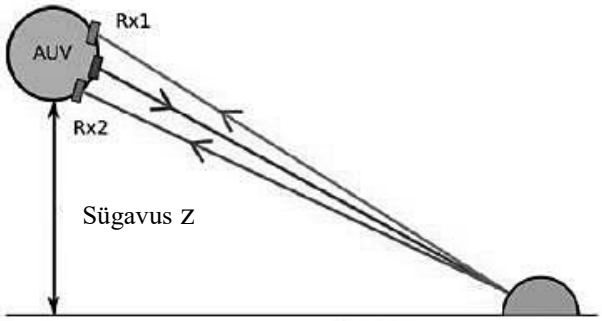
Liistakute **aladiskreetimise**[37] ärahoidmiseks tohib sünteesapertuuriga kajalood (SAS) liikuda impulsside vahel vähem kui pool vastuvõtja elemendi mõõdet. Kuna akustiliste lainete helikiirus (faasikiirus ja grupikiirus praktiliselt ühtivad) merevees ~1500 m/s on 2×10^5 korda madalam kui elektromagnetlainete kiirus oma keskkonnas, siis põhjustab see piiranguid, näiteks tuleb seetõttu kasutada liikumissuunas palju suuremat arvu elemente, selleks et tõsta ala kattuvuse astet.

[37] Diskreetimine – analoogsignaali väärtuste mõõtmine kindlate ajavahemike tagant selle muundamisel digitaalsignaaliks; aladiskreetimine - liiga väheste väärtuste saamine.

Teine oluline piirang on navigatsiooni täpsus. Navigatsioonivead, mis on suuremad kui sünteesapertuuri kohale jäävad lainepikkuse osad, põhjustavad sünteesapertuuri kujutise ebateravust. Kuna sünteesapertuuri pikkus kasvab koos kaugusega, siis navigatsioonipiirangud olenevad kaugusest. Seega, kujutise kvaliteet sõltub sageli kaugusest, isegi kui teoreetiline kujutise eraldusvõime seda ei eelda.

Väikestel alustel, näiteks AUV[38], ei suuda inerts-navigatsioonisüsteemid üksi tagada vajalikku navigatsioonitäpsust, mistõttu on kasutusele võetud mikronavigatsioonimeetodid, mis kasutavad andmete liiasust.

Interferomeetrilisele süsteemile nimetuse andnud interferomeetria all mõistetakse tagasipeegeldunud signaali suuna määramist, kasutades selle signaali hilistust erinevatel vastuvõtuelementidel (joon. 6.15).



Joonis 6.15. Signaali saabumise ajaline erinevus. *Rx1* ja *Rx2* – vastuvõtuelemendid [Torstein, 2011]

Kaugust *D* interferomeetriliste vastuvõtuelementide *Rx1* ja *Rx2* vahel nimetatakse baasjooneks. Eeldades, et üldjuhul on baasjoon väga väike, võrreldes kaugustega peegelduspunktini, võib lugeda saadetud ja peegeldunud kiired paralleelseks. Torstein (2011) pakub põhimõttelise valemi sügavuse (joon. 6.13 AUV sügavus *z*) leidmiseks.

$$z = r\left(\frac{c \times \tau}{z}\right), \tag{6.21}$$

kus τ on interferomeetriline hilistus vastuvõtuelementidesse jõudnud peegeldusimpulsside vahel.

Hilistuse hinnangu täpsus on signaali/müra (SNR) suhte funktsioon ja võib olla küllaltki kõrge. Sellegipoolest on faasivahe määramatu mooduliga 2π. On loodud mitmeid erinevaid meetodeid faasi „lahtimähkimiseks". $2z$ puhul püütakse leida

[38] AUV – (*autonomous underwater vehicle*) autonoomne allvee-uurimisaparaat merepõhja mõõdistamiseks suure eraldusvõimega.

selleks kõige tõenäolisem faasi väärtus, eeldades, et andmed on pidevad; multivastuvõtu- või multisagedussüsteemid kasutavad määramatuse lahendamiseks liigväärtusi ja ristkorrelatsioonil baseeruvaid meetodeid.

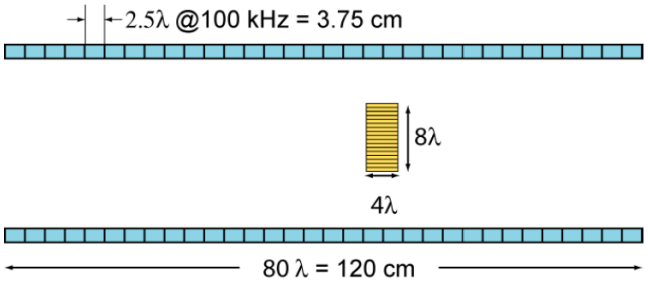
Hilistuse hinnangu täpsus on proportsionaalne baasjoone pikkusega. Viimast ei tohi aga liigselt suurendada, sest see võib vähendada signaalide koherentsust ja halvendada hilistuse hinnangu täpsust. Pealegi esinevad hilistuse hinnangul järgmised limiteerivad tegurid:

- ülekatte piirkondades võivad erinevatest suundadest tulnud signaalid seguneda ja koherentsus langeb ning hilistus ei lahene;
- varjestatud piirkondades kaob signaalide energia ja hilistust ei saa hinnata;
- signaalide mitmeteelisus, st nende peegeldused merepinnalt või mitmesugustelt objektidelt, võivad segada hilistuse hinnangut.

Vaatleme siinkohal ühte uuemat kahepoolse sünteetilise apertuuriga sonarit HISAS 1030 kahe täispika vastuvõtu antennivõrega kummalgi pool, mis on vajalik kujutise eristusvõime töötlemiseks. Kumbki antennivõre koosneb 32 elemendist pikkusega 3,75 cm (joon. 6.16). Kiirgurantenn on vertikaalselt faasitud võre, mis koosneb 16 $\lambda/2$ pikkusest elemendist (100-kHz sageduse puhul), mis tähendab, et kiiratud impulssi võib vertikaalselt juhtida eelistatavas suunas. Kuna kiirgurantenn ka salvestab vastuvõtu ajal, võib seda kasutada kui lühikest interferomeetrilist võret elementide vahekaugusega $\lambda/2$.

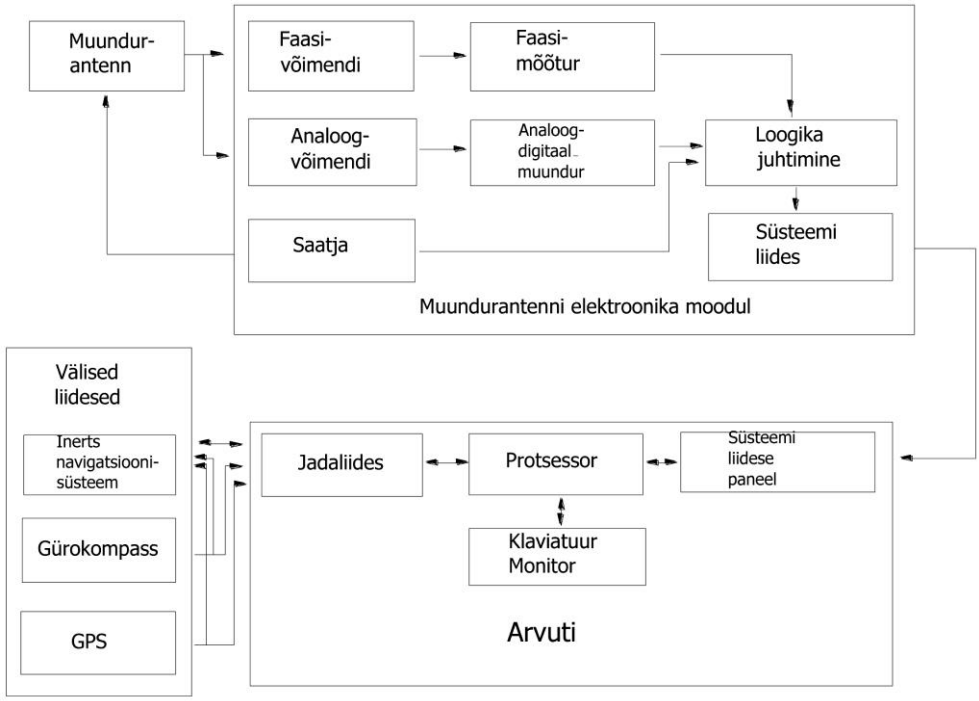
HISAS võib toimida sagedusel 50–120 kHz, kasutades üldjuhul ribalaiust 30 kHz sagedusel 100 kHz. Sellel ribalaiusel on andmeedastuskiirus ligikaudu 85 Gb/h. Lainekujud on lineaarsagedusega moduleeritud impulsid. Teoreetiline eraldusvõime standardmeetodil on 1,9 cm piki kulgemissuunda ja 2,5 cm risti sellega. Tegelik eraldusvõime 5 × 5 cm. Maksimaalne mõõtmiskaugus on umbes 400 m. Salvestatud andmed on sobitatult filtreeritud ja dünaamiliselt fokuseeritud reaalajas ja nii vastuvõtja kui ka külgvaatesonari andmed salvestatakse.

HISAS 1030 kandjaks kasutatakse sageli autonoomset allveeaparaati HUGIN 1000-MR.



Joonis 6.16. Sonari HISAS 1030 ühe poole skeem. Vastuvõtuelementidevahelise vertikaalse baasjoone pikkus on 30 cm (20λ 100-kHz sageduse puhul). Kiirgurantenn (kollane) asetseb ligikaudu 20 cm eespool antennivõredevahelise ala keskpunkti

Interferomeetrilise kajaloodi üks võimalikke tehnoloogilisi skeeme on joonisel 6.17.

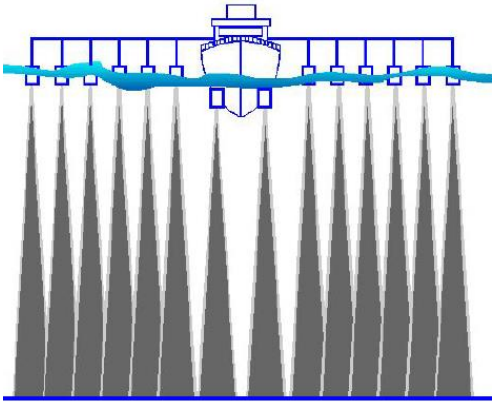


Joonis 6.17. Interferomeetrilise kajaloodi tehnoloogiline skeem. [WHSC, 2014]

6.4.3. Kajatraalid

Kajatraalide akustiline väli (mõõdistusriba) tekitatakse paljude ühekiireliste kajaloodidega (joon. 6.18), mis on paigutatud pardavälistele kandjatele enamasti meetrise vahekaugusega.

Veeteede Ameti kasutatud kajalood AHERO mõõtis sügavusi kuni 200 m, kusjuures sondeerimise signaalide ülekatte probleemid lahendati ajalis/ruumilise hõrenduse abil. Näiteks kahetaktilise variandi puhul toimisid esimeses taktis paaritunumbrilised kanalid ja teises taktis paarisnumbrilised kanalid, sügavuse suurenedes mindi üle neljataktilisele variandile. Vertikaalkiirtega mõõdistatava riba laius oli kuni 50 m.



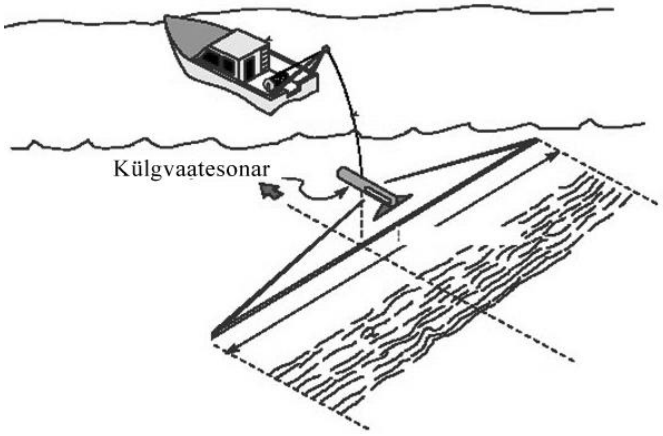
Joonis 6.18. Kajaloodid hüdrograafialaeval pardavälistel traaversitel-poomidel. [EM 1110-2-1003, 2002]

6.5. Külgvaatesonarid

Külgvaatesonarid (joon. 6.19) kujutavad endast hüdrolokatsioonisüsteeme, millelt suunakarakteristik on lehekujuline, avanurk vertikaaltasandis (risti liikumissuunaga) kuni 45° ning horisontaaltasandis kuni 2°.

Vastuvõtu/edastusantennide poolt perioodiliselt väljastatavad ultraheliimpulsid kiiritavad suunadiagrammi piirides süsteemikindlalt merepõhja. Sonar võib olla monteeritud laeva põhja alla või kasutatakse pukseeritavat seadet.

Igas sondeerimistsüklis uuritakse kitsast merepõhjariba, millelt saabuvad järjestikku tagasi kajasignaalid. Kahe naabersignaali vahel jõuab laev liikuda uude punkti, seepärast „kompab" iga järgmine impulss uut riba.



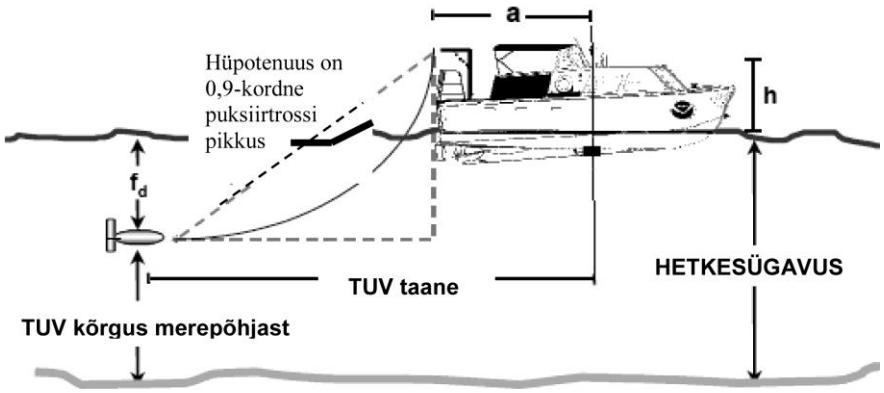
Joonis 6.19. Pukseeritav külgvaatesonar (*towfish*) [EM1102-2-1003, 2002]

Kui sonariimpulss peegeldub veekogu põhjaelementidelt, siis jõuab muundurantenni (*transducer*) tagasi ühe suure peegeldunud impulsi asemel hulk elementaarpeegeldusi, mille reprodutseerimisel moodustab iga elementaarimpulss ehk *ping* joone, mille pikkus on võrdeline impulsi kestuse ja helikiirusega.

Külgvaatesonari taane (*MJ*) kajaloodist (joon. 6.20) leitakse valemiga

$$MJ = a + \sqrt{(0{,}9PTP)^2 - (\mathrm{h} + \mathrm{f_d})^2}\ , \tag{6.22}$$

kus *PTP* on pukseerimistrossi pikkus.

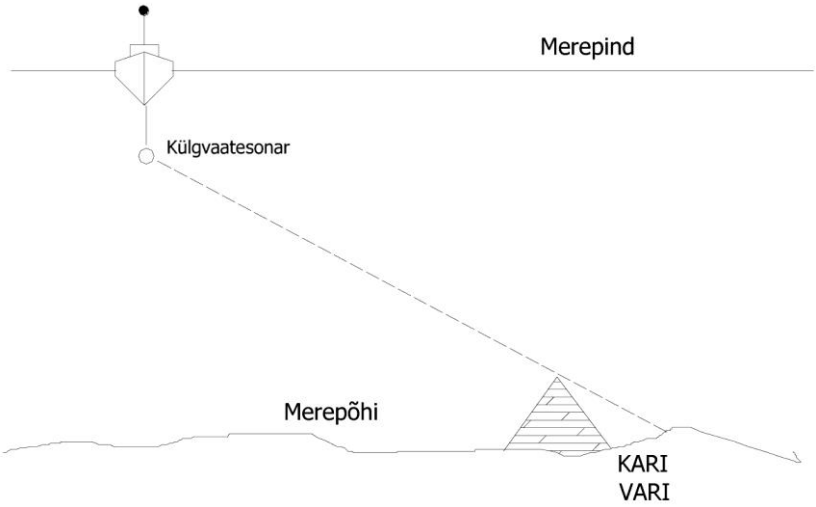


Joonis 6.20. Pukseeritava külgvaatesonari kõrguse ja asukoha määramine. f_d – külgvaatesonari sügavus; *h* – trossiploki kõrgus veeliinist; *a* – trossiploki kaugus kajaloodist. TUV (pukseeritav allveeseadis – *Towed Underwater Vehicle, ka towfish*) taane on pukseeritava külgvaatesonari kaugus kajaloodist [EM 1110-2-1003, 2002]

Kui laev liigub, siis järjestikused *ping*-id moodustavad esmaselt veekogu põhja aerofotonegatiivi taolise kujutise. Kui põhjas on reljeefielemente ja muid iseärasusi, siis kõrgemad kohad peegelduvad tugevamini (jäävad tumedamaks) ja nende taga olevad varjatud alad jäävad heledamaks (joon. 6.21). Samuti peegelduvad tugevamini näiteks kaljused alad ja nõrgemini mudased alad.

Kui hüdrograafilisel mõõdistamisel lubatakse kasutada ühekiirelisi kajaloode, tuleb halssidevahelist ala uurida külgvaatesonaritega.

Külgvaatesonaril on üks põhieelis ka mitmekiirelise kajaloodi ees. Olgugi et vanemad külgvaatesonarid ei suuda määrata esemete sügavust ja täpset asukohta, on need võimelised fikseerima palju väiksemate esemete olemasolu kui kajaloodid. Näiteks uppunud laevade maste ei suuda mitmekiireline kajalood üldjuhul tuvastada, külgvaatesonar aga küll.



Joonis 6.21. Pukseeritava külgvaatesonari impulsi varjatud alade (kari vari) tekkimine. Varjatud ala mõõtmed olenevad sonari ja varjava põhjaelemendi vahekaugusest, kõrguste vahest ja põhja üldisest kaldest

Külgvaatesonareid on tänapäeval täiustatud nii, et nad võimaldavad määrata ka sügavusi ja horisontaalkaugusi näiteks interferentsiprintsiibil, mistõttu erinevus külgvaatesonarite ja interferomeetriliste kajaloodide vahel on muutunud peaaegu olematuks.

Seadmestikku, mis ühendab kõiki laeval asuvaid hüdroakustilisi vahendeid ja kindlustab kõigi mõõdistamisega seotud ülesannete lahendamise, nimetatakse hüdroakustiliseks kompleksiks.

6.6. Mere hüdrograafilise mõõdistamise metoodika

Põhjareljeefi mõõdistamine kujutab endast hüdrograafiliste tööde kogumit, mille eesmärk on hankida andmeid reljeefi kohta merepõhja kartograafilise kujutise loomiseks.

Ookeanide ja merede põhjareljeefi mõõdistamise võib jaotada kaheks: üldiseks ja üksikasjaliseks mõõdistamiseks. Üldine mõõdistamine (tänapäeval kasutatakse rohkem nimetust süvamere mõõdistamine) hõlmab maailmamere põhjareljeefi üldiseloomustust ning makro-, mega-, globaalsete ja põhjareljeefi vormide kindlaksmääramist. Üksikasjalist mõõdistamist tehakse šelfi eri piirkondade reljeefivormide täpsemaks tundmaõppimiseks ja sise- ning ääremerede navigatsioonikaartide koostamiseks.

Veealuse reljeefi kaardistamist vajatakse mitmes eluvaldkonnas: meregeoloogias, mere inseneerirajatiste projekteerimisel, üldteaduslike ülesannete lahendamisel jms.

Hüdrograafilised uuringud ongi mõeldud põhiliselt mainitud ülesannete täitmiseks, kuid need aitavad lahendada ka teisi, inimtegevusega seotud probleeme merel.

Maailmameres võib esineda üksikuid piirkondi, kus navigatsioonikaarte ei ole soovitav kasutada „mittenavigatsiooniliste" ülesannete lahendamiseks, olgugi et IHO standardite järgi sooritatud mõõdistamine peaks seda võimaldama. Niisugusteks regioonideks on järsu kallaku või tugevasti lõhenenud reljeefiga põhjaalad, kus laevasõidu ohutuse kindlustamiseks tuleb vähimagi kahtluse korral eelistada mõõdistamisel väiksemat sügavust. Sellise kujutise jaoks on õiged järgmised sügavuse ja põhja kaldenurga suhted.

$$z' \le z \Rightarrow \alpha' \le \alpha, \qquad (6.23)$$

kus z' ja α' on kaardil märgitud merepõhja sügavus ja kaldenurk; z ja α – sügavuse ja kaldenurga tõelised suurused.

Kujutamisviisi väiksemate sügavuste järgi (valem 6.23) kasutatakse laialdaselt hüdrograafias, sest see ei nõua mõõdetavate suuruste keerulist töötlust, välja arvatud parandite sisseviimine mõõdetud sügavustesse (tareerimise, taseme kõikumise jt parandid). See meetod viib aga märkimisväärsele reljeefi silumisele, kusjuures sügavusvead kaardil võivad küündida kümnete, suurte sügavuste ja keeruka reljeefi puhul aga kuni sadade meetriteni, tekitades nii kuni 45° kaldenurkade moonutusi.

Enamik rakendusülesannete puhul (torustike ja sidekaablite paigaldamine) on aga suure kaldenurgaga või järsult paindunud reljeefiga merealad ohtlikud. Eeltoodust lähtudes väljendab inseneritööde ohutust avaldis

$$z'' \ge z \Rightarrow \alpha'' \ge \alpha, \qquad (6.24)$$

kus z'' ja α'' on kaardil kujutatud sügavused ja kaldenurgad.

Avaldised (6.23) ja (6.24) erinevad selle poolest, et esimesel juhul ligineb kujutise pind õigele ülevalt, teisel juhul aga alt.

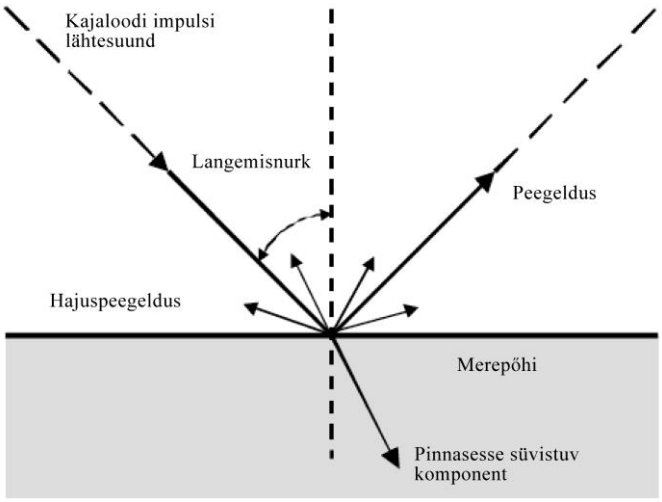
On arusaadav, et igasuguste rakenduslike ja üldteaduslike ülesannete lahendamiseks on soovitav omada pinnakujutist, mis oleks adekvaatne reaalse reljeefiga, kuid kaudsete meetodite hulka kuuluvate akustiliste meetoditega on see võimalik vaid väga töömahuka lausmõõdistamise korral. Seetõttu on järsu kallaku ja tugevasti lõhenenud reljeefi kujutamisel kaardil vajalik otsustada, kuidas suhtuda nõutava kujutise tüüpi, st kas valemi (6.23) või valemi (6.24) järgi.

Tasase reljeefiga alade kaartide koostamisel pole valemite (6.23) ja (6.24) vahel praktilist täpsuse vahet, erinevused sügavuste ja pindade kaldenurkade vahel on tühised $\left(z - z' \approx 0, \alpha'' - \alpha' \approx 0 \right)$ ning niisuguseid navigatsioonikaarte võib kasutada ka rakendusülesannete lahendamisel.

Üldjuhul tuleb merepõhja reljeefist nõutavate omadustega kujutise saamiseks arvestada mitut tingimust.

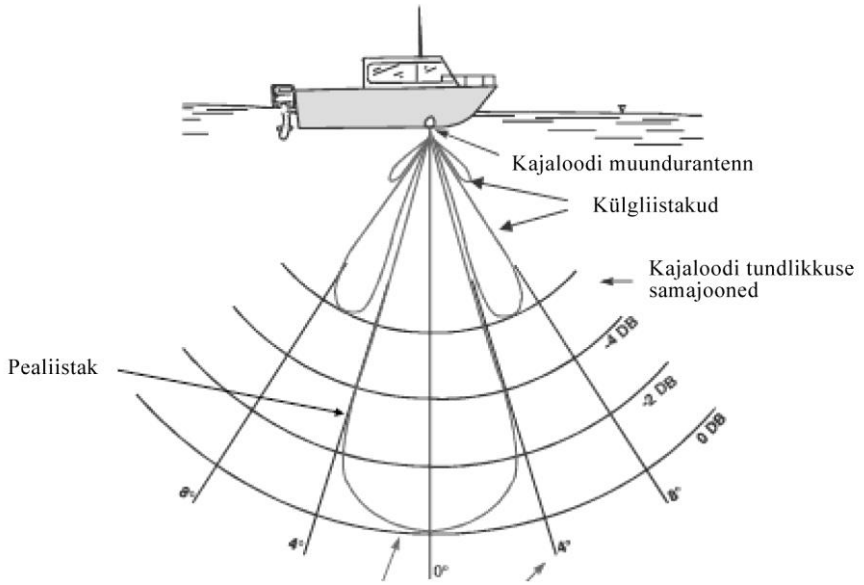
1. Mõõtmistingimus, mille järgi määratakse sügavuse mõõtmise suund kajaloodi antenni ja merepõhja vahel, st $0 \le \gamma \le \alpha$, kus γ on nurk, mida loetakse vertikaalist.
2. Uuritava objekti lähendustingimus määrab reljeefi lähendavate omavahel lõikuvate tasandite süsteemi.
3. Mõõdetava parameetri ühtivustingimus, mis tagab mõõdetud kauguste ja vastavate mõõtmismudelite (p. 1) ning interpreteerimismudelite (p. 2) järgi saadud kauguste võrdsuse.
4. Kujutise pidevuse tingimus, mis peab tagama isobaatide ühtimise lähenduspindade lõikejoontel.

Teoreetiliselt lähtutakse kajaloodide puhul teadmisest, et merepõhi kujutab endast konarlikku tasandit, mis peegeldab akustilisi laineid difuusse hajumise funktsiooni järgi (joon. 6.22). See on üks põhjuseid, mis võimaldab sooritada loodimist liikuvalt laevalt. Vastasel korral sõidaks laev peegeldunud kiire pealt ära.



Joonis 6.22. Kajaloodi impulsi jagunemine

Järgnevalt kirjeldatakse mitmesuguseid reljeefi ennistamise skeeme, mis tagavad kujutise kas valemi (6.23) või valemi (6.24) järgi.



Joonis 6.23. Kajaloodi muundurantenni impulsi suunakarakteristik (tugevasti moonutatud nurgalise mõõtkavaga ja pööratud 90°). Muundurantenni impulsi põhivõimsus/tundlikkus on genereeritud **pealiistaku** suunal ja jääb koonusesse ± 4°. Tundlikkuse samajooned on ringikujulised. Pealiistaku telg on risti antenni vibreeriva pinnaga. Osa energiast on suunatud aga ka kõrvale – **külgliistakute** suundadele [EM 1110-2-1003, 2002]

Tasase merepõhja puhul võetakse vastu signaali pealiistaku peegeldus (joon. 6.23), mis annab tõelise sügavuse. Kiirguskoonuse väikese tipunurga ja põhja suure kalde puhul saabub lõpuks moment, kus pealiistaku peegelduse amplituud jääb väiksemaks mõne külgliistaku amplituudist (esimese külgliistaku amplituud moodustab ligikaudu 15% pealiistaku amplituudist) ja kajalood võtab vastu signaali, mis tuleb ideaaljuhul põhjapinnaga ortogonaalselt suunalt, aga halvemal juhul mingilt vahepealselt suunalt. Tugeva võimenduse kasutamine soodustab külgliistakute signaalide saamist. Nõrga võimenduse puhul kaob signaali pealiistaku peegelduse mõju ja ka signaali külgliistakute peegeldusi ei saa vastu võtta.

Loodimisel esineb veel järgmine seaduspärasus. Kui looditakse suure kalde alal ja kajasignaali vastuvõtupunkt asetseb väiksema sügavuse alas (laev liigub põhjakalde tõusu suunas), on mõõdetud sügavuse väärtus suurem tõelisest sügavusest, sest selleks ajaks, kui peegeldunud signaali järgi sügavus registreeriti ja sooritatakse ka kohamäärang, on laev juba madalamas alas. Vastasel juhul, kui vastuvõtupunkt asetseb suuremate sügavuste alas, on mõõdetud sügavus väiksem tõelisest sügavusest.

7. SÜGAVUSE MÕÕTEMÄÄRAMATUSE ALLIKAD

7.1. Hälvete põhjused

Sõltumata merepõhja reljeefi kaardistamise vahendeist, meetodeist ja tulemuse esitamise viisist, jääb määratavaks parameetriks sügavus. Järelikult avaldavad sügavuse mõõtmishälbed vahetult mõju mõõdistamistulemuste täpsusele.

Mõõdistamistulemused sisaldavad süstemaatilisi ja juhuslikke hälbeid.

Süstemaatiliste hälvete mõju saab oluliselt vähendada vastavate parandite sisseviimisega.

Juhuslike hälvete leidmine on võimalik üksnes tõenäosusteooriat rakendades. Et süstemaatilisi ja juhuslikke hälbeid hinnatakse ning võetakse arvesse erinevate võtetega, siis käsitletakse neid eraldi.

Vaatleme eeskätt süstemaatilisi vigu. Võrrandist (6.1) nähtus, et vead sügavuse mõõtmisel võivad tekkida ennekõike helikiiruse c_0 ebaõigest määramisest ja aja t ebatäpsest mõõtmisest. On teisigi vigade allikaid. Järgnevalt kirjeldatakse valemeid tekkivate vigade kvantitatiivseks hindamiseks.

7.2. Heli tegeliku vertikaalkiiruse ja arvutusliku väärtuse erinevustest tingitud sügavuse hälbed

Kajaloodi skaala arvutatakse valemiga (6.1) helikiiruse c_0 mingil jääval väärtusel. Tegelik kiirus võib aga sellest erineda mõõtmistingimuste erinevuse tõttu, näiteks kui tegelik helikiirus c ületab helikiiruse c_0, siis on tegelik sügavus suurem kui kajaloodi esitatu. Vaadeldava vea kvantitatiivseks hindamiseks diferentseerime võrrandit (6.1) $z = 0{,}5ct$ helikiiruse järgi, saame

$$dz = \frac{1}{2} t dc \,. \tag{7.1}$$

Minnes diferentsiaalidelt üle vastavatele muutudele, avaldame võrrandist (6.1) suuruse t ning asendades seal suuruse c suurusega c_0, saame

$$\Delta z_c = z \frac{\Delta c}{c_0} \,. \tag{7.2}$$

Siin Δc on arvutusliku kiiruse c_0 ja tegeliku kiiruse c vahe sügavuse mõõtmise hetkel, järelikult

$$\Delta z_c = \frac{c_0 - c}{c_0} z = \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) z \,. \tag{7.3}$$

Hälve Δz_c kuulub süstemaatiliste hälvete hulka, mida tuleb arvestada mõõdetavate sügavuste parandamisel. Teades, et parand erineb veast ainult märgi poolest, saame hälbe parandi vz_c :

$$v z_c = z\left(\frac{c}{c_0} - 1\right). \tag{7.4}$$

7.3. Refraktsioonist tingitud hälbed

Helikiirus merevees kui mittehomogeenses keskkonnas muutub sõltuvalt põhiliselt temperatuurist *T*, soolsusest *S* ja hüdrostaatilisest rõhust *p* (vastavad valemid on alajaotises 8.3). Kajaloodi impulsid, mis levivad mööda erinevate füüsikaliste ja keemiliste omadustega paralleelkihtide normaali, muudavad igas kihis kiirust ja suunda vastavalt veetiheduse muutumisele.

Kooskõlas optikaseadustega murduvad kiired iga kihi piiril nurga τ võrra, kusjuures

$$\tau = \beta - \eta, \tag{7.5}$$

kus β on langemisnurk; η – murdumisnurk.

Järelikult helikiired kõverduvad järk-järgult ja vertikaali suhtes nurga γ all kiirgava impulsi trajektoor on kõver.

Helikiire kõverdumist akustiliselt ebaühtlases keskkonnas nimetatakse refraktsiooniks.

Kui helikiirus sügavuse suurenedes kasvab, siis nurga γ muudud on positiivsed ja kiir läheneb kõverdudes horisontaaltasandile. Kui helikiirus sügavusega väheneb, siis nurga γ muudud on negatiivsed ja kiir läheneb kihtide normaalile. Esimesel juhul nimetatakse refraktsiooni positiivseks, teisel juhul negatiivseks. Maailmameres on ülekaalus negatiivne refraktsioon. Läänemeres oleneb see aastaajast ja asukohast.

Soolsuse ja temperatuuri tõusuga helikiirus suureneb.

Refraktsioon on üks mõõtmismääramatuse allikaid merepõhja reljeefi mõõdistamisel kaldkaugusi mõõtvate akustiliste vahenditega.

Seletame refraktsiooni joonisel 7.1. Väljugu punktist O nurga γ all akustiline impulss. Homogeenses keskkonnas jõuab see mööda sirgjoont põhja punktis *A* ja seejärel peegeldub tagasi vastuvõtjasse O. Tähistame $\mathrm{OA} = \dfrac{z}{\cos\gamma}$.

Refraktsiooni tõttu kõverdunud kiir langeb merepõhjale punktis *B*, olles läbinud vahemaa r_R. Jooniselt 7.1 on pikemata selge, et

$$\left.\begin{aligned} z &= \mathrm{OC} = r\cos\gamma \\ R &= r\sin\gamma \end{aligned}\right\}. \tag{7.6}$$

Arvutame sügavuse z_R seoste (7.6) esimese valemi abil

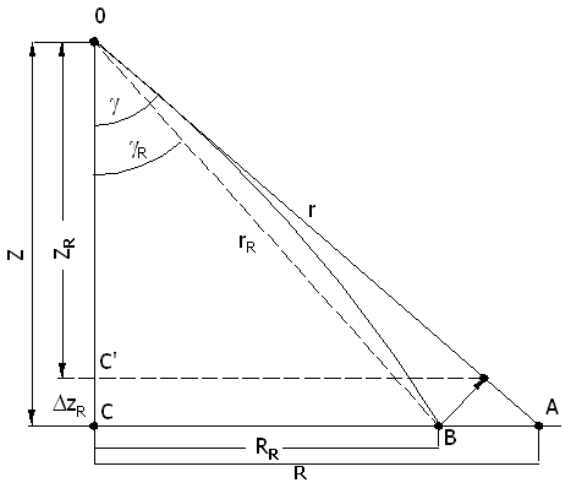
$$z_R = \mathrm{OC}' = r_R\cos\gamma\,. \tag{7.7}$$

Refraktsioonist põhjustatud sügavuse määramise hälve

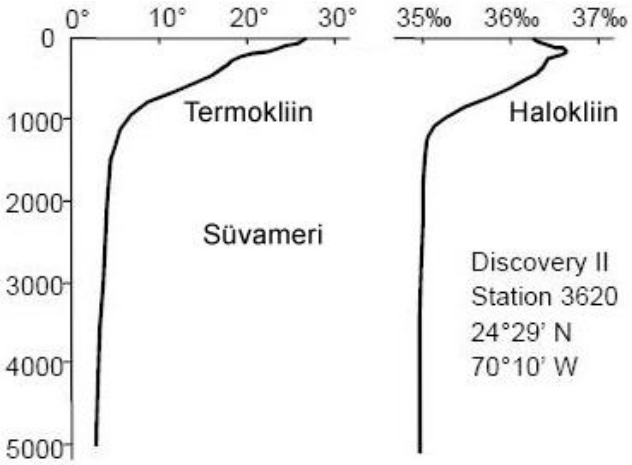
$$\Delta z_R = z_R - z = (r_R - r)\cos\gamma \tag{7.8}$$

ja parand

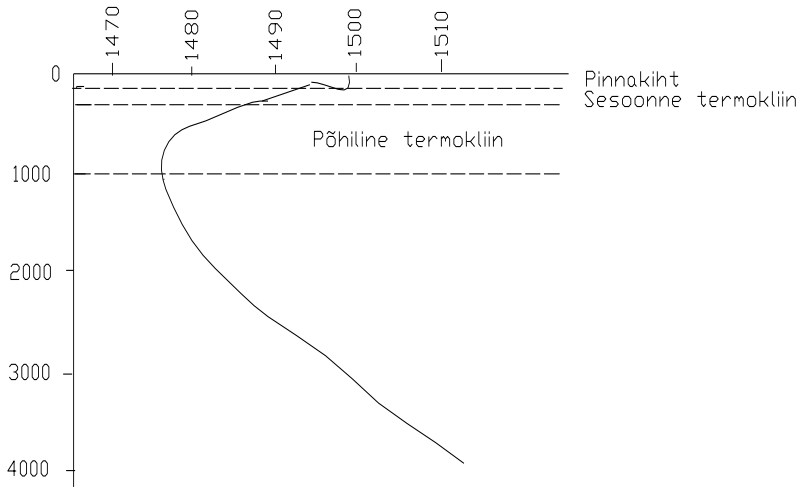
$$vz_R = (r - r_R)\cos\gamma \quad . \tag{7.9}$$



Joonis 7.1. Kaldkiire refraktsioon, kui helikiirus sügavusega väheneb (Laigna; Kala, 2001)



Joonis 7.2. Ookeani temperatuuri ja soolsuse profiilid punktis 24°29'N ja 70°10'W, vasakpoolne on temperatuur, parempoolne – soolsus. Termokliin (*Thermocline*) ja halokliin (*Halocline*) on suhteliselt õhukesed veekihid, kus vastavalt temperatuur ja soolsus hüppeliselt muutuvad. [de Jong jt 2002]



Joonis 7.3. Ookeani helikiiruste profiil keskmistel laiustel

7.4. Aja ebatäpsest mõõtmisest ja nulliaseme hälbest tekkiv sügavushälve

Kajaloodides mõõdetakse aega, mis helil kulub antennist merepõhjani ja sealt tagasi vastuvõtjasse jõudmiseks, tänapäeval elektrooniliselt. Elektrooniline ajamõõdu täpsus üldjuhul kas garanteeritakse, leitakse kaudselt (tareerimisel koos teiste vigadega) või määratakse instrumendi juhendis toodud meetodil. Erinevalt vanematest,

elektromehaanilise ajamõõtmisega kajaloodidest, mille vigu siinkohal ei käsitleta, on elektrooniline ajamõõtmine täpsem ja usaldusväärsem.

Kajaloodiga sügavuse mõõtmisel arvestatakse aega heliimpulsi lähetamishetkest alates. Üldjuhul ei lange see ühte impulsi tegeliku väljastamishetkega. Tulemusena tekib hälve Δz_{NA}, mida nimetatakse nulliaseme hälbeks.

$$\Delta z_{NA} = \frac{s\Delta t_{NA}}{2}, \tag{7.10}$$

kus Δt_{NA} on heliimpulsi lähetamisaja ja selle impulsi registreerimisaja vahe.

Hälve Δz_{NA} kuulub süstemaatiliste hälvete hulka ja seepärast tuleb seda arvestada mõõdetava sügavuse tegeliku väärtuse määramisel.

Sellel hälbe Δz_{NA} valemil on üksnes teoreetiline tähtsus, sest see aitab selgitada hälbe päritolu. Praktiliselt suurust Δt_{NA} ei mõõdeta, kuigi tehniliselt on see võimalik. Mõõdistamisel eelistatakse parandit vz_{NA} määrata kaudsel teel, samuti nagu signaali kulgemisaja ebatäpsest mõõtmisest tingitud sügavushälvet, st need saadakse tareerimisparandi koosseisus.

7.5. Akustilistest antennidest tingitud sügavushälbed

Akustilised antennid (*transducer*) ehk muundurantennid (ka kiirgurid või vibraatorid) võivad põhjustada kolme liiki hälbeid. Kajaloodi tööprintsiibist rääkides eeldati, et heliimpulsse väljastatakse ja võetakse vastu ühe ning sama antenniga. Enamiku kajaloodide konstruktiivne lahendus ongi sellega kooskõlas. Teist tüüpi kajaloodides kasutatakse aga kahte akustilist antenni, mis asuvad teineteisest teataval kaugusel L. Üks neist väljastab impulsse, teine võtab peegeldunud impulsse vastu. Et kajaloodide ehitus on ühesugune, siis mõõtmisel saadav suurus ei vasta sügavusele z_K otse kiilu all, vaid kaldkaugusel $AP = z_{KL.}$ Mõõdetud väärtuse z_{KL} põhjal saab arvutada tegeliku sügavuse:

$$z_K = \sqrt{z_{KL}^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}\ .$$

Kaks teineteisest eemaldatud akustilist antenni tekitavad sügavust mõõtes sügavushälbe, mis arvutatakse kui z_{KL} ja z_K vahe:

$$\Delta z_L = z_{KL} - z_K = z_{KL} - \sqrt{z_{KL}^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}\ . \tag{7.11}$$

Selline olukord esineb harva ja siinkohal seda täpsemalt ei vaadelda.

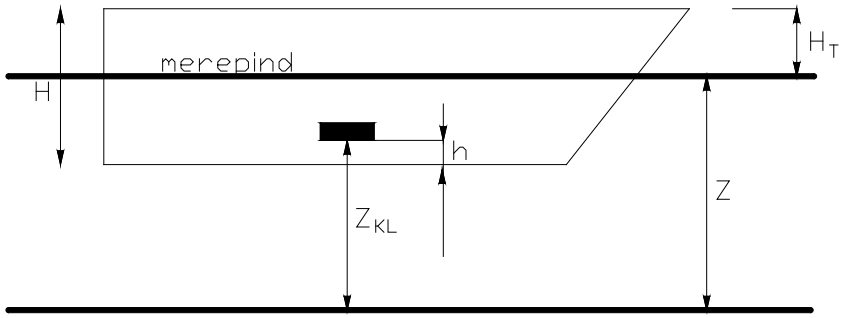
Teise hälbe, mis on samuti seotud akustiliste antennide paigutusega, täpsemalt süvistusega, võib esitada kahe suuruse vahena: üks neist on sügavus z_K akustilise antenni tasandilt merepõhjani ja teine sügavus z merepinnalt kuni -põhjani.

Tähistame alati teadaoleva vertikaalsuunalise kauguse kiilust kuni laevatekini või umbreelinguni H, aga kauguse merepinnast sellesama punktini (see on küll muutuv suurus, aga väga lihtsalt mõõdetav) H_T. Akustiliste antennide kõrgus h kiilu suhtes mõõdetakse kajaloodi ülesseadmisel ja kantakse laeva formulari. Siis võib jooniselt 7.4 leida hälbe, mis tekib akustiliste antennide süvistuse tõttu:

$$\Delta z_s = z_K - z = H_T - H + h \ . \tag{7.12}$$

Akustiliste antennide süvistusest tingitud parand

$$\nu z_s = H - H_T - h. \tag{7.13}$$



Joonis 7.4. Akustiliste antennide süvistusest tekkiv viga. Kajaloodiga mõõdetud sügavus on z_{KL}, sügavus merepinnast z. Must ristkülik on kajalood

Kolmandat liiki hälve tekib laeva liikumisel madalas vees. Sel juhul saab laeva kere täiendava süvise, sest vee liikumise kiirus laeva põhja ja merepõhja vahel ületab laeva liikumise kiiruse ja seetõttu laev „imetakse" allapoole. Vaatlused on näidanud, et laeva täiendava süvise suurus sõltub peamiselt laeva kiirusest ning tema süvise ja vee sügavuse suhtest. Madalas vees ja suurel kiirusel võib täiendav süvis olla küllaltki oluline ja seda tuleb arvestada. Täiendavast süvisest tingitud sügavushälve

$$\Delta z_{TS} = H_K - H_p \, , \tag{7.14}$$

kus H_p ja H_K on vastavalt seisu- ja käigusüvis.

Kõiki kolme hälvet tuleb vajaduse korral sügavuse mõõtmisel arvestada. Vajalikud parandid saame, kui muudame vastavate veaavaldiste märgid vastupidiseks.

Kere täiendavast süvisest tingitud parand

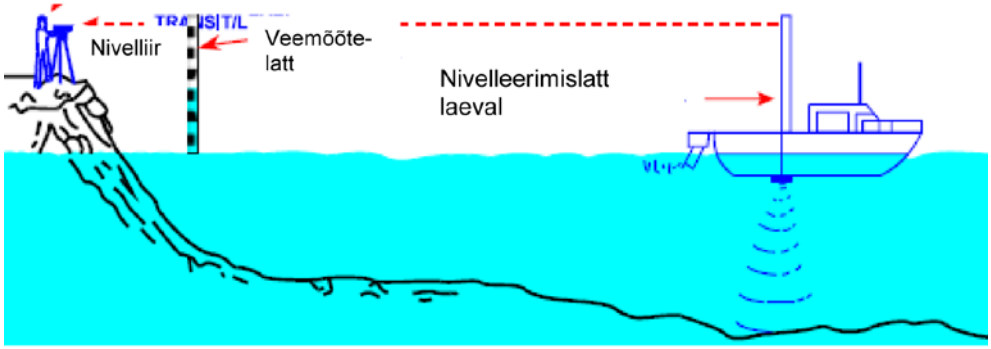
$$\nu\, z_{TS} = \sqrt{\frac{H_p}{Z_{kl}}}\,\frac{K^2 - 1}{2g}\nu^2, \qquad (7.15)$$

kus H_p on laeva seisusüvis; z_{KL} – kajaloodiga mõõdetud sügavus; g – raskuskiirendus (m/s^2); ν – laeva kiirus (m/s) (laeva kiirus sõlmedes tuleb korrutada kordajaga 0,515). Gabariidikoefitsient K leitakse alljärgnevast tabelist [ПГС №4, 1984],

Tabel 7.1

L/B	3,5	4	5	6	7
K	1,38	1,33	1,26	1,22	1,19

kus L on mõõdistusaluse pikkus; B – mõõdistusaluse laius.



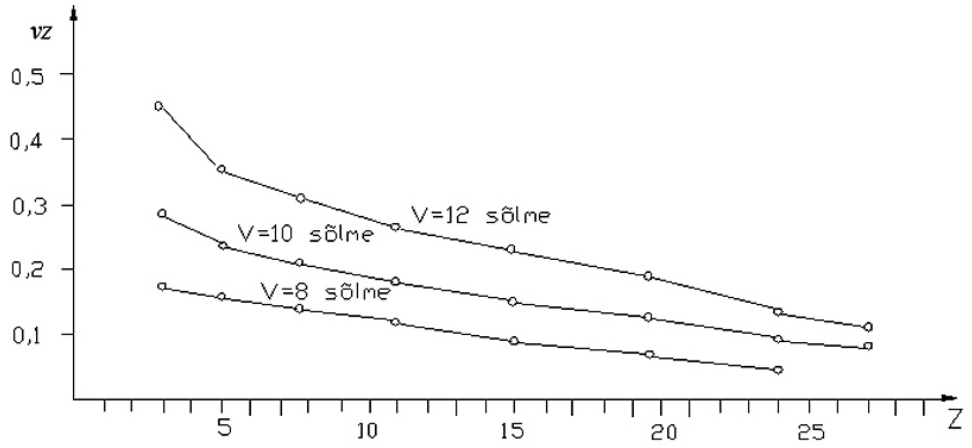
Joonis 7.5. Täiendava süvise määramine nivelliiri abil [EM 1110-2-1003, 2002]

Täiendavat süvist võib määrata ka katseliselt. Selleks peab laev sõitma töötava kajaloodiga ja ühtlase kiirusega tasase ühtlase väikese kaldega ning soovitavalt liivase põhjaga alal. Samal ajal tuleb võtta pidevalt lugemeid laevale püstitatud nivelleerimislatilt (joon. 7.7). Meetod eeldab kaugust nivelliirist alla 400 m, kusjuures kasutada tuleks optilist nivelliiri (digitaalnivelliir võimaldab käesoleval ajal mõõta kaugustel kuni 100 m). Pika baasi puhul võib kasutada mitut nivelliiri.

Teise võimalusena tähistatakse toodritega iga 200–300 m järel tasase ühtlase kaldega ja soovitavalt liivase põhjaga alal kontrolljoon. Iga toodri juures mõõdistuslaev peatub, nii et kajalood jääb toodri poole, ja mõõdetakse kajaloodiga sügavus ning koordinaadid DGNSSi või RTK GNSSi abil. Seejärel liigutakse stardipunkti ~ 600 m enne esimest toodrit ja alustatakse sõitu ristlemiskiirusega, möödudes sama pardaga mis tegevuse algul iga toodri juurest, määratakse ajamoment, sügavus ja

koordinaadid. Koordinaatide järgi määratud toodrite vahekauguse ja sõiduaja põhjal leitakse laeva kiirus. Seda korratakse veel kolm korda. Pärast mõõtmisi tehakse jälle seisva laevaga sügavuse- ja kohamäärangud iga toodri juures. Mõõtmiste eel ja järel tehakse vaatlused samasse rajatud ajutises tasemevaatluspostis.

Mõõtmistulemused keskmistatakse ja koostatakse parandite graafik (joon. 7.4), kus horisontaalteljele kantakse sügavused ja vertikaalteljele sügavusparandid.



Joonis 7.6. Sügavusparandite *vz* (meetrites) graafikud laeva erinevatel kiirustel ja sügavustel *z* (meetrites)

7.6. Merepõhja kaldest tingitud sügavushälve

Mere sügavuse arvutamise valem (6.1) ei arvesta merepõhja kallet. On ilmne, et kajaloodi vastuvõtjasse saabub esimesena heliimpulss, mis peegeldub põhja lähimast punktist (joon. 7.5). Seega tegeliku vertikaalsügavuse *z* asemel registreerib kajalood kaldsügavuse z_{KA}, mis tekitab sügavushälbe:

$$\Delta z_\alpha = z_{KA} - z = z_{KA}\frac{\cos\alpha - 1}{\cos\alpha}. \qquad (7.16)$$

Vastav parand

$$\nu\, z_\alpha = z - z_{KA} = z_{KA}\frac{1-\cos\alpha}{\cos\alpha}. \qquad (7.17)$$

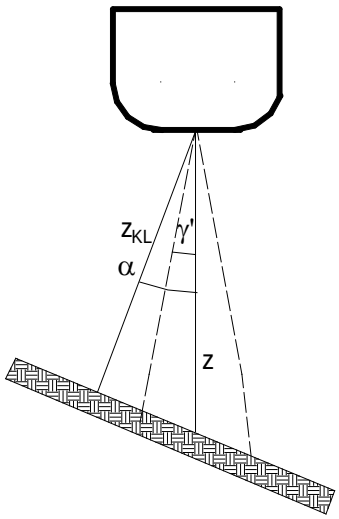
Merepõhja kalded ei ole harilikult suured, vastavad kaldenurgad ületavad harva 20°. Seepärast võib parandi arvutada lihtsustatud valemiga

$$\nu\, z_\alpha = \frac{1}{2} z_{KA} \alpha^2 . \qquad (7.18)$$

Kui vertikaalsuuna ja kajaloodi kiirguskoonuse moodustaja vaheline nurk γ ' on väiksem nurgast α, siis ei saada mitte põhja kalde normaalisuunaline kaugus z_{KA}, vaid kaugus z_M piki koonuse moodustajat. Sel juhul saadakse parand valemiga

$$\nu\, z_\alpha = 2 z_M \frac{\sin\left(\alpha - \frac{\gamma}{2}\right)\sin\frac{\gamma}{2}}{\cos\alpha} \qquad (7.19)$$

Mõnikord võib kajaloodi kiirguskoonusesse jääda mitu peegeldavat pinnaosa. Sel juhul tekib kajagrammis silutud reljeefi efekt ning kajagrammi on vaja hoolikalt uurida.



Joonis 7.7. Merepõhja kaldest tingitud loodimise hälve $\Delta z\alpha = z_{KL} - z$

Parandeid νz_α on raske määrata (vt jaotis 6.1) ning need ei ole täpsed. Seepärast on täppiskajaloodidel võimalikult kitsad suunadiagrammid, mille puhul merepõhja kaldest tingitud vigadel pole üldjuhul suurt tähtsust.

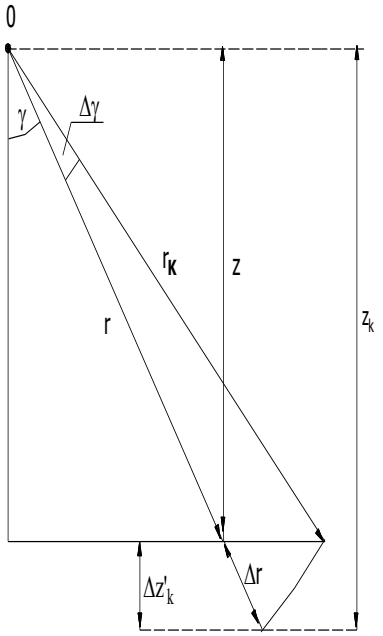
7.7. Laeva kõikumisest tekkiv sügavushälve

Lainetus kutsub esile akustiliste antennide kõikumise vertikaalasendis, mis põhjustab kajagrammil põhjaprofiili moonutusi.

Tugeva lainetuse korral töötavad kajaloodid ebakindlalt, mõõtmismääramatus kasvab ja sügavust ei saa õigesti arvestada.

Laia suunadiagrammiga kajaloodidel ei kutsu väikesed kõikumised esile märgatavaid sügavushälbeid, sest säilib võimalus mõõta lühemaid kaugusi. Teisiti on aga olukord hüdrograafiliste kitsa suunadiagrammiga kajaloodide, eriti lehvikkajaloodide puhul. Kõikumise mõju kõrvaldamiseks või vähendamiseks mõõtmistulemustele rakendatakse mitmesuguseid tehnilisi meetmeid, kusjuures eeskätt mõõdetakse kõikumisnurki ja nende abil leitakse tekkinud vead.

Vaatleme joonist 7.8, kus r ja r_K on kaldkaugused, esimesel juhul siis, kui kõikumine puudub, ja teisel juhul siis, kui see esineb; γ – nurk kaldkauguse r ja punkti O vertikaali vahel; $\Delta\gamma$ – nurk kaldkauguste r ja r_K vahel.



Joonis 7.8. Laeva kõikumisest tekkiv viga $\Delta' z_k$ kaldkiirega loodimisel

Vahetult jooniselt 7.8 saab kaldkiirega loodimise valemi

$$z = r\cos\gamma. \tag{7.20}$$

Edasi, juhul kui laeval on kreen $\Delta\gamma$, saame

$$z = r_K\cos(\gamma + \Delta\gamma). \tag{7.21}$$

Teisendustega saame valemitest (7.20) ja (7.21) vea $\Delta' z_K$ mõõdetud sügavuse z_K ja tegeliku sügavuse z vahel:

$$\Delta' z_K = 2r_K \sin\left(\gamma + \frac{\Delta\gamma}{2}\right)\sin\frac{\Delta\gamma}{2}. \qquad (7.22)$$

Valemit (7.22) saab kasutada sügavushälbe määramiseks vaid siis, kui mõõdetakse nurka $\Delta\gamma$. Kui seda nurka ei mõõdeta, siis kasutatakse valemit

$$\Delta' z_K = r_K \Delta\gamma \sin\gamma, \qquad (7.23)$$

kus $\Delta\gamma$ on võimalik maksimaalne kõikumisnurk antud tingimustes.

Valemit (7.23) kasutatakse vaid vea võimaliku suuruse hindamiseks, st hinnatakse, kas parandamata mõõtmisandmeid võib kasutada või mitte.

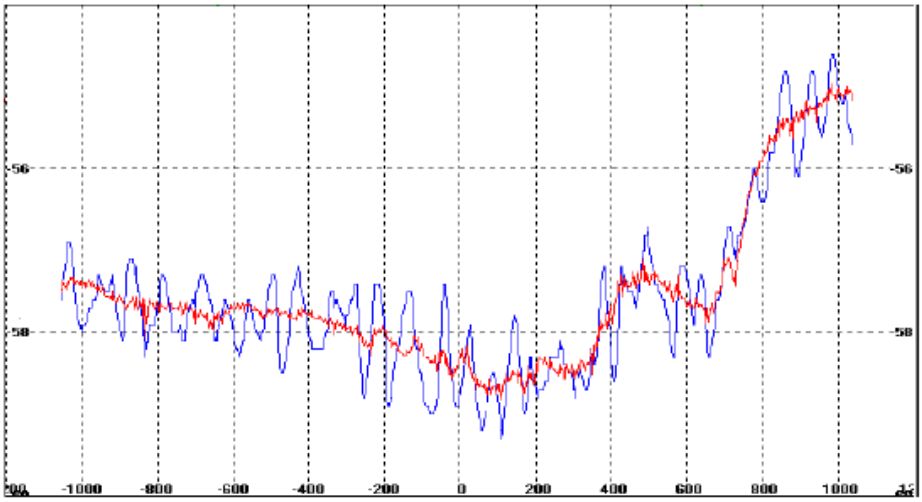
Tänapäeva tehnika võimaldab parandada mõõdetud sügavuste ja nende asukohtade hälbeid, mis on tingitud mõõdistusaluse külgkõikumisest (rullumisest), pikikõikumisest, **seegamisest** ja püstõõtsumisest. Selleks kasutatakse **inertsiaalsensoreid** ehk inertsiaalseid mõõtmismooduleid (IMU).

Need mõõtmismoodulid on ühendatud gürokompassi ja GNSS-vastuvõtjatega. Süsteem kontrollib pöördeid ümber kolme ortogonaalse telje, mis moodustavad paremakäelise süsteemi, kus *x*-telg on suunatud aluse vööri, *y*-telg tüürpoordi ja *z*-telg alla. Siinjuures pöörded on positiivsed, kui kalle on tüürpoordi, kui vöör on kallutatud üles ja seegamine on kellaosuti suunas. Kogutud andmete transformeerimiseks kohalikku koordinaatide süsteemi on kokku lepitud (IHO Manual, 2005), et viimane on vasakukäeline süsteem, st *x*-telg on suunatud itta, *y*-telg põhja ja *z*-telg allapoole.

Tänapäeval kasutatakse elektroonilisi püstõõtsumise andureid, mis keskmistavad laeva püstõõtsumise ja annavad tulemuse graafikuna (joon. 7.7). Instrumendi nullpunkti püsivust peab perioodiliselt kontrollima.

Inertsiaalsensorid koosnevad üldjuhul kolmest **aktseleromeetrist**, mis on monteeritud kolmele ortogonaalsele teljele, ja kolmest analoogiliselt monteeritud **sageduse andurist**. Aktseleromeetrite andmed lastakse läbi **madalpääsfiltritest**, selleks et kõrvaldada ummiklainetusest, järskudest pööretest ja juhuslikest kiiruse muutustest tingitud kõrge sagedusega variatsioonid.

Nurkkiiruse andurite andmed suunatakse **kõrgpääsfiltritesse**, et kõrvaldada madala sagedusega nihkeid. Üldjuhul säilivad 5–20-sekundilise sagedusega andmed. Inertsiaalsensorid on väga tundlikud kasutatud integratsiooniaja suhtes (eriti püstõõtsumise puhul). Signaali olulisuse ekvivalentne piirsagedus peab olema häälestatud adekvaatsele väärtusele, selleks et määrata pikemaid laineid ilma lühemaid summutamata. Seegamise mõju määramiseks kasutatakse inertsiaalsensoreid koos GNSSi informatsiooniga. Ühekiireliste kajaloodide puhul on seegamine probleemne vaid siis, kui GNSS-antenn ja kajalood ei asu ühel vertikaalil.



Joonis 7.9. Laeva püstõõtsumise graafik. Suured võnked (sinine joon) kajastavad mõõdetud püstõõtsumist, väikesed võnked (punane joon) näitavad keskmistatud (silutud) andmeid [EM 1110-2-1003, 2002]

adekvaatsele väärtusele, selleks et määrata pikemaid laineid ilma lühemaid summutamata. Seegamise mõju määramiseks kasutatakse inertsiaalsensoreid koos GNSSi informatsiooniga. Ühekiireliste kajaloodide puhul on seegamine probleemne vaid siis, kui GNSS-antenn ja kajalood ei asu ühel vertikaalil.

Mitmekiireliste kajaloodide kasutamisel tekitab seegamine moonutusi just ebatäpsete kohamäärangute tõttu.

Mitmekiireliste kajaloodide puhul kasutatavate GNSS-seadmetega kombineeritud inertsiaalseadmete puhul eeldatakse, et 95% usaldatavuse tõenäosusega saab kõikumise parandid 0,02° täpsusega, seegamise parandid 0,05° täpsusega ja püstõõtsumise täpsuse 10 cm või maksimaalselt 10% õõtsumise ulatusest [Parker, Mallace, 2005]. Kui satelliitide lukustus mingil põhjusel kaob, siis inertsiaalseadmed annavad teatud aja veel adekvaatseid parandeid ja hoiavad mõõdistusaluse kurssi.

8. KAJALOODIGA MÕÕDETUD SÜGAVUSTE PARANDITE MÄÄRAMINE JA TÄPSUSE HINDAMINE

8.1. Üldise sügavusparandi määramine

Süstemaatiliste vigade välistamiseks tuleb kõiki mõõdetud sügavusi parandada üldise sügavusparandiga *vz*, mis on võrdne tasememuudust tingitud sügavusparandi vz_f ja kajaloodiparandi vz_{KL} algebralise summaga:

$$vz = vz_f + vz_{KL}, \tag{8.1}$$

kus vastavalt kas loodeteta meres või loodetega meres

$$\left.\begin{aligned} vz_f &= m - f \\ vz_f &= n - f \end{aligned}\right\} . \tag{8.2}$$

Tasememuudust tingitud parandi vz_f määramist mõõtmiste taandamisel nullsügavusele vaadeldi jaotistes 4.6 ja 4.7. Kajaloodi parand vz_{KL} on üldjuhul võrdne osaparandite summaga:

$$vz_{KL} = vz_c + vz_n + vz_{NA} + vz_L + vz_s + vz_{TS} + vz_\alpha, \tag{8.3}$$

kus vz_c on heli vertikaalkiiruse arvutuslikust hälbest tingitud vea parand; vz_n – heli kulgemisaja ebatäpsest mõõtmisest tingitud vea parand; vz_{NA} – nulliaseme vea parand; vz_L – vibraatorite (antennide, kiirgurite) vahekaugusest tingitud vea parand; vz_s – vibraatorite süvisest tingitud vea parand; vz_{TS} – kere täiendavast süvisest tingitud vea parand; vz_α – merepõhja kaldest tingitud vea parand.

vz_{KL} saab leida kahel meetodil: kajaloodi tareerimisega või osaparandite summeerimisega. Neid meetodeid vaatleme allpool.

8.2. Kajaloodi parandite määramine tareerimisega

Tareerimiseks (kalibreerimiseks, taatlemiseks) nimetatakse sellist parandite määramise viisi, mille puhul kajaloodiga mõõdetud sügavusi võrreldakse vahetult sügavustega, mis on saadud mõnel teisel, täpsemal meetodil.

Tähistades täpse sügavuse z_0 ja kajaloodiga mõõdetud sügavuse z_{KL}, saame arvutada tareerimise summaarse parandi $vz_T = z_0 - z_{KL,}$ mille võib esitada osaparandite summana:

$$vz_T = vz_c + vz_n + vz_{NA} + vz_L + vz. \tag{8.4}$$

Seega, selle asemel et arvutada üksikuid võrdusesse (8.3) kuuluvaid parandeid, saadakse tareerimise tulemusena summaarne parand vz_T mõõdetud sügavuse parandamiseks.

Seoste (8.3) ja (8.4) võrdlus näitab, et parand vz_T ei välista vigu, mis olenevad üksnes mõõtmistingimustest. Nendeks on vead, mis on tingitud merepõhja kaldest ja laeva täiendavast süvisest madalas vees.

Merepõhja kaldest tingitud vea parandid vz_α on vajalik sisse tuua tareerimissügavustel üle 30 m ja kaldenurkadel üle 5°.

Parand vz_{TS}, mis on tingitud laeva täiendavast süvisest madalas vees, määratakse katseliselt. Seda vaadeldi jaotises 7.6.

Kui katseid ei korraldata, võib parandi vz_{TS} arvutada valemiga (7.13).

Need arvutused tehakse suhte $\frac{z}{H} = 1...4$ puhul ja kiirustel, mida kasutatakse mõõtmisel.

Parand vz_{TS} on tavaliselt väike ja seda arvestatakse ainult juhul, kui sügavusi on vaja mõõta täpsusega kuni 0,1 m.

Parandid vz_{NA}, vz_L, mis sisalduvad seoses (8.4), võivad pika aja kestel jääda stabiilseks. Teisiti on lugu paranditega vz_n, vz_s ja eriti puudutab see parandit vz_c.

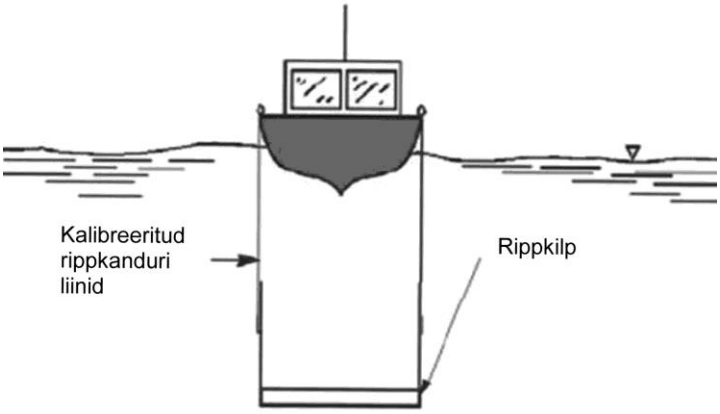
Parand vz_c arvestab heli nimikiiruse c_0 erinevust tegelikust vertikaalsuunalisest helikiirusest c sügavuse määramise punktis. Nagu allpool näidatakse, on vertikaalsuunaline kiirus suurimate vigade allikas ja muutub peamiselt sõltuvalt vee temperatuurist. See sunnib kajaloodi erinevates tööpiirkondades ja -aegadel korduvalt tareerima, katsetades helikiiruse erinevate võimalike muutustega. Tareerimine nõuab suurt ajakulu ja vähendab seega mõõdistamise kasumlikkust.

Kajaloodi tareerimine võib toimuda sügavusteni kuni 30 m tareeriva seadme – rippkilbiga. See kujutab endast üldjuhul laudkilpi (joon. 8.1), mille alla on kinnitatud süvistamiseks küllaldane raskus (näiteks raudrelss). Seade süvistatakse terasliinide abil kajaloodi akustilise antenni vertikaali mööda teatud sügavustele – tareerimishorisontidele (2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20 ja 30 m). Nendel kaugustel tareeriva seadme kilbist peaksid olema terastrossi (vaieri) külge joodetud naastud sügavusnumbritega. Naastude asukohad märgitakse kompareeritud terasruletiga, kusjuures vaieri pingutus peab vastama tööolukorrale.

Tareerimine ise toimub järgmiselt. 15...20 minutit enne tareerimise algust pannakse kajalood tööle. Tareeriva seadme rippkilp lastakse akustilise antenni vertikaalil esimesele sügavusele (2 m) ja edasi kõigile järgnevatele tareerimishorisontidele ning hoitakse seda igaühel neist nii kaua, kuni kajagrammile tekib vähemalt 10 mm pikkune märgis, või fikseeritakse 10 s jooksul digitaallugemid iga 2 s järel. Kajagrammile tehakse iga kord operatiivmärk, kui laeval ei ole **kreeni (**põikkalle) ega **diferenti** (pikikalle). Digitaallugemite puhul fikseeritakse ühtlasi kreen ja diferent.

Ripp- ehk tareerimiskilbi ülestõstmisel tegutsetakse analoogiliselt. Tareerimise alguses ja lõpus kontrollitakse laeva elektrivõrgu pinget.

Stabiilsete hüdroloogiliste tingimustega piirkondades tareeritakse üks-kaks korda ööpäevas. Kahe järjestikuse tareerimisega määratud summaarsete parandite vahe vz_T ei tohi ületada 0,3 m.



Joonis 8.1. Kajaloodi tareerimine rippkilbiga [EM 1110-2-1003, 2002]

Kui see tingimus on rahuldatud, siis parandatakse mõõdetud sügavused parandiga vz_{KL}, mis saadakse valemiga

$$vz_{KL} = vz_T + \delta z_S + \Delta z_{TS}\,, \qquad (8.5)$$

kus δz_S on parand akustiliste antennide süvistuste erinevustest mõõdistamisel ja tareerimisel; vz_{TS} on parand laeva täiendavast süvisest liikumisel madalveealas.

Et iga sügavus saaks parandatud vajaliku täpsusega standardsetel horisontidel määratud parandi vz_{TS} diskreetsete väärtuste järgi, sisestatakse tareerimisandmed arvutisse, vajaduse korral koos vastava arvestusalgoritmiga.

Kasutusel on ka tareerimine statsionaarsete (merepõhja süvistatud) etalonidega, mis võivad kujutada endast näiteks raudbetoonplaate (Tsitadelli polügoon Tallinna lahes või Väinamere polügoon). Viimaste puhul tuleks enne veenduda, et need pole setetega kaetud.

8.3. Kajaloodi parandite määramine osaparandite summeerimise teel

Tareerimine võimaldab määrata parandit usaldusväärselt üldjuhul ainult sügavuseni kuni 30 m. Suuremate sügavuste jaoks arvutatakse parandid Δz_{KL} kajaloodidele omaste üksikvigade osaparandite summana:

$$\nu z_{KL} = \nu z_c + \nu z_{NA} + \nu z_L + \nu z_s + \nu z_\alpha \,. \qquad (8.6)$$

Võrrand (8.6) erineb üldvõrrandist (8.3) selle poolest, et puuduvad parandid νz_{TS} ja νz_n. Eespool märkisime, et esimest neist paranditest on väiksuse tõttu otstarbekas arvestada üksnes madalaveelistes piirkondades, kui sügavuse mõõtmise täpsus on 0,1 m. Kui kasutatakse kaldkiirtega hüdroakustilisi seadmeid, võetakse arvesse ka refraktsiooni ja laevade kõikumise parandeid. Aja ebatäpsest mõõtmisest tingitud parand νz_n on võrreldes teiste osaparanditega tänapäeva digitaalinstrumentide puhul üldjuhul tühine.

Järgnevalt peatume üksikasjalikumalt parandite arvutamise viisidel.

Parandi νz_c võib arvutada valemiga (7.4), kuid siinjuures on vaja teada heli vertikaalkiiruse tegelikku väärtust merevees.

Heli vertikaalkiirust võib määrata kahel viisil:

- kaudselt suuruste järgi, mis on funktsionaalselt seotud kiirusega;
- otseselt spetsiaalste seadmete abil.

Kaudne meetod oli veel hiljaaegu eelistatum. See põhineb merevee temperatuuri T, soolsuse S ‰ ja hüdrostaatilise rõhu P või ligikaudse (parandamata) sügavuse z mõõtmisel teatud standardsügavustes. Kiirust saab nende suuruste järgi arvutada, kui on teada sõltuvus $c = f(T, S, P)$ või $c = f(T, S, z)$.

Kiiruse c arvutamiseks väikeste sügavuste (kuni 150 m) korral soovitatakse Del Grosso valemit (Коломийчук, 1975):

$$c = 1448{,}6 + 4{,}618\,T - 0{,}0523\,T^2 + 0{,}00023\,T^3 + \\ + 1{,}25\,(S - 35) - 0{,}011\,(S - 35)\,T + 0{,}00875\,z \,. \qquad (8.7)$$

Valemi (8.7) järgi on koostatud ka tabelid, mida võib leida hüdrograafia käsiraamatutest.

Soovitatakse ka Coppensi valemit [IHO Manual, 2011]:

$$c = 1449{,}05 + T[4{,}57 - T(0{,}0521 - 0{,}00023T)] + \qquad (8.8)$$
$$+ [1{,}333 - T(0{,}0126 - 0{,}00009T)](S - 35) + 0{,}0163z + 0{,}00018z.$$

Kui mõõtmiskoha geograafiline laius φ erineb väärtusest 45°, siis leitakse Coppensi valemi jaoks esialgsele sügavusele z' uus väärtus valemiga

$$z = z'[1 - 0{,}0026\cos(2\varphi)] \,. \qquad (8.9)$$

Coppensi valem annab 2–3 m/s suurema helikiiruse kui Del Grosso valem.

Sügavusel üle 200 m peetakse kõige täpsemaks Wilsoni valemit:

$$c = c_0 + \nu c_T + \nu c_S + \nu c_p + \nu c_{PST} \,, \qquad (8.10)$$

kus c_0 = 1499,14 m/s – helikiirus, kui T = 0; S = 35‰ ning vc_T on helikiiruse temperatuuriparand, mis leitakse valemiga

$$vc_T = 4{,}5721T - 4{,}4532 \cdot 10^{-2}T^2 - 2{,}6045 \cdot 10^{-3}T^3 + 7{,}9851 \cdot 10^{-6}T^4. \quad (8.11)$$

vc_3 on helikiiruse soolsusparand, mis leitakse valemiga

$$vc_S = 1{,}398(S - 35) + 1{,}692 \cdot 10^{-3}(S - 35)^2. \quad (8.12)$$

vc_P on helikiiruse hüdrostaatilise rõhu parand, mis leitakse järgmise valemiga:

$$vc_P = 1{,}60272 \cdot 10^{-1}P + 1{,}0268 \cdot 10^{-5}P^2 + 35216 \cdot 10^{-9}P^3 - 3{,}3603 \cdot 10^{12}P^4, \quad (8.13)$$

kus P_0 = 1,033 kG/cm^2 ja $P = P_0 \times$ z , z on siin sügavus meetrites.

G. Seravin soovitas vc_p asemel palju mugavamat valemit (8.14), millega arvutatakse hüdrostaatilisest rõhust tingitud parand otseselt sügavuse z järgi:

$$vc_z = 0{,}1636 + 1{,}648 \cdot 10^{-2}z + 1{,}468 \cdot 10^{-7}z^2 + 4{,}315 \cdot 10^{-12}z^3 - 3{,}48 \cdot 10^{-16}z^4 - 3{,}4 \cdot 10^{-21}z^5. \quad (8.14)$$

vc_{PST} – hüdrostaatilise rõhu, soolsuse ja temparatuuri koosmõju parand, mille võib Läänemeres leida lihtsustatud valemiga

$$vc_{PST} = (S - 35)(-1{,}1244 \times 10^{-2}t). \quad (8.15)$$

Süvameredes tuleks kasutada järgmist valemit:

$$vc_{PST} = (S - 35)[-1{,}1244 \times 10^{-2}t + P(-1{,}8607 \times 10^{-4}t + 7{,}4812 \times 10^{-6}t^2 + 4{,}5283 \times 10^{-8}t^3)]. \quad (8.16)$$

Wilsoni valem võimaldab arvutada helikiirust keskmise ruuthälbega 0,22 m/s. Ka selle valemi järgi on koostatud tabelid helikiiruse arvutamiseks merevees.

Kuivõrd Coppensi valem näib andvat veidi suurema helikiiruse (ja seega ka suurema sügavuse) kui Del Grosso (siinjuures mõlemad on empiirilised), siis vastavalt alapunktis 6.2 esitatud väidetele oleks soovitatav navigatsioonitarbelise hüdrograafilise mõõdistamise jaoks valida siiski Del Grosso valem. Ent kuna Wilsoni valem on samuti empiiriline, siis järskude erinevuste vältimiseks üleminekul ühelt valemilt teisele soovitatakse vahemikus 150–200 m arvutada helikiirused nii Wilsoni kui ka Del Grosso valemi järgi ning võtta neist keskmine. Täpsema tulemuse saamiseks võiks veel leida kaalutud keskmise valemiga

$$c_m = c_{DG} + \frac{(z_{KL} - 150)}{50}(c_W - c_{DG}), \tag{8.17}$$

kus c_W, c_{DG} on vastavalt Wilsoni ja Del Grosso valemitega saadud helikiirused; z_{KL} – kajaloodiga saadud sügavus.

Kõigi loetletud valemite järgi võib arvutada heli horisontaalkiiruse selles veekihis, mille kohta on teada temperatuur, soolsus ja tihedus. Nende suuruste sõltuvus sügavusest tingib heli vertikaalkiiruse muutumise üsna keerulise seaduse põhjal. Seda tegelikku kiirust ei õnnestu tavaliselt määrata kogu veemassi jaoks, seepärast asendatakse muutuv vertikaalkiirus sellise keskmise kiirusega, mille puhul reaalne helilaine ja keskmise kiirusega helilaine läbiksid kauguse merepinnast põhjani ja tagasi ühe ning sama ajavahemiku jooksul.

Temperatuuri ja soolsust mõõdeti varem järgmistel standardhorisontidel (ПГС №4, 1984):

a) ookeanides ja sügavates meredes sügavustel 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000 m ja edasi iga 1000 m järel;
b) madalaveelistes meredes (sh Läänemeri) sügavustel 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200, 250 m ja põhjahorisondil.

Tänapäeval kasutatakse helikiiruse määramisel merevees spetsiaalseid hüdrograafilisi **helikiiruse mõõtesonde**, näiteks Odom DIGIBAR PRO (joon. 13.2) või Monitor SVP, mis registreerivad sügavuse, soolsuse (tegelikult elektrijuhtivuse, millest instrument arvutab soolsuse) ja temperatuuri ning arvutavad helikiiruse. Mõõtmised toimuvad kiiresti, tulemused selguvad praktiliselt juba mõõtmise jooksul, mistõttu saadakse andmed iga sügavusmeetri kohta ja helikiiruste aritmeetiline keskmine. Ühekiireliste kajaloodide kasutamisel soovitatakse helikiirus määrata mitte rohkem kui 1,5 m järel, MBES kasutamisel – 0,3 m järel [EM 1110-2-1003, 2002]. Sügavustel üle 200 m ei ole helikiiruse parandi kasutamine nõutav [IHO Manual, 2011], samas ei ole ka see välistatud.

Kui heli keskmise vertikaalkiiruse arvutamiseks kajaloodi antennist kuni *i*-nda horisondini valitakse mõõtmistulemused vastavatel standardhorisontidel, siis keskmine helikiirus leitakse kaalutud keskmisena

$$c_{kesk} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(c_i + c_{i-1})(z_1 - z_{i-1})}{2(z_n - z_1)}, \tag{8.18}$$

kus c_i on helikiirus *i*-ndal horisondinil; z_i – *i*-ndale horisondile vastav sügavus; z_n – horisont, mille kohta arvutatakse keskmist kiirust; z_1 – esimene sügavus, kus sooritati mõõtmine.

Joonis 8.2. Helikiiruse mõõtja Odom DIGIBAR PRO. Vasakul mõõtesond, paremal juhtpult. Viimase ekraanil on näha mõõdetud helikiirus 1520 m/s

Veidi täpsemini saab leida keskmise helikiiruse gradientide abil järgmise valemiga:

$$c_{kesk} = \frac{z_n - z_1}{\sum_1^n \frac{1}{g_i} \ln\left(\frac{c_i}{c_{i-1}}\right)}. \tag{8.19}$$

Helikiiruse gradiendi saame valemiga

$$g_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}. \tag{8.20}$$

Helikiiruse erinevusest nominaalväärtusest tingitud sügavusparand (nimetatakse ka lühemalt – helikiirusest tingitud sügavusparand) arvutatakse valemiga

$$\nu z_c = z_{KL}\left(\frac{c_{kesk}}{c_0} - 1\right), \tag{8.21}$$

kus c_0 on kajaloodi nominaalne helikiirus (enamasti 1500 m/s).

Eriti täpsel sügavusmäärangul suurtel sügavustel mõõdetakse helikiirust standardhorisontidel kuni 2000 m sügavuseni. Kui sügavus on suurem, arvatakse, et heli vertikaalkiiruse võiks arvutada ekstrapolatsiooni teel [Коломийчук, 1975]:

$$c_{n+1} = c_n + 0{,}018(z_{n+1} - z_n), \qquad (8.22)$$

kus c_n on helikiirus viimasel mõõtmishorisondil; z_n – mere sügavus viimasel mõõtmishorisondil; c_{n+1} – helikiirus ekstrapoleeritud horisondil $n+1$; z_{n+1} – mere sügavus ekstrapoleeritud horisondil $n+1$; 0,018 – helikiiruse gradiendi moodul sügavuse järgi.

Riistaparandid. Vaatleme võrrandisse (8.6) kuuluvaid parandeid νz_{NA}, νz_L ja νz_s. Parandit νz_{NA} kajaloodi nulliaseme mõõtmisvea kõrvaldamiseks loodimisel väikeses sügavuses (kuni 150 m) eraldi ei määrata, sest see kuulub üldise tareerimisparanduse sisse. Süvaveekajaloodide parandi νz_{NA} saab määrata, kui võrrelda mõõtmistulemusi kõrgtäpsete kajaloodide abil saadud tulemustega. Selleks kasutatakse valemit

$$\nu z_{NA} = (z_{KL} + \nu z_c + \nu z_s + \nu z_{NA})_{KTL} - (z_{KL} + \nu z_c + \nu z_s)\,, \qquad (8.23)$$

kus esimeses hulkliikmes on kõrgtäpse kajaloodi mõõtmisandmed.

Akustiliste antennide vahekauguse mõõtmisveast tingitud parandit Δz_L tänapäeval praktiliselt ei esine. Parand νz_s, mis on põhjustatud akustiliste antennide süvistusest, arvutatakse valemiga (7.13), kusjuures tegeliku veepinna kaugus H_T mõõdetakse, andmed umbreelingu või laevateki kõrguse H ja akustiliste antennide kõrgusmuudu h kohta kiilu suhtes aga saadakse laeva formularist.

Merepõhja kaldest tingitud parand νz_α. See parand arvutatakse valemitega (7.17) ja (7.19) või nendest tuletatud valemitega

$$\nu z_\alpha = z\left(\frac{1-\cos\alpha}{\cos\alpha}\right), \quad \nu z_\alpha = z\left[\frac{\cos(\alpha-\gamma)}{\cos\alpha} - 1\right], \qquad (8.24)$$

kus z on mõõdetud sügavus; α – põhja kaldenurk; γ – kiirguskoonuse moodustaja hälve vertikaalist (pool suunadiagrammi tipunurka). Esimest valemit kasutatakse juhul, kui $\gamma > \alpha$, teist – kui $\gamma < \alpha$.

Põhja kaldenurga võib leida valemist

$$\alpha = \arctan\frac{\Delta z}{\Delta s}, \qquad (8.25)$$

kus Δz on sügavuse muut; Δs – mõõdetud sügavuste vahekaugus.

Vaadeldes suhet $\dfrac{\Delta z}{\Delta s}$ piirprotsessis $\Delta s \to 0$, saame funktsiooni $z(x,y)$ gradiendi mooduli g. Viimast suurust on kerge määrata, kui põhjareljeef on kujutatud planšetil esmaselt moodustatud samasügavusjoontega. Sel juhul on Δz võrdne samasügavusjoonte lõikevahega ja Δs – samasügavusjoonte vahekaugusega etteantud punktides. Reljeefi mõõdistamisel kajaloodiga püütakse halsid valida mööda samasügavus-

joonte üldise suuna normaali, mis võimaldab hinnata gradiendi moodulit g valemiga (8.24), st võime väita, et **põhja kalde gradiendi moodul võrdub põhja kaldenurga tangensiga.**

Gradiendi $\vec{g}$ mooduli g ja suuna τ määrame valemitega, kus g_x ja g_y on gradiendi projektsioonid koordinaattelgedel.

$$\left.\begin{aligned} g &= \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \\ \tau &= \arctan\frac{g_y}{g_x} \end{aligned}\right\} \qquad (8.26)$$

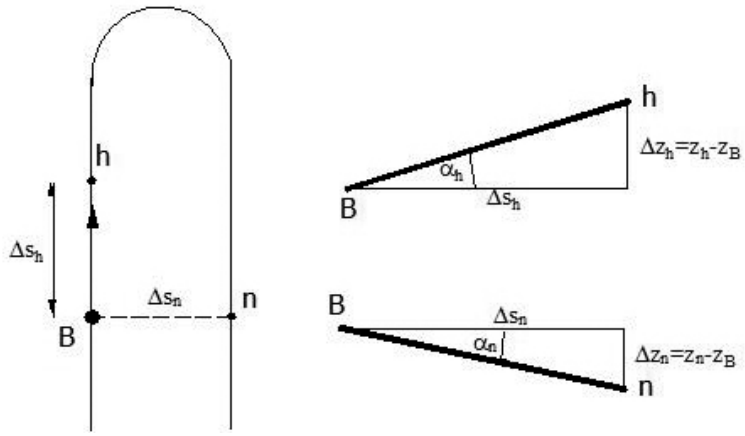
Siit järeldub, et põhja kaldenurkade määramiseks on vaja teada funktsiooni $z = z(x, y)$ osatuletisi kahe risti oleva suuna järgi. Mõõdistamishalssidel saadakse ainult üks tuletis, mis ei võimalda gradienti määrata, seepärast tuleb kasutada naaberhalsside koordineeritud sügavuste või halsside lõikepunktide andmeid.

Esimesel juhul, kui loodimine sooritatakse paralleelsetelt halssidelt, võetakse sügavuse muudud Δz_h ja kaugused Δs_h piki etteantud halsijoont ning Δz_n ja Δs_n piki selle normaali naaberhalssidega lõikumise punktides (joon. 8.3). Siis

$$g_h = \frac{\Delta z_h}{\Delta s_h}, \quad g_n = \frac{\Delta z_n}{\Delta s_n}, \qquad (8.27)$$

kus g_h ja g_n on gradiendi projektsioonid vastavalt halsil ja halsi normaalil ja τ on gradiendi suunanurk halsi suhtes.

$$g = \sqrt{g_h^2 + g_n^2}; \qquad \tau = \arctan\frac{g_n}{g_h} \qquad (8.28)$$



Joonis 8.3. Põhjakalde gradientide arvutamise lähteandmed punkti *B* jaoks paralleelhalsside puhul. Arvutustes kasutatakse kaugust *Bh* ja *B* normaalil oleva naaberhalsi punkti *n* kaugust punktist *B* (st *Bn*) ning punktide *B*, *h* ja *n* sügavusi

Teisel juhul lõikuvad halsid suvaliste nurkade all (näiteks põhihalss ja kontrollhalss), seepärast saab gradiendi moodulit ja suunda leida üksnes mõningate eelnevate arvutuste teel.

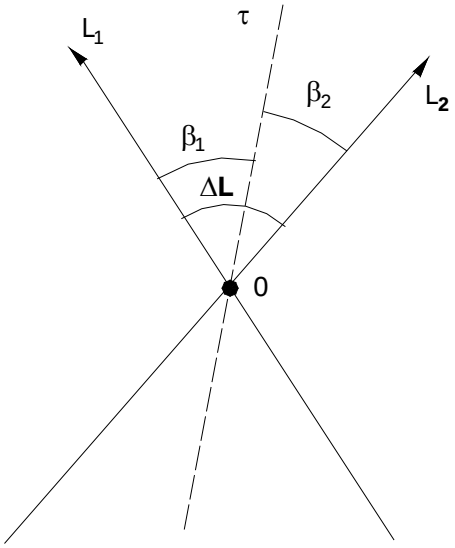
Lõikugu punktis O suundades L_1 ja L_2 rajatud halsid (joon. 8.4). Tähistame põhja maksimaalse kalde, s.o gradiendi suuna τ. Nurgad, mida gradiendi suund moodustab halsside suundadega, tähistame vastavalt β_1 ja β_2. Halsside suundade vahelise nurga märgime ΔL.

Siis saame gradientidele suundades L_1 ja L_2 avaldised $g_1 = g\cos\beta_1$ ja $g_2 = g\cos\beta_2 = g\cos(\Delta L - \beta_1)$, nende suhe aga osutub vabaks tundmatust suurusest g:

$$\frac{g_2}{g_1} = \frac{\cos(\Delta L - \beta_1)}{\cos\beta_1} = \cos\Delta L + \sin\Delta L \tan\beta_1 .$$

Gradiendid g_1 ja g_2 saame, leides halsside lõikepunktis suundadel L_1 ja L_2 suurused Δz_i ja Δs_i. Suurus ΔL on teada. Lahendame viimase võrrandi tan β_1 suhtes.

$$\beta_1 = \arctan\frac{g_2 - g_1\cos\Delta L}{g_1\sin\Delta L} \tag{8.29}$$



Joonis 8.4. Põhjakalde gradiendi mooduli ja suuna leidmine lõikuvate halsside puhul

Teades nurga β_1 väärtust, saame merepõhja kalde väärtuse halsside lõikepunktis arvutada seosest

$$\tan\alpha = \frac{g_1}{\cos\beta_1} = \frac{g_2}{\cos\beta_2}. \qquad (8.30)$$

Andmetöötlemise automatiseeritud süsteemid ja pinnamoe arvmudelid annavad võimaluse saada lisateavet põhja kalde kohta. Arvmudelite sõlmedes, mis kujutavad endast arvutiprogrammiga valitud iseloomulikke sügavusi, arvutatakse gradiendid g_i paljude suundade järgi. See lubab saada gradiendi g_α tõenäoseima väärtuse ja hinnata kindlamalt tulemuse täpsust.

Mitmekiireliste kajaloodide kasutamisel muutub parandite vz_α määramine oluliselt kergemaks, sest on olemas informatsioon sügavuste muutumise iseloomu kohta kahes suunas: piki halssi ja sellega ristuvas tasandis.

Joonisel 8.5 on esitatud lihtsustatud juhus, kus mõõdistamine toimub ainult kolmekiirelise süsteemiga. Punktis *C* on üheaegselt mõõdetud sügavus *z* = *CB* ja kaks kaldkaugust *CA* = d_1, *CE* = d_2. Tähistame helikiirte kalde vertikaalist γ, siis α_n on põhja kaldenurk piki põhjajoont *ABE*; tan α_n väärtuse võib saada täisnurksetest kolmnurkadest *AB"B; BEE; AE"E* ühega valemitest (8.31):

$$\left.\begin{aligned} \tan\alpha'_n &= \frac{BB''}{AB''} = \frac{d_1\cos\gamma' - z}{d_1\sin\gamma'} \\ \tan\alpha''_n &= \frac{EE'}{BE'} = \frac{z - d_2\cos\gamma'}{d_2\sin\gamma'} \\ \tan\alpha'''_n &= \frac{d_1 - d_2}{(d_1 + d_2)\tan\gamma'} \end{aligned}\right\}. \qquad (8.31)$$

Saadud väärtus tan $\alpha_n = g_n$ kujutab endast gradiendi $\vec{g}$ projektsiooni teljel, mis on risti laeva diametraaltasandiga.

Põhjakalde mööda halsijoont võib saada nagu varem:

$$tan\alpha_h = \frac{\Delta z_h}{\Delta s_h},$$

kus tan $\alpha_h = g_h$ on gradiendi $\vec{g}$ projektsioon halsijoonel.

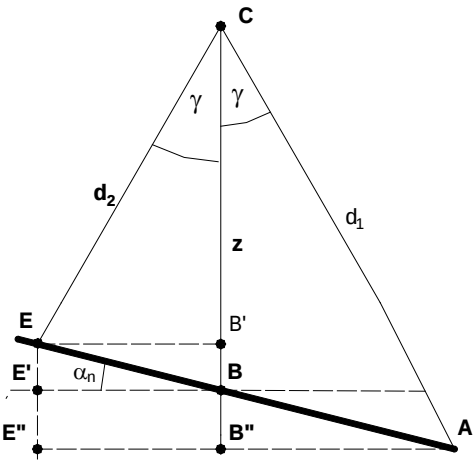
Järelikult võib kasutada seost (8.28) ja leida gradiendi mooduli ning vajaduse korral ka tema suuna avaldistest

$$\tan\alpha = \sqrt{g_n^2 + g_h^2}; \qquad (8.32)$$

$$\beta = \arctan\frac{g_n}{g_h};$$

$$\tau = K + \beta,$$

kus K on laeva kurss halsil.



Joonis 8.5. Halsi suunaga ortogonaalse põhjakalde gradiendi ja mooduli leidmine kaldkiirtega loodimisel

Reljeefi mõõdistamisel mitmekiireliste süsteemide abil mõõdetakse igas loodimispunktis täiendav hulk sügavusi, mis võimaldab põhja kaldenurki määrata vähimruutude meetodiga. Gradiendi mooduli $g = \tan\alpha$ määramise keskmise ruutvea võib leida valemiga

$$m_g = \sqrt{m_{gx}^2\cos^2\tau + m_{gy}^2\sin^2\tau}\,. \tag{8.33}$$

Tuletised g_i erinevate suundade järgi arvutatakse seosest (8.25). Seega esitame keskmise ruutvea m_{g_i} valemiga

$$m_{gi} = \sqrt{\frac{m_{\Delta z}^2 + g_i^2 m_{\Delta s}^2}{\Delta s^2}}\,. \tag{8.34}$$

Refraktsiooniparand. Refraktsioonist tingitud parandi Δz_R määramise skeem on näidatud joonisel 7.1 ja esitatud valemiga (7.9). Lehvikkajaloodid registreerivad kaldkauguse r_R. Viies sellesse kaugusesse parandid, mida vaadeldi eespool, aga samuti kiire kõverusest tingitud parandi, võib saada kaldkauguse piisavalt täpse väärtuse mööda sirget *OB*. Nagu näha jooniselt 7.1, on põhja kaldkauguselt r_R kerge üle minna sügavusele tingimusel, et on teada selle joone kaldenurk γ_n:

$$z = r_R \cos\gamma_n. \tag{8.35}$$

Kui mingi punkti sügavust on mõõdetud kaldkiirega, on vaja selle punkti tõelise sügavuse saamiseks teada horisontaalkaugust R_R punktist *B*, milles see sügavus mõõdeti, kuni akustilise antenni projektsioonini *C* horisontaaltasandil:

$$R_R = r_R \sin\gamma_n. \tag{8.36}$$

Tundmatute nurkade γ_n arvutamiseks kasutame Snelliuse valemit

$$\sin\gamma_i = \frac{c_i}{c}\sin\gamma, \tag{8.37}$$

kus c_i on helikiirus *i*-ndas tasandis; c – helikiirus akustilise antenni tasandis.

Nurga γ väärtus iga kanali jaoks on teada instrumendi juhendist või etaloonimistulemustest. Helikiirus c_i on saadud mõõtmistest. Kahe naabertasandi (sügavushorisondi) vahelises kihis kasutame keskmist väärtust

$$\gamma_i = \frac{1}{2}(\gamma_{i-1} + \gamma_i)\,.$$

Siin γ_{i-1} ja γ_i arvutatakse valemiga (8.37).

Mitme kihi poolt eraldatud tasandi jaoks arvutatakse γ_n kui kaalutud keskmine:

$$\gamma_n = \frac{h_1\bar{\gamma}_1 + h_2\bar{\gamma}_2 + \ldots + h_n\bar{\gamma}_n}{h_1 + h_2 + \ldots + h_n}. \tag{8.38}$$

Sügavuse määramise ülesanne lahendatakse iteratsioonimeetodil järgmise algoritmi abil:

1) arvutatakse sügavuse ligikaudne väärtus valemiga (8.35)

$$\tilde{z} = r_R \cos\gamma\,;$$

2) $\widetilde{z}$ väärtuse järgi otsitakse lähimad standardhorisondid z_n, z_{n-1}, mille vahemikus gradient $\frac{\delta c}{\delta z}$ muutub lineaarselt;

3) lineaarse interpolatsiooni meetodil arvutatakse kiire kaldenurk γ_z sügavuses z

$$\gamma_{\widetilde{z}} = \gamma_{n-1} + \left(\widetilde{z} - z_{n-1}\right)\frac{\gamma_n - \gamma_{n-1}}{h_n}, \qquad (8.39)$$

kus h_n on horisontide n ja n – 1 vahelise veekihi vertikaalmõõt;

4) arvutatakse sügavuse teine lähend

$$z' = r_R \cos\gamma_{\widetilde{z}} ;$$

5) seose (8.39) abil saadakse täpsustatud $\gamma_{z'}$ väärtus, kasutades $\widetilde{z}$ asemel uut väärtust z'.

Iteratsiooniprotsess lõpeb, kui sügavuse z väärtus järgmisel iteratsioonisammul ei erine eelnevast rohkem kui lubatava suuruse võrra.

Arvutusnäide 8.1. Refraktsiooniparandiga parandatud sügavuse arvutus. Kaldkiire nominaalne kaldenurk 30°, mõõdetud kaldkaugus 15,8 m, z_0 (kajaloodi antenni sügavus) 2,0 m, kajaloodi arvestuslik helikiirus 1500 m. Ülejäänud lähteandmed (standardhorisondid z_i ja helikiirused c_i) ning arvutused $\gamma_i = \arcsin\frac{c_i \sin\gamma}{c_0}$ on toodud tabelis.

Tabel 8.1

z (m)	c (m/s)	γ (°)	z (m)	c (m/s)	γ (°)
2,0	1490	30	12,0	1464	29,4
4,0	1481	29,8	**14,0**	1460	29,3
6,0	1474	29,6	16,0	1456	29,2
8,0	1471	29,5	18,0	1452	29,2
10,0	1467	29,5	20,0	1448	29,1

Lahenduskäik:

1. Leiame ligikaudse sügavuse $z = r_R \cos\gamma = 15{,}8 \times \cos 30^o = 13{,}6$ m.
2. Otsime ligikaudsele sügavusele kõige ligema standardhorisondi 14,0 m.
3. Arvutame kiire keskmise kaldenurga kuni saadud standardhorisondini

$$\gamma'_k = \frac{\sum_1^7 \gamma}{n} = \frac{207{,}1}{7} = 29{,}6° \cdot$$

4. Arvutame sügavuse teise lähendi $z' = r_R \times \cos \gamma'_k = 13{,}7\text{m}$.

Arvutusnäide 8.2. Sügavusparandi leidmine osaparandite summeerimisega

Sügavusel 50 m on soolsus 5‰ ja temperatuur 5 °C. Arvutusmahtude vähendamiseks on helikiirused kajaloodi vibraatorite tasandil (c_{0m} = 1489 m/s) ja sügavusel 20 m (c_{20m} = 1455 m/s) antud. Kajaloodi arvutuslik helikiirus on 1500 m/s. Kiirguskoonuse moodustaja ja vertikaali vaheline nurk on 3°.

Kaugus kiilust laevatekini on 4,0 m, kiilust kajaloodi antennini 0,3 m ja merepinnast laevatekini 1,0 m.

Nullsügavusele vastav lugem TVP veemõõdulatil on 5,00 m, tasemelugem mõõdistamise algul 5,12 m ja lõpul 5,06 m.

Punktis A oli sügavuslugem 52,3 m, 10 m piki halssi edasi oli sügavus 53,0 m. Punktist A moodustatud halsi normaali ja naaberhalsi ristumisel saadi sügavus 56,5 m. Halsside vahekaugus oli 20 m.

Lahenduskäik:

1. Leiame antennide süvistusest tingitud parandi

$\nu z_s = H - H_T - h = 4{,}0 - 1{,}0 - 0{,}3 = 2{,}7$ m.

2. Leiame tasemeparandi $\nu z_f = m - f_k = 5{,}00 - (5{,}12 + 5{,}06)/2 = -0{,}09$ m.

3. Leiame helikiiruse parandi.

3.1. Leiame helikiiruse sügavusel 50 m Del Grosso valemiga

$C_{50m} = 1448{,}6 + 4{,}618T - 0{,}0523T^2 + 0{,}00023T^3 + 1{,}25(S - 35) - 0{,}011(S - 35)T + + 0{,}00875z = 1448{,}6 + 4{,}618 \times 5 - 0{,}0523 \times 5^2 + 0{,}00023 \times 5^3 + 1{,}25(5 - 35) - - 0{,}011(5 - 35)5 + 0{,}00875 \times 50 = 1435{,}0$ m/s.

3.2.Leiame veesamba keskmise helikiiruse valemiga (8.18)

$$c_k = \frac{\sum (c_i + c_{i-1})(z_i - z_{i-1})}{2(z_n - z_1)} =$$

$$= \frac{(1489 + 1455)(20 - 0) + (1455 + 1435)(50 - 20)}{2(50 - 0)} = 1455{,}8 \; m/s \cdot$$

3.3. Leiame helikiiruse parandi punktis *B* looditud sügavusel 52,3 m

$$vz_c = z_{KL}\left(\frac{c_k}{c_0} - 1\right) = 52{,}3\left(\frac{1455{,}8}{1500} - 1\right) = -1{,}54 \; m \cdot$$

4. Leiame merepõhja kaldest tingitud parandi.

4.1. Leiame kalde gradiendi halsil

$$g_h = \tan\alpha_h = \frac{|(z_A - z_{A+10})|}{10} = \frac{|(52{,}3 - 53{,}0)|}{10} = 0{,}07 \cdot$$

4.2. Leiame kalde gradiendi halsi normaalil

$$g_n = \tan\alpha_n = \frac{|(z_A - z_n)|}{20} = \frac{|(52{,}3 - 56{,}5)|}{20} = 0{,}21 \cdot$$

4.3. Leiame üldise kalde gradiendi

$$g = \sqrt{g_h^2 + g_n^2} = \sqrt{0{,}07^2 + 0{,}21^2} = 0{,}2214 \, .$$

4.4. Leiame üldise põhjakalde $\alpha = \arctan g = 12{,}5^{\mathrm{O}}$

4.5. Leiame kaldeparandi, kusjuures kuna $\alpha > \gamma$, siis kasutame (8.24) teist valemit

$$vz_\alpha = z_{KL}\left[\frac{\cos(\alpha - \gamma)}{\cos\alpha} - 1\right] = 52{,}3\left[\frac{\cos(12{,}5 - 3)}{\cos 12{,}5^\circ} - 1\right] = 0{,}54 \; m \cdot$$

5. Leiame parandatud sügavuse

$z = z_{KL} + vz_s + vz_f + vz_c + vz_\alpha =$

$= 52{,}3 + 2{,}7 - 0{,}09 - 1{,}54 + 0{,}54 = 53{,}91$ m.

8.4. Kajaloodiga mõõdetud sügavuse mõõtemääramatus

Mõõtmiste ja andmetöötluse tulemusena saadakse sügavus

$$z = z_{\text{lug}} + \nu z_f + \nu z_{KL}, \tag{8.40}$$

kus z_{lug} on kajaloodi indikaatorseadmetelt loetud sügavus; νz_f – veetaseme kõikumisest tingitud parand (vt. valem 4.41); νz_{KL}, – kajaloodi parand, mille leiame valemiga (8.6).

Funktsiooni (8.40) parema poole liidetavate määramisel esinevad juhuslikud hälbed, mille tõenäolised suurused määravad lõppkokkuvõttes mõõtmiste täpsuse.

Kuivõrd (8.40) on lineaarfunktsioon, siis mõõdetud sügavuse keskmise ruuthälbe saab järgmisest avaldisest:

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma^2_{z(lug)} + \sigma^2_{z(f)} + \sigma^2_{z(KL)}}, \tag{8.41}$$

kus avaldise komponendid saab alljärgnevatest arutlustest.

1. Lugemi keskmine ruuthälve $\sigma_{z(lug)}$ sõltub kajaloodi indikaatorseadmeist, kusjuures tänapäevaste digitaalkajaloodide puhul registreeritakse sügavused üldjuhul kuni 100 m täpsusega ±0,01 m [EM 1110-2-1003, 2002].
2. Veetasemest tingitud sügavusparandi keskmine ruuthälve avaldub valemiga

$$\sigma_{z(f)} = \sqrt{\sigma^2_A + \sigma^2_{AB} + \sigma^2_f}, \tag{8.42}$$

kus σ_A on nullsügavuse määramise KRH (keskmine ruuthälve ehk standardhälve) alalistes või täiendavates tasemevaatluspostides (TVP); σ_{AB} on nullsügavuse ajutisele postile edastamise standardhälve (KRH); σ_f on hetkenivoo leidmise KRH mõõtmispunktis.

Normaaltaseme hälve σ_A ei tohiks ületada 0,01 m (vt jaotis 4.3). Kui eeldada, et mandril olevale ajutisele TVP-le võib nulltaseme kanda II klassi nivelleerimisega ja maksimaalne kaugus I klassi fundamentaalreeperist võib olla kuni 25 km [Kala jt, 2015], siis nivelleerimise KRH σ_{AB} võib ulatuda peale tasandamist 0,005 m [E V Maa-amet, 1994]. Mõlemaid vigu võib pidada, võrreldes hetketaseme KRH-ga, tühisteks.

Mõõtmispiirkonna hetketaseme KRH ajutise TVP suhtes jääb loodetega meres enamasti 0,2 m piiridesse [IHO Manual, 2011], loodeteta meres on see hinnanguliselt tunduvalt vähem, st 0,1 m. Aga kui mõõdistamise kõrguslik/plaaniline sidumine sooritada RTK GNSSi abil, siis taseme määramise KRH on 20 mm + 2 ppm, st KRH 15 km raadiuses asuva lähtepunkti suhtes oleks 0,05 m, millele lisanduks geoidi mudeli ESTGEOID2011 keskmine ruuthälve 1–2 cm [Rüdja, Sander, 2013]. Seega kokku ikkagi 0,05 m.

Niisiis veetasemest tingitud sügavusparandi keskmine ruuthälve jääb üldjuhul valemi (8.42) alusel kuni 15 km kaugusel rannast 0,05 m piiridesse, aga kaugemal, kus RTK GPS-meetodit ei saa kasutada, 0,1 m piiridesse.

Kui mõõdistamispiirkonna ligidal avamerel on mõni väikesaar, on soovitatav rajada sinna ajutine TVP ja määrata selle reeperi kõrgus pikaajalise vaatlusega staatilise GNSSi abil, kasutades üleminekuks ellipsoidilistelt (geodeetilistelt) kõrgustelt normaalkõrgustele geoidi mudelit. Kõrguse standardmääramatus üleminekul mandril asuvalt lähtepunktilt võib olla 3 mm + ppm. Kaugeimad saared mandrist on Ruhnu (60 km Kihnust) ja Vaindloo (30 km), seega oleks nullsügavuse ajutisele TVP ülekandmise KRH σ_{AB} vastavalt 0,063 m ja 0,033 m.

Kui ettevalmistamiseks on küllalt aega, võib aastase vesinivelleerimise seeriaga saavutada ka veidi parema täpsuse, näiteks loodetega meres võiks kaugusel mandrist kuni 50 km keskmine ruuthälve σ_{AB} jääda 0,05 m piiridesse ja loodeteta meres 0,02 m piiridesse [Истошин, 1969]. Kummalgi juhul tuleb arvestada veel geoidi mudeli veaga.

3. Edasiste arvutuste hõlbustamiseks ja silmas pidades seost (8.6), kirjutame välja kajaloodiga mõõdetud sügavuse vea võrrandi

$$\sigma_{z(KL)} = \sqrt{\sigma^2_{z(N)} + \sigma^2_{z(L)} + \sigma^2_{z(NA)} + \sigma^2_{z(c)} + \sigma^2_{z(\alpha)}}\,. \qquad (8.43)$$

Kitsa suunadiagrammiga kajaloodide kasutamisel tuleb arvestada veel aluse õõtsumisest tingitud keskmist ruuthälvet σ_{z_K}, kaldkiiri kasutavates süsteemides peale selle ka refraktsioonihälvet σ_{z_R}.

Vaatleme seose (8.43) iga liiget eraldi. Esimesed kolm hälvet praktilist tähtsust ei oma, sest parandite vz_s, vz_L ja vz_{NA} määramise varem kirjeldatud võtted (sh tareerimine) kindlustavad nende parandite kõrge täpsuse.

Parandite vz_c määramise keskmise ruuthälbe võib saada seose (7.2) põhjal

$$\sigma_{z(c)} = z\frac{\sigma_c}{c}\,, \qquad (8.44)$$

kus σ_c on vees heli vertikaalkiiruse määramise keskmine ruuthälve.

Arvutused näitavad, et põhilised sügavuste moonutused tulenevad heli vertikaalkiiruse määramise hälvetest ja σ_{z_c} võib saavutada isegi väärtuse 0,3…0,5 protsenti z-st, st 100 m sügavuse puhul 0,3...0,5 m.

Merepõhja kaldest tingitud parandi määramise keskmise ruuthälbe $\sigma_{z(\alpha)}$ saame pärast seose (7.18) diferentseerimist ja diferentsiaalide asendamist keskmiste ruuthälvetega:

$$\sigma_{z(\alpha)} = z_{KL}\sigma_{\alpha}, \qquad (8.45)$$

kus σ_{α} on põhja kaldenurkade määramise keskmine ruuthälve, mille saame seosest (8.34) peale gradiendi hälbe, st tangensi teisendamist nurgaks. Viga oleneb merepõhja iseloomust.

Nagu juba märgitud, tekib kitsa suunadiagrammiga kajaloodide ja mitmekiireliste süsteemide kasutamisel vajadus sisse viia parandid $vz_{k\tilde{o}}$, mis arvestavad kõikumise mõju.

Kõikumisnurki mõõtvates seadmetes võib neid parandeid arvutada valemiga (7.22), kuid nende määramise keskmise ruuthälbe $\sigma_{z_{k\tilde{o}}}$ saame vastavalt valemile (7.23) järgmisel kujul:

$$\sigma_{z_{k\tilde{o}}} = z\sin(\gamma + \Delta\gamma)\frac{\sigma_{\gamma}}{\rho'}, \qquad (8.46)$$

kus γ on kiire etteantud kaldenurk; $\Delta\gamma$ – pardakõikumise mõõdetud nurk;

σ_{γ} – kõikumisnurkade keskmine ruuthälve (eeldatavad väärtused – vt alapunkt 7.7).

Refraktsiooni arvutamise keskmist ruuthälvet võib hinnata valemiga

$$\sigma_{z_R} = r_R \sin\gamma_n \frac{\sigma_{\gamma n}}{\rho'}, \qquad (8.47)$$

kus r_R on kaldkaugus, mis on mõõdetud refraktsiooni olemasolul; γ_n - akustilise kiire kaldenurk (arvestades refraktsiooni); σ_{γ_n} – seose (8.38) järgi kaldenurga γ_n arvutamise keskmine ruuthälve.

Eelnevat kokku võttes võib arvestada, et valemi (8.41) esimesed kaks komponenti annavad tühised vead, võrreldes kajaloodi heli vertikaalkiiruse määramisest tingitud vigadega. Ülejäänud kajaloodist tingitud vead olenevad suuresti mõõtmistingimustest.

Lõpetuseks peab mainima, et tänapäevaste mõõdistamise automaatsüsteemide puhul on terve hulk sensoreid (GPS, kajalood, inertsiaalsensorid jms) ühendatud mõõdistamise pardaarvutiga, mis koondab ja töötleb saadud andmed. Andmed tuleb ühildada omavahel ajaliselt väga täpselt, eriti puudutab see lehvikkajaloode, mille puhul just inertsiaalsensorite andmete fikseerimistäpsus peaks olema millisekundi suurusjärgus. Hea ajalise taustsüsteemi tagab siin GPS-vastuvõtja, kuna selle andmete ajaline täpsus on reaalajas 0,1 mikrosekundit [Parker, Mallace, 2005].

8.5. Kaardil märgitud sügavuste mõõtemääramatus

Sügavus *z*, mis on arvutatud valemiga (8.40) ja mida iseloomustab mõõtmise keskmine ruuthälve σ_z, märgitakse kaardile vastavas punktis. Et aga punktide koordinaadid on määratud samuti mingi hälbega, tekib täiendav mõõtemääramatus, mida vaadeldakse allpool.

Olgu punktis *M* (joon. 8.6) mõõdetud sügavus $MM' = z_0$. Kohamäärangu hälbe tõttu kantakse see mingisse punkti *N*, kus tegelik sügavus $NN' = z$. Järelikult tekib kohamäärangu hälbe tulemusena sügavushälve.

Tähistame: D_{MN} – punktide *M* ja *N* vahekaugus; α' – põhja kaldenurk suunal $M'N'$; α – põhja maksimaalne kaldenurk; β – nurk suuna ja maksimaalse kalde suuna vahel.

Jooniselt 8.6 järeldub:

$$\Delta z_M = N'N'' = D_{MN} \tan\alpha',$$

$$\tan\alpha' = \tan\alpha \cos\beta,$$

$$\Delta z_M = D_{MN} \tan\alpha \cos\beta.$$

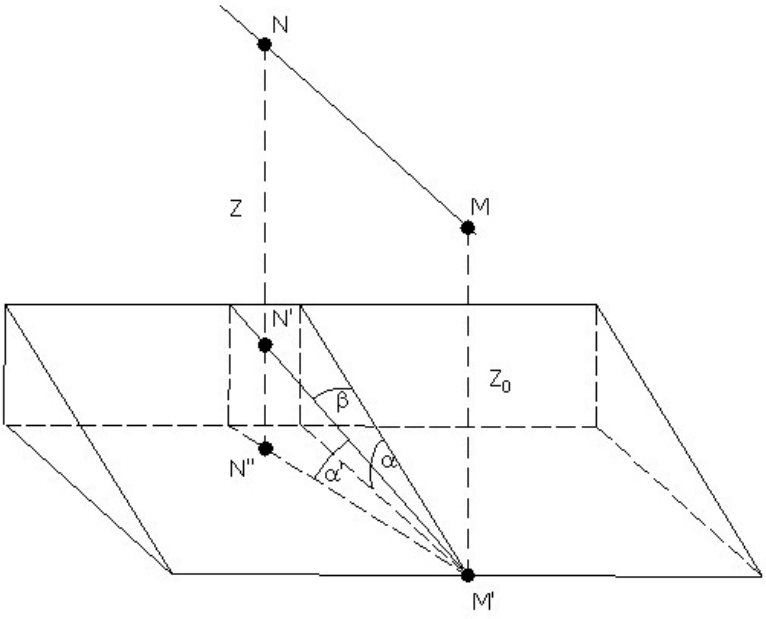
Et kõrvalekalde D_{MN} tegelik suurus ega ka selle kõrvalekalde suund ei ole teada ja hälvetel on juhuslik iseloom, siis läheme üle keskmistele ruuthälvetele. Olgu hälbe D_{MN} moodul võrdne kohamäärangu keskmise ruuthälbega σ_{KM}. Eeldades, et kõik punktide suunanurkade väärtused põhja maksimaalse kaldejoone suhtes on võrdse tõenäosusega, saame $\beta_{kesk} = 45^o$. Siis sügavuse keskmise ruuthälbe $\sigma_{z(KM)}$, mis tekib kohamäärangu hälvete σ_{KM} tulemusena, võib esitada valemiga

$$\sigma_{z(KM)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_{KM} \tan\alpha . \qquad (8.48)$$

Valemis (8.48) mõistetakse sügavuse kohamäärangu määramatusest tuleneva keskmise ruuthälbe m_{KM} all summaarset hälvet

$$\sigma_{KM} = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_{gr}^2} , \qquad (8.49)$$

kus σ_h on sügavuse kohamäärangu keskmine ruuthälve halssidel; σ_{gr} – sügavuse kaardile kandmise keskmine ruuthälve (graafiline viga).



Joonis 8.6. Kohamäärangu hälbe tõttu tekkinud sügavuse hälve (Laigna, Kala, 2001)

Kaardil märgitud sügavuse üldhälve $\sigma_{z(\ddot{u})}$ koosneb vahetult mõõdetud sügavuste hälvetest σ_z ja kohamäärangu hälvetest $\sigma_{z(KM)}$. Hälbed σ_z ja $\sigma_{z(KM)}$ on sõltumatud. Lõplikult saame

$$\sigma_{z(\ddot{u})} = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_{z(KM)}^2} \cdot \tag{8.50}$$

8.6. Lehvikkajaloodide antennide kalibreerimine

Lehvikkajaloodide antennide kalibreerimine (*Patch test*) on loodimiseelne oluline protseduur, mis seisneb kajaloodi antenni ja liikumissensorite (GNSS-antennid, IMU) koostenihete[39] ja kohamäärangusüsteemi hilistuste määramises. Kalibreerimine sooritatakse pärast süsteemi koostetöid, pika aja möödumisel viimasest kalibreerimisest või pärast kooste jämedaid rikkumisi. Enne kalibreerimist tuleb kontrollida kooste parameetreid. **Oluline on, et kõik kontrollid tehakse järjekorras**.

[39] Koostenihe - vead/viga süsteemi komponentide ühendamisel.

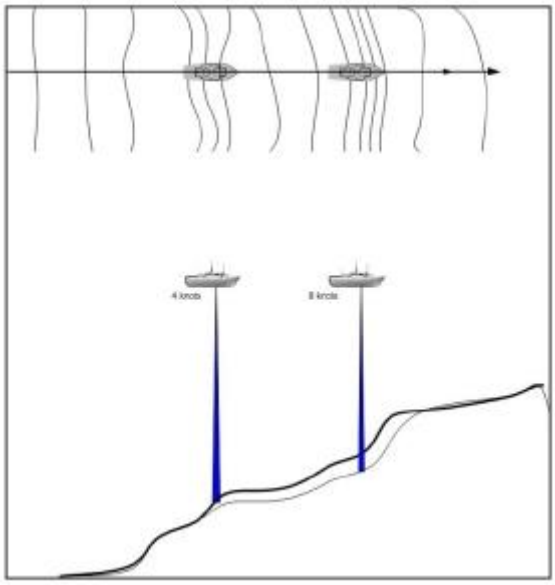
8.6.1. Kohamäärangu hilistuse test

Hilistus on sügavuse mõõtmise ja kohamäärangu ajamomentide erinevus. Selle kontrolliks tuleb läbida mõõdistushalss suure kaldega merepõhja kohal mõõdistuskiirusega ja järgnevalt täpselt sama halss poole mõõdistuskiirusega. Merepõhja kalle peab olema ühtlane ja küllalt pika ulatusega.

Hilistus saadakse, mõõtes erineval kiirusel tehtud loodimisprofiilide sama sügavusega punktide pikivahesid kalde suunal. Pikiõõtsumise mõju vältimiseks tuleb halsid rajada samal kursil. Hilistus leitakse võrrandiga

$$\delta t = \frac{\Delta x}{v_2 - v_1}, \tag{8.51}$$

kus Δx on kahe loodimisprofiili (joon. 8.7) vastavate punktide horisontaalkaugus ja v_1 ja v_2 on laeva kiirus vastavalt halsil 1 ja 2.



Joonis 8.7. Hilistuse kalibreerimine. Ülal on pealtvaade, all – mõõdistustööde vertikaallõige, kus on näha kahe erineva loodimisega saadud profiilide omavaheline hälve [Brennan, 2009]

8.6.2. Pikiõõtsumise hälbe test

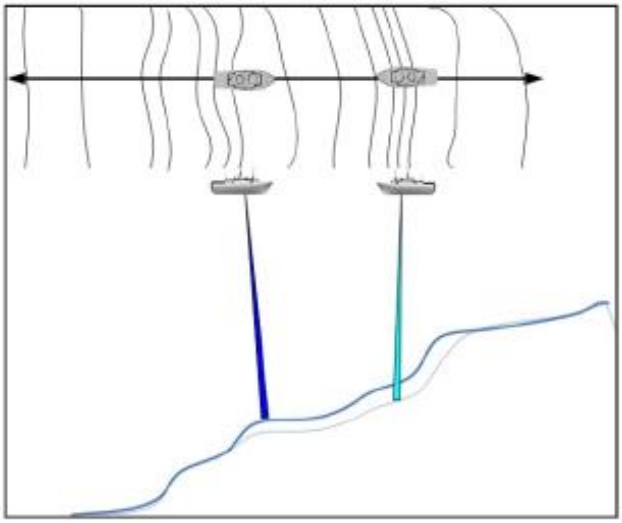
Pikiõõtsumise hälve on nurgaline liithälve, mis koosneb IMU ja kajaloodi antenni joondamise hälbest ja antenni ning mõõdistuslaeva vertikaalse pikitasandi vahelise joondamise hälbest. Kontrolli protseduur seisneb kahe paari vastassuunalise täpselt ühel joonel kulgeva mõõdistushalsi rajamises tugeva ja ühtlase kaldega merepõhja kohal, kuid erinevalt eelmisest kontrollist liigub mõõdistusalus ühtlase kiirusega.

Pikiõõtsumise hälve saadakse, mõõtes erineval kiirusel tehtud edasi-tagasi-suunaliste loodimisprofiilide identsete sügavuspunktide pikivahesid kalde suunal. **Hilistuse mõju kõrvaldamiseks peab süsteemi olema juba sisestatud hilistuse kompensatsioon** (vt 8.6.1).

Pikiõõtsumise hälbe saab võrrandiga

$$\delta\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{2z}\right), \tag{8.52}$$

kus Δx on samal loodimisjoonel halsside vastassuundade vahel saadud identsete punktide vahekaugus ja z on nende punktide sügavus (joon. 8.8).

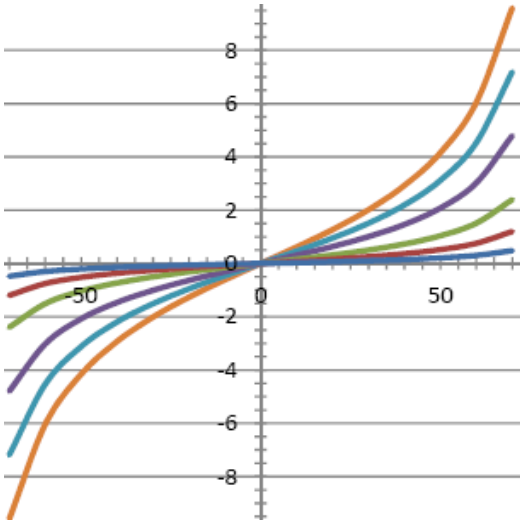


Joonis 8.8. Pikiõõtsumise hälbe kalibreerimine. Ülal on loodimishalsside pealtvaade. All – kahe loodimisprofiili vertikaallõige, kus on näidatud nendevaheline pikiõõtsumisest tingitud hälve [Brennan, 2009]

8.6.3. Asimuudilise hälbe test

Asimuudiline hälve (seegamise ja kursi hälve) on nurgaline liithälve, mis on tingitud kursi sensori näidu hälbest ja kajaloodi antenni joondamise hälbest risti laeva pikiteljega. Asimuudilist hälvet saab määrata kahe eraldi paralleelsete loodimishalsside läbimise teel ühtlase kiirusega madalaveelisel alal, kus on olemas täpselt määratav merepõhja ese (vrakk, kari vms). Külgnevate halsside mõõdistusribadel peab olema ülekattuvus, kuid mitte üle 20% ribalaiusest. Halsid peaksid mööduma vaadeldavast põhjaelemendist võrdsetel kaugustel. Halsside vahekaugus peaks võrduma ligikaudu 2...3-kordse sügavusega.

Peale kohamäärangu hilistuse ja pikiõõtsumise korrektset määramist saadakse asimuudiline hälve, mõõtes merepõhja eseme nihkeid paralleelsetelt [Brennan,2009] naaberhalssidelt. Varem mainitud hälvete mõjud peavad olema elimineeritud. Asimuudilisest hälbest tingitud sügavuspunktide kohamäärangu vead olenevad hälbe suurusest, sügavusest ja kiire kaldenurgast ning võivad olla päris suured (joon. 8.9).

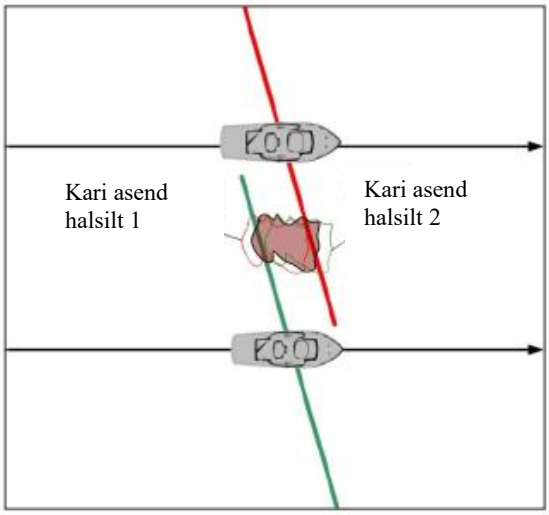


Joonis 8.9. Asukoha viga 1° kursi vea tõttu. Vertikaalteljel asukoha vead (m), horisontaalteljel kiirte nurgad nadiirist (°); helepruun joon – sügavused kuni 200 m, järgnevad jooned tähistavad sügavuste vähenemist sammuga 50 m [Brennan, 2009]

Asimuudiline hälve saadakse valemiga

$$\delta\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{\Delta L}\right), \tag{8.53}$$

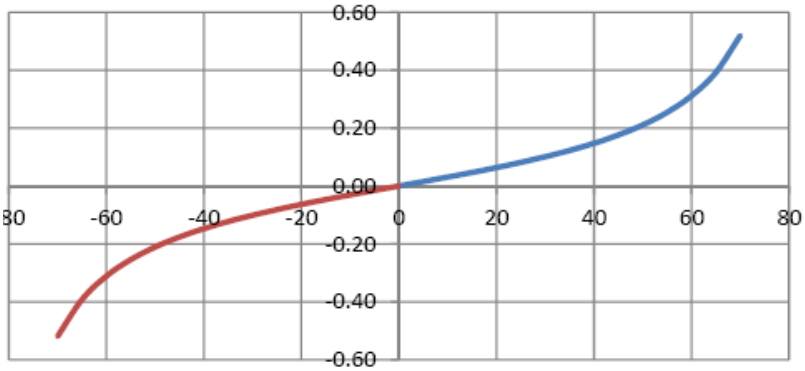
kus Δx on merepõhja eseme (nt kari) kahelt erinevalt halsilt saadud horisontaalne vahekaugus; ΔL on naaberhalsside vahekaugus (joon. 8.10).



Joonis 8.10. Asimuudilise hälbe kalibreerimine. Joonisel on näidatud peene kontuurjoonega kari asendid, mis määrati kummaltki halsilt, ja tumeda kontuuriga kari tõeline asend [Brennan, 2009]

8.6.4. Rullumise hälbe test

Rullumisest tingitud hälve on nurgaline liithälve, mis on tingitud IMU ja kajaloodi antenni joondamise hälbest kohaliku vertikaali suhtes laeva risttasandis. Hälbe testimiseks läbitakse kaks vastassuunalist kattuvat loodimishalssi ühtlase kiirusega korrapärase ja tasase merepõhja kohal. Eespool mainitud hälvete mõjud peavad olema elimineeritud. Kui eelmainitud hälbed põhjustasid eeskätt sügavuspunktide kohamäärangu vigu ja nende kaudu sügavuse vigu, siis rullumise hälve põhjustab otseselt sügavuse vigu.

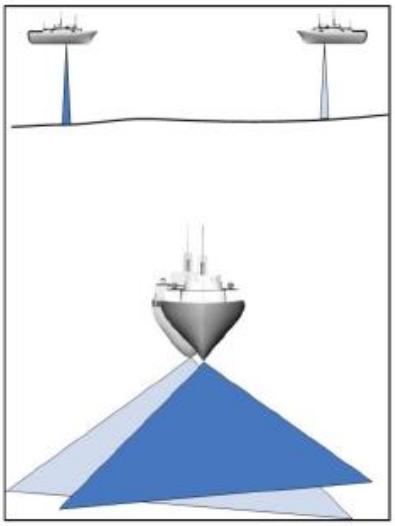


Joonis 8.11. Sügavusmäärangu vead, tingitud mõõdistuslaeva rullumise mõjust 0,5° ja sügavusel 20 m. Sügavuse vigade väärtused on antud vertikaalteljel (– 0,6...+ 0,6 m), kiirte kalded nadiiri suhtes (kraadides) on horisontaalteljel [Brennan, 2009]

Rullumise hälbe saab järgneva võrrandiga

$$\delta\theta_R = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta z}{2\Delta y}\right), \tag{8.54}$$

kus Δz on välimiste kiirtega saadud põhja vertikaalnihe vastupidiste halsside puhul ja Δy on pool mõõdistusriba laiust (joon. 8.12).



Joonis 8.12. Rullumise hälbe kalibreerimine. Ülal kahe mõõdistushalsi külgvaade; all halsiga ortogonaalsed loodimislehvikud vastassuunalistelt halssidelt [Brennan, 2009]

8.6.5. Lehvikkajaloodide antennide kalibreerimise kokkuvõte

Testide lahendamise järjekord oleneb selleks kasutatud tarkvarast, st ei pruugi ühtida siintooduga. Mõõdistamise järjekorral on aga teatud reeglid, mida peab järgima:

- kohamäärangu hilistuse test peab toimuma esimesena;
- rullumise test tuleb lahendada enne seegamise (asimuudilise hälbe) testi;
- kui seegamise test annab suured hälbed, siis tuleks peale selle mõju elimineerimist teha uuesti hilistumise hälbe ja pikiõõtsumise test.

Testimisel on soovitatav kasutada RTK GNSSi, millega saab palju täpsemad tulemused kui DGNSSi abil.

Kui on võimalik, tuleks hilistuse, pikikalde ja kursi testimisel kasutada merepõhja esemeid (eeskätt torujuhtmeid).

Mida sügavam on vesi, seda paremad on testimise tulemused, kuid siiski võiks kasutatavad sügavused piiritleda 400 meetriga.

Kui kajalood ei ole monteeritud täpselt kiilu alla, vaid laeva teljest kõrval, siis peab roolimees selle kõrvalekaldega arvestama: et mitte laev, vaid kajalood kulgeks täpselt ühel ja samal trassil.

Väikese sügavuse puhul võib tekkida laeva täiendava süvistuse efekt. Selle suurus tuleks kindlaks teha ja arvestada või valida sügavus, kus kasutatava ristlemiskiiruse puhul on täiendava süvistuse efekt välistatud.

Testimisala peab olema küllalt pikk, et roolimees jõuaks laeva aegsasti õigele kursile sättida.

9. MEREPÕHJA RELJEEFI MÕÕDISTAMINE

9.1. Mõõdistamise viisid

Merepõhja reljeefi mõõdistamiseks nimetatakse hüdrograafilisi töid, mida tehakse põhjareljeefi kartograafilise kujutise loomiseks vajalike andmete saamiseks. Peale selle kasutatakse mõõdistamise tulemusi olemasolevate kartograafiliste materjalide korrektuuriks, meremeeste operatiivseks informeerimiseks navigatsiooniohtudest, majanduslik-tehniliste ülesannete lahendamiseks ning teadusülesannetes, mis on seotud maailmamere hõlvamisega.

Vastavalt hüdrograafiliste tööde otstarbele võib põhjareljeefi mõõdistamisel eristada järgmisi põhilisi ülesandeid:

- reljeefivormide kuju ja suuruse määramine etteantud detailsusastmega;
- navigatsiooniohtude väljaselgitamine ja nende uurimine;
- faarvaatrite, sadamate ja ankrukohtade uurimine;
- rannale lähenemiseks sobivate piirkondade väljaselgitamine;
- navigatsiooniliseks orienteerumiseks sobivate maastikuelementide väljaselgitamine;
- tehniliste vahendite paigaldamiseks sobivate piirkondade määramine.

Põhjareljeefi mõõdistamiseks kaetakse uuritav ala kindlal viisil rajatud mõõdistamishalssidega. Väheuuritud piirkondades tehakse nii okeanograafiliste kui ka teiste laevade abil marsruutloodimisi, kusjuures sügavust mõõdetakse laeva liikumise teel üksikhalssidega.

Detailsuse astmelt jaotavad IHO (*International Hydrographic Organization*) standardid (№ 44, veebruar 2008) põhjareljeefi mõõdistamisel olenevalt piirkonna sügavusest ja navigatsioonilisest tähtsusest nelja täpsusklassi (tabel 9.1): eriklass (laevade kliirens[40] on kriitiline), 1.a klass, 1.b klass, 2. klass.

Eriklassi aladena tulevad arvesse sadamad, ankrupaigad, laevatatavad kanalid sügavusega mitte üle 40 m. Ülejäänud klasside alade kirjeldused tabelis täpsustusi ei vaja.

Mõõdistamisel on vaja tähelepanu pöörata eelkõige:

- veetaseme määramisele;
- halssidevahelisele kaugusele ja lausmõõdistamise naaberribade kattumisele – kohamäärangu ja halsside rajamise täpsusele;
- sügavusmõõtmise tihedusele ja täpsusele;
- mõõdistamisaparatuuri lahutusvõimele.

Kuna kõik need nõuded on vastastikku seotud, tuleb neid vaadelda kompleksselt.

[40] Kliirens – (minimaalne) kaugus laeva kiilust veekogu põhjani.

Tabel 9.1. Hüdrograafilise mõõdistamise miinimumstandardid [IHO nr 44/08]

Klass	Eri	1a	1b	2
Ala kirjeldus	kriitilise kiilualuse veesügavusega alad	<100 m ja vähemkriitilise kiilualuse veesügavusega alad, kus võib leiduda pealveelaevatamist ohustavaid moodustisi	<100 m veealad, kus kiilualune veesügavus ei ohusta selles piirkonnas kasutatavaid pealveelaevu	üldiselt > 100 m veesügavusega alad, kus merepõhja üldkirjeldust loetakse piisavaks
Suurim lubatav TPM 95% tõenäosusega	2 m	5 m + 5% sügavusest	5 m + 5% sügavusest	20 m + 10% sügavusest
Suurim lubatav TKM 95% tõenäosusega	a = 0.25 m b = 0.0075	a = 0.5 m b = 0.013	a = 0.5 m b = 0.013	a = 1.0 m b = 0.023
Lausmõõdistus	nõutav	nõutav	pole nõutav	pole nõutav
Moodustise avastamine	> 1 m kuubikujulised moodustised	<40 m veesügavusel > 2 m kuubikujulised moodustised sügavamal 10% sügavusest	ei kohaldata	ei kohaldata
Soovituslik suurim mõõteliinide vahe	määramata, kuna nõutav on lausmõõdistus	määramata, kuna nõutav on lausmõõdistus	kolmekordne keskmine veesügavus või 25 m, olenevalt kumb on suurem. LIDAR mõõdistusel punktide vahe 5x5m	neljakordne keskmine veesügavus
Püsimärgistuse ja laevatamiseks oluliste pinnavormide asukohamäärang 95% tõenäosusega	2 m	2 m	2 m	5 m
Rannajoone ja laevatamiseks vähem oluliste pinnavormide asukohamäärang 95% tõenäosusega	10 m	20 m	20 m	20 m
Ujuvmärgistuse keskmine asukoht 95% tõenäosusega	10 m	10 m	10 m	20 m

Tabelis 9.1 TPM on täielik plaaniline määramatus, TKM aga täielik kõrguslik määramatus, mille saab valemiga $\mathrm{TKM} = \sqrt{a^2 + b^2 d}$, kus kordajad *a* ja *b* võetakse tabeli 9.1 kolmandast reast ja *d* on sügavus.

Reljeefi mõõdistamisviisid on vahetult seotud sügavuse mõõtmise vahendite tööprintsiibi, nende konstruktsioonierinevuste ja tehniliste võimalustega.

Reljeefi **diskreetsel mõõdistamisel** määratakse sügavusi piki üksikuid profiile või teatud kaugusele laiali paigutatud punktides.

Lausmõõdistamine näeb ette merepõhja pinnamoe uurimist selliste viiside ja vahenditega, millega oleks võimalik saada praktiliselt selle lausmudel. Järelikult loob lausmõõdistamine eeldused kõigi reljeefivormide ja navigatsiooniohtude väljaselgitamiseks kasutatavate vahendite lahutusvõime piires.

Diskreetseteks peetakse järgmisi mõõdistamisviise:
- loodimine ujuvvahenditelt või -platvormidelt mehaaniliste vahenditega;
- põhjareljeefi loodimine ühekiireliste kajaloodidega;
- loodimine jäält.

Loodimiseks nimetatakse kauguste mõõtmist veepinnast või mingist merepinnaga seotud punktist kuni veekogu põhjani.

Põhjareljeefi loodimine ühekiireliste kajaloodide kasutamisega kujutab endast loodimist koos merepõhja akustilise ülevaatega naaberhalsside vahemikes külgvaatesonarite või teiste hüdrolokatsioonivahendite abil.

Jäält loodimist tehakse rajoonides, mis suure osa navigatsiooniperioodist on kaetud jääga (näiteks jäält loodimine polaarmerede rannikuäärsetes või avaosades või põhjalik (jäält) loodimine suhteliselt väikestes, kuid navigatsiooniliselt tähtsates külmuvates akvatooriumides, nagu sadamad, reidid, kanalid, faarvaatrid) või kohtades, kus teisi mõõdistamisviise kasutada ei ole võimalik.

Rannikualade madalmeres mõõdetakse sügavusi ka käsiloodide abil (enamasti mõõtelatiga) punktides, mis püütakse paigutada teatud ruutvõrgustiku tippudesse.

Lausmõõdistamisel kasutatakse kattuvaid mõõdistamisribasid, mis tagavad etteantud täpsusega sügavusmäärangu uuritava akvatooriumi igas punktis.

Lausmõõdistamist võib teha neljal viisil:
- aerofotomõõdistamisega;
- aerolasersondeerimisega;
- veepealse hüdroakustilise mõõdistamisega MBES ja kajatraalide abil;
- veealuse fotomõõdistamisega.

Aerofotomõõdistamisel saadakse põhjareljeefi kujutis pildistamisega lennuvahendite liikumisel piki planeeritud marsruute. Akvatooriumi lausuurimise tagab pildistatavate alade kattumine nii piki- kui põiksuunas.

Tänapäeval peetakse perspektiivseks meetodiks aerolasersondeerimist, mis kujutab endast loodimist lennukilt skaneerivate laserkiirte abil.

Põhjareljeefi veepealset hüdroakustilist lausmõõdistamist tehakse mitmekiireliste hüdroakustiliste komplekside (MBES) ja kajatraalide abil. Igal halsil nähakse ette uuritavate ribade kattumine, mis tagab mõõdistamise pidevuse kogu ala piires.

Põhjareljeefi veealune pildistamine toimub veealustelt uurimisaparaatidelt.

Põhjareljeefi mõõdistamine on mõnevõrra üldistatult otstarbekas jaotada kolme etappi: ettevalmistus, vahetu mõõdistamine merel, andmetöötlus.

Ettevalmistus koosneb andmekogumisest, projekteerimisest, meeskonna treeningust, uurimislaeva seadistamisest ja aparatuuri esmasest kalibreerimisest.

Vahetu mõõdistamine merel peab sisaldama järgmisi põhielemente, mis tagavad info kogumise, töötlemise ja järgneva kasutamise:

- piirkonna plaanikohane uurimine sügavuse pideva või diskreetse mõõtmisega mõõdistushalsside kavandatud süsteemi järgi;
- mõõdistusaparatuuri kandjate koordinaatide määramine mõõdistamise eesmärgile vastava diskreetsuse ja täpsusega;
- kogu mõõteaparatuuri etteantud töörežiimi säilitamine ja kontroll;
- info kogumine vigade allikate kohta ja selle töötlemine mõõdetavate suuruste parandite määramiseks (sh veetaseme parandid);
- mõõtmistulemuste dokumenteerimine tehniliste andmekandjate abil kõigi süsteemide ja riistade jaoks ühtses ajas;
- halsside kandmine planšettidele ja mõõdistustulemuste esmane kontroll;
- laeva (lennuki) ühtlase liikumiskiiruse ja etteantud halsil (marsruudil) püsimine ning navigatsiooniohutuse tagamine;
- otsustamine täiendavate uuringute vajalikkuse üle piirkondades, kus on ilmsiks tulnud navigatsiooniohte või keerulisi reljeefivorme;
- operatiivne teatamine avastatud navigatsiooniohtudest.

Mõõdistamisviis ja vajalikud vahendid valitakse ettevalmistaval etapil sõltuvalt uuritava piirkonna paiknemisest ja tähtsusest, oodatavast reljeefi keerukusest, sügavuste diapasoonist ja vajalikust mõõdistamistäpsusest ning üksikasjalikkusest.

Sügavustel 0...100 m rakendatakse järgmisi mõõdistusviise, mis peavad tagama kõigi navigatsiooniohtude avastamise:

a) rannajoonest kuni loodusliku läbipaistvuse piirsügavusteni tehakse lausuuringuid aerofotomõõdistamise või aerolasersondeerimise abil. Selle põhjal määratakse ka piirkonnad, kus põhjareljeefi on vaja täpsustada lausuuringutega mitmekiireliste hüdroakustiliste komplekside või kajatraalide abil;

b) navigatsiooniliselt olulistes piirkondades loodusliku läbipaistvuse piirsügavusest kuni 40 m sügavuseni tehakse lausuuringuid mitmekiireliste hüdroakustiliste komplekside või kajatraalide abil, kusjuures teatud juhtudel lubatakse ka mehaaniliste traalide kasutamist;

c) sügavustel 40...100 m intensiivse laevaliiklusega rajoonides ja piirkondades, millel on suur tähtsus, mõõdistatakse veealust reljeefi mitmekiireliste hüdroakustiliste komplekside või kajatraalide abil. Nõuded mõõdistamistäpsusele on veidi väiksemad kui eelmisel (b) juhul.

Kõigi navigatsiooniohtlike akvatooriumide täiendav uurimine on reljeefi mõõdistamisel kohustuslik. Uurimise peaeesmärgiks on navigatsiooniohtude asukoha, laadi ja vähimate sügavuste täpsustamine, iseloomulike vormide detailuurimine ning keerulise põhjareljeefiga piirkondade väljaselgitamine.

Piirkondi, kus on avastatud merepõhja oluline kõrgenemine või keerulise reljeefiga alasid, tuleb lisaks uurida mõõdistamishalsside tihendamise või lausmõõdistamise teel.

Merepõhja kõrgenemise ja navigatsiooniohtlikkuse kvantitatiivseks tunnuseks peetakse seda, kui mõni mõõdetud sügavus on oluliselt väiksem ümbritseva ala sügavusest. Ohu tunnuseks loetakse sügavusi, mis on ümbritsevatest sügavustest väiksemad [IHO, 2005, *corrections* 2011]:

- diapasoonis 0 kuni 10 m üle 0,5 m;
- diapasoonis 10 kuni 31 m üle 1,0 m;
- diapasoonis 31 kuni 200 m üle 5% sügavusest;
- diapasoonis 200 kuni 800 m arvatakse põhja kõrgenemise tunnusteks sügavusi, mis on ümbritsevate alade sügavustest väiksemad 10%. Neid formaalseid tunnuseid on siiski vaja hinnata, lähtudes sügavuse muutumise tendentsist ja piirkonna geomorfoloogiast.

Kui mõõdistamisprotsessis arvutatakse kõrvutiste halsside naabersügavuste vahel korrelatsioonikordajad, siis keerulisema reljeefi tunnuseks on nende kordajate märgatav vähenemine.

Loodimishalsse tihendades või reljeefi lausuuringu vahendeid kasutades on võimalik avastatud keerulise reljeefiga piirkondi uurida nõutava täpsusega. Seejuures tuleb kindlaks määrata vastavate reljeefivormide (ohtude) kuju, vähim sügavus ja koordinaadid.

9.2. Mõõdistamise üksikasjalikkuse kavandamise printsiibid

Merepõhja reljeef kujutab endast erinevate kontuuride ja mõõtmetega pinnavormide kogumit. Metodoloogilisest seisukohast lähtudes eristatakse lihtsaid ja keerulisi vorme, mõõtmete põhjal aga nano-, mikro-, meso-, makro- ja megavorme (vt alajaotis 1.4). Looduses ilmneb reljeef pinnavormide pidevas mitmekesisuses, kusjuures igal vormil on ainult temale omased mõõtmed ja kontuurid. Samasugune on reljeef ka oma liigestatuse astmelt, muutudes lamedatest tasandikest ookeanide keerukate keskahelikeni.

Kõigi reljeefivormide uurimiseks ja navigatsiooniohtude avastamiseks on välja töötatud erinevad mõõdistamisviisid ja -vahendid.

Lausmõõdistamine võimaldab välja selgitada kõik reljeefivormid aparatuuri lahutusvõime ja sügavuse mõõdistamistäpsuse piires. Mõõdistamise pidevuse tagamiseks rajatakse halsid selliselt, et mõõdistamise naaberribad kattuksid mingis ulatuses ℓ_k. Järelikult on halsside vahekaugus L sel juhul

$$L = \frac{Q_i + Q_j}{2} - \ell_k , \qquad (9.1)$$

kus Q_i ja Q_j on i-ndal ja j-ndal naaberhalsil uuritavate ribade laius.

Reljeefi diskreetsel mõõdistamisel tulevad arvesse teised asjaolud. Reljeefivormide avastamisvõimalused on määratud halsside vahekaugusega L ja sügavusmääranguteta vahekaugusega ℓ. Reljeefi uurimise detailsuse astet, mida iseloomustatakse halsside ja sügavuste vahekaugusega, nimetatakse loodimise üksikasjalikkuseks. Loodimise üksikasjalikkuse ainus kriteerium sügavuse mõõtmisel kajaloodiga on halsside vahekaugus L, kuivõrd piki halssi on sügavusmõõtmiste vahekaugused väga väikesed.

Halsside vahekaugused peavad olema sellised, et oleks võimalik esitada nii reljeefi üldpilti kui ka tema üksikuid iseloomulikke vorme, samuti avastada madalikke või teisi laevasõidule ohtlikke põhjavorme. Seega on põhjareljeefi keerukus uuritava akvatooriumi piires üks põhilisi tingimusi, mis määrab loodimise üksikasjalikkuse.

Sügavuste diapasoon on teine element, mis iseloomustab loodimispiirkonda navigatsiooniohutuse mõttes. Mida lähemal on sügavuse väärtus kriitilisele piirile, mille puhul kindla süvisega pealveelaevad või teatud sukeldumise piirsügavusega allveelaevad võivad veel liigelda, seda väiksemaid ebatasasusi tuleb loodimisel välja selgitada. Üksikhalsside puhul aitab siinkohal nende vahekauguse vähendamine ja külgvaatesonarite kasutamine.

Halsside vahekauguste määramisel on vaja arvestada ka laeva kohamäärangu täpsust loodimishalssidel, mis tänapäeval võib ulatuda 5 cm-ni RTK GNSSi kasutamisel rannalähedastel aladel, ühe meetrini avamerel DGNSSi kasutamisel ja 3 meetrini GNSSi absoluutse kohamäärangu kasutamisel avaookeanil.

Lõpuks tuleb loodimise üksikasjalikkuse määramisel lähtuda piirkonna navigatsioonilisest, majanduslikust, riigikaitselisest või teaduslikust tähtsusest.

Nagu jaotises 8.5 selgus, on kaardile märgitud sügavuste vead seotud nende loodimise ja kohamäärangu täpsusega. Ei ole mõtet määrata selliseid reljeefivorme, mille mõõtmed on antud mõõdistamisviisile omastest vigadest väiksemad või nendega võrdsed.

Et merepõhja reljeefi pole inimesel võimalik üldjuhul vahetult tajuda, siis tuleb halsside kavandamise eel välja selgitada reljeefivormid ja võimalikud navigatsiooniohud. Mida väiksemad on halsside vahekaugused L avamerel ühekiireliste kajaloodide kasutamisel, seda usaldatavamad tulemused saadakse, kuid halsside vahekauguste vähendamine suurendab hüdrograafiliste tööde maksumust ja ajakulu.

Esitatud kaalutlused näitavad, et loodimise planeerimisel tuleb valida halsside optimaalne vahekaugus, mis võimaldab usaldusväärselt uurida etteantud piirkonda vähima aja- ja vahendite kuluga. Suure navigatsioonilise koormusega ja suhteliselt madalas vees on halsside tihedus määratud IHO normatiividega, aga ka seal ei ole määratud sügavuspunktide salvestustihedust. Orienteeruvalt võiks soovitada, et eriklassi puhul on salvestustiheduse määraks aeg, millega laev läbib vahemaa $a = z \tan \gamma$, kus z on sügavus ja γ – vertikaaljoone ja kajaloodi kiirguskoonuse moodustaja vaheline nurk. Klassi 1.a puhul võiks seda aega suurendada kaks korda.

Loodimishalsside tiheduse kohta on küllaltki üksikasjalikke näpunäiteid IHO standardis, kuid ka seal on esitatud maksimaalväärtused, seega teatud tingimustel tuleks neid vähendada.

Loodimise üksikasjalikkuse määramiseks on soovitatud erinevaid võtteid ja printsiipe. Peatume neist kahel, mis on saanud suurima tunnustuse. Need on geomorfoloogiline ja tõenäosuslik printsiip.

9.3. Geomorfoloogiline printsiip

Uurides reljeefi kujundavaid faktoreid ja põhjareljeefi põhijooni, tuleks pöörata tähelepanu mõningatele reljeefivormide ekstrapoleerimise võimalustele.

Näiteks aladel, kus merega piirneb madal tasane rand ja põhjareljeefi moodustamisel on ülekaalus kuhjeprotsessid, on loomulik oodata ka rahulikku põhjareljeefi, vähemasti rannanõlva piires. Transgressioonsel mandrimadalikul, st piirkonnas, kus meri tungib maismaale peale, säilivad reljeefivormid, mis on pärit üleujutusele eelnenud perioodist. Need säilivad ka merepõhjas.

Mainitud seaduspärasuste tundmine lubab eelnevalt hinnata reljeefi üldjooni, kuid ei anna veel alust konkreetseteks järeldusteks.

Mõõdistamise üksikasjalikkuse edukas määramine on võimalik ainult sel juhul, kui on olemas usaldusväärsed teadmised pinnavormide tekkest ja kaasaegsetest reljeefimoodustumise protsessidest. Ennekõike kasutatakse reljeefimoodustumise üldisi geoloogilisi seaduspärasusi ja planetaarsete vormide printsipiaalset eripära (vt jaotised 1.4...1.6).

Edasi arvestatakse suurte geomorfoloogiliste alade (morfostruktuuride) reljeefi iseärasusi, juhul kui ala piirid ja keskmised morfoloogilised karakteristikud on hästi teada.

Morfostruktuuride piires arvestatakse reljeefi keskmiste ja väikeste vormide mitmekesisust reljeefi suhtelise liigestatuse astme abil. Sel eesmärgil tuuakse iga morfostruktuuri piires esile mitu reljeefi kategooriat.

Lõpuks nähakse ette halsside vahekauguste muutmine sõltuvalt sügavustest igas konkreetses mõõdistamispiirkonnas.

Mainitud lähteandmed antakse tavaliselt tabeli kujul ja kõigi sügavuste jaoks näidatakse igas reljeefikategoorias halsside vahekauguste orienteeriv diapasoon, mis kindlustab reljeefi uurimise vajaliku üksikasjalikkuse. Võib tuua näite [ПГС № 4, 1984], kus lubatakse šelfi loodimise halsside vahekauguseks sügavusvahemikus 200...500 m tasastel aladel 1,5...2,5 km, orgude ja kanjonitega liigestatud alal 0,75...1,25 km, künklikul alal 0,25...0,5 km. Võrdluseks: IHO standard, 2008 lubab nendel sügavustel halsside maksimaalseks vaheks kuni neljakordse sügavuse, st 500 m sügavuse puhul 2,0 km, mis jääb ühte suurusjärku [ПГС № 4, 1984] normatiividega tasastel aladel.

Järgnevalt esitatakse globaalsete morfostruktuuride ja nende põhiliste alajaotiste loetelu ja tingmärgid (kasutatud joonisel 9.1).

I MANDRITE VEEALUSED ÄÄREALAD

I_1 šelf

I_2 mandrinõlv

I_3 mandrijalam

II ÜLEMINEKUTSOON

II_1 ookeanisüvikud

II_2 saarkaared ja sisemerede kerkealad

II_3 ääre- ja sisemerede nõod

III OOKEANI KESKAHELIKUD

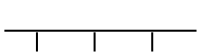
III_1 riftitsoonid

III_2 keskaheliku ääreala (iseloomulik on suhteliselt rahulik reljeef ja kalle laskumisega 300–700 m süvamerenõgudesse)

IV SÜVAMERENÕOD

IV_1 süvavee tasandikud

IV_2 künkad



globaalsete morfostruktuuride piirid

globaalsete struktuuride alajaotuste ehk suurte morfostruktuuride piirid

murrangute tsoonid.

Atlandi ookeani põhjareljeefi globaalsed ja suured morfostruktuurid on näha joonisel 9.1.

Joonis 9.1. Atlandi ookeani jaotus globaalseteks morfostruktuurideks ja nende alajaotusteks. Leppemärgid ja tähistused – vaata eelmisel leheküljel [ПГС № 4, 1984]

9.4. Tõenäosusprintsiip

Käesolevaks ajaks on välja kujunenud kaks peamist suunda loodimise üksikasjalikkuse määramisel tõenäosuslike karakteristikute abil.

Esimene neist arvestab suure hulga hüdrograafiliste tööde tulemusi. Nende statistiline töötlus võimaldab välja selgitada põhjareljeefi olulised seaduspärasused ja selle alusel koostada üldistatud kvantitatiivsed hinnangud, mida võib üle kanda teiste piirkondade hüdrograafilistele töödele, kui on olemas andmed näiteks nende alade geneetilise suguluse kohta või muu teave reljeefivormide sarnasusest.

Kui selliseid andmeid ei ole, siis määratakse rekognostseerivad halsid, mille abil arvutatakse konkreetsed morfomeetrilised näitajad. Võrreldes neid olemasolevatega võib välja töötada soovitused loodimise üksikasjalikkuse suhtes.

Teine suund põhineb arusaamal sügavusest kui juhuslikust suurusest. Profiilide töötlemine viisidel, mida soovitab tõenäosusteooria, võimaldab lahendada loodimise üksikasjalikkuse määramise ülesande antud piirkonna jaoks.

Vaatleme mõningaid konkreetseid üksikasjalikkuse määramise võtteid.

Histogrammide meetod. Suure arvu merekaartide analüüs võimaldab näidata, et ookeani põhjareljeefi mesovormide horisontaalmõõtmed muutuvad küllaltki piiratud ulatuses – 30 kuni 70 miili piires. Võttes halsside vahekauguseks ookeani mõõdistamisel 30 miili ja töödeldes statistiliselt kõige enam uuritud piirkondade merekaarte, näeme, et see vahemaa lubab piisava usaldusväärsusega uurida ka reljeefi makrovorme. Samuti osutus võimalikuks teatud tõenäosusega välja selgitada mesovormid ja üksikud makrovormide anomaaliad. Nii näiteks lubasid 30-miilised halsside vahekaugused Atlandi ookeanis avastada positiivseid mesovorme 83% tõenäosusega, aga negatiivseid 80% tõenäosusega. Vaikses ookeanis olid need vastavalt 82% ja 93%.

Olemasoleva kartograafilise materjali abil on kogunenud andmestik ookeanipõhja erinevate morfoloogiliste alade, mesovormide horisontaalmõõtmete ja kõrguste kohta ning koostatud vastavad histogrammid. Andes ette üksikute reljeefivormide avastamise tõenäosuse, võib selliste histogrammide abil leida vajaliku halsside vahekauguse *L*. Meetodit võiks rakendada süvamerealadel.

Regressioonivõrrandite meetod. Piki mõõdistamishalssi registreeritakse põhjareljeefi pidevalt, mis võimaldab koostada tegeliku profiili. Halsside vahel on iga profiil reljeefi üldkogumi juhuslikuks väljavõtuks. Mida lähemal üksteisele naaberhalsid kulgevad, seda vähem erinevad mõõdetud profiilid halssidevahelistest profiilidest.

Mõõdistamise vajaliku üksikasjalikkuse määramine rajaneb regressioonivõrrandi (4.12) kasutamisel. Selle võib antud ülesande puhul kirjutada järgmisel kujul:

$$z_X = r\frac{\sigma_X}{\sigma_y} z_Y + \overline{z}_X - r\frac{\sigma_X}{\sigma_Y}\overline{z}_Y, \qquad (9.2)$$

kus z_X, z_Y on naaberhalssidel *X*, *Y* määratavad sümmeetrilised (s.o eelnevatest ühesugusel kaugusel asuvad) sügavused; z_Y – halsil *Y* mõõdetud sügavus; σ_X, σ_Y – sügavuse keskmine ruuthälve halssidel *X*, *Y*; $\overline{z}_X$, $\overline{z}_Y$ – keskmine sügavus nendel halssidel; *r* – sügavuste vastastikuse korrelatsiooni kordaja.

Suuruste *r*, σ_X, σ_Y, $\overline{z}_X$, $\overline{z}_y$ arvutamiseks kasutatakse valemeid (4.10) või (5.6), (5.8) ja (5.11). Neid arvutusi võib teha tööde piirkonnas põhihalsside rajamisel, kasutades laeva arvutit või lihtsamaid arvutusvahendeid ja vastavat maatriksit.

Sügavuse interpoleerimisel valemi (9.2) järgi arvutatakse regressioonivõrrandi keskmine ruuthälve seosest (4.11):

$$\sigma_n = \sigma_Y\sqrt{1-r^2},$$

kus σ_Y on sügavuse keskmine ruuthälve mõõdetud halsil.

Mainitud sõltuvuse kasutamisel nõuab halsside vahekauguste määramise võte ükskes ühe täiendava halsi rajamist (teine halss joonisel 9.2). Tööde piirkonda jõudmisel rajatakse esimene eelnevalt planeeritud halss. Teine halss rajatakse sellest kaugusele, mis võrdub poolega tööks esialgu kavandatud halsside vahekaugusest, st kaugusel $0{,}5L_{or}$. Kolmas halss asub esimesest kaugusel L_{or} ja neljanda halsi kaugus kolmandast võrdub ka L_{or} (joon. 9.2).

Sümmeetrilised sügavused valitakse vahetult sügavuste ja nende koordinaatide väljakirjutustest andmesalvestusest. Seejärel arvutatakse korrelatsioonikordajad r_{12}, r_{13}, r_{14} ning tulemuste alusel joonestatakse korrelatsioonikordaja sõltuvuse graafik halsside vahekaugusest *L* (joon. 9.2). Et korrelatsioonikordajate väärtustele vastavad punktid 2, 3, 4 ei asetse üldjuhul ühel sirgel, siis leitakse graafiku joone optimaalne asend vähimruutude meetodil ($\Sigma\Delta^2 = \min$). Selleks tuleb leida eelmainitud punkte keskendava sirge tõus *B* ja lõikepunkt *r*-teljega *A*.

$$A = \frac{\Sigma r_i \times \Sigma L_i^2 - \Sigma L_i \times \Sigma\left(L_i r_i\right)}{n\Sigma L_i^2 - \left(\Sigma L_i\right)^2},$$
$$B = \frac{n\Sigma\left(L_i r_i\right) - \Sigma L_i \times \Sigma r_i}{n\Sigma L_i^2 - \left(\Sigma L_i\right)^2}. \qquad (9.3)$$

Sirge algab *r*-telje punktis ordinaadiga *A* ja lõppeb punktis antud abstsissiga *L* ning ordinaadiga $r = A + BL$.

Valemite (9.3) asemel võib *A* leidmiseks kasutada ka EXCELi käsklusi INSERT+FUNCTION+MORE FUNCTIONS+STATISTICAL+INTERCEPT ning *B* leidmiseks sama käsurida, kuid viimane käsk on SLOPE, kasutades massiivides *y*-i asemel *r* ja *x*-i asemel *L* väärtusi. Avaldises (4.16) mõistame σ_n all lubatavat interpoleerimisviga σ_{lub}. Jagades võrrandi mõlemad pooled σ_z–ga, saame

$$\frac{\sigma_{lub}}{\sigma_z} = \sqrt{1 - r^2} \quad , \tag{9.4}$$

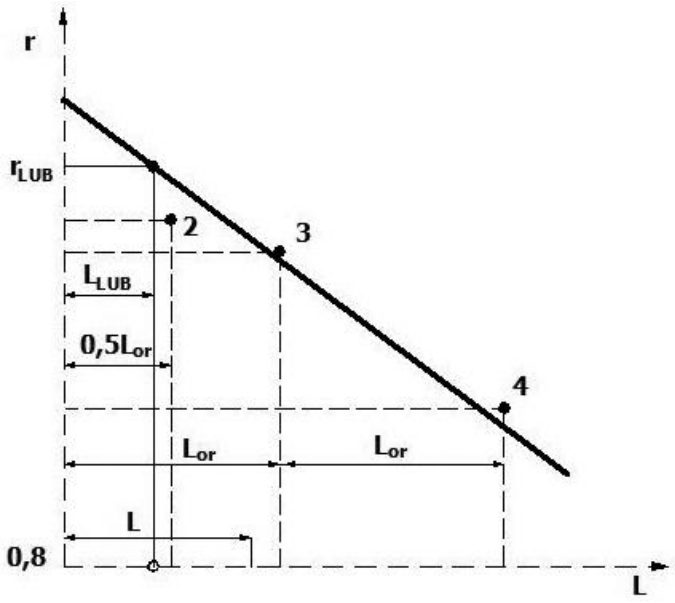
kus

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}{4}}$$

ning σ_1 ; σ_2 ; σ_3 ; σ_4 on katsehalsside sügavuste keskmised ruuthälbed.

Tähistades $\frac{\sigma_{lub}}{\sigma_z} = \lambda$ ja lahendades viimase võrduse *r* suhtes, leiame

$$r_{LUB} = \sqrt{1 - \lambda^2} \, . \tag{9.5}$$



Joonis 9.2. Halsside vahekauguse määramise graafik (halsid – telg *r* ja ordinaadid 2, 3, 4)

Et saada abstsissi r_{LUB} ja keskmistava sirge täpsemat lõikepunkti, peaks nimetatud sirge olema ligikaudu 45° kaldega. See saavutatakse, kui *r*-telje väärtusi alustatakse suurusest 0,8 ja see osa *r*-telje pikkusest (r = 0,8...1,0) vastab ligikaudu *L* telje pikkusele.

Kordaja r_{LUB} seoses (9.5) kujutab endast naaberhalsside sügavuste korrelatsiooniastet, kusjuures peab olema tagatud, et nende interpoleerimisviga ei ületaks suurust σ_{lub}. Praktiliselt on piisav, kui $\sigma_{lub} \le \frac{1}{3}\sigma_z$ või $\sigma_{lub} \le 0{,}5\sigma_{z_0}$ (sügavuse mõõtmise lubatav keskmine ruuthälve). IHO juhend annab valemi sügavuse mõõtmise lubatava vea määramiseks

$$\Delta z_{LUB} = \sqrt{a^2 + (bd)^2}\ . \tag{9.6}$$

Antud valemis on *a* ja *b* vastava täpsusklassi koefitsiendid ja *d* keskmine sügavus, mis saadakse katsehalsside loodimisandmetest.

Andes ette suuruse λ, arvutame valemi (9.5) järgi piisava korrelatsioonikordaja r_{lub} ja määrame graafiku abil täpsustatud kauguse *L*, mis tagab reljeefivormide avastamise vastavalt seatud mõõdistamistäpsusele. Suurim interpoleerimisviga tekib kahe halsi vahelise ala telgjoonel, seepärast võrdub täpsustatud halsside vahekaugus $L = 2\,L_{lub}$.

Edaspidi võib järjekordsel mõõdistamishalsside rajamisel saadud täpsustatud *L* väärtust kontrollida ja vajaduse korral muuta.

Reljeefi instrumentaalsel hindamisel külgvaatesonari abil määratakse halsside vahekaugused L_i nii, et väheinformatiivsed alad kattuksid.

9.5. Halsside rajamine

Kuivõrd just ühekiireliste kajaloodide kasutamisel oleneb loodimise kvaliteet suuresti halsside optimaalsest joonisest, vaadeldakse siin põhiliselt seda probleemi.

Loodimishalsside optimaalne süsteem tuleb valida selliselt, et reljeef oleks usaldusväärselt määratud vähima halsside arvu korral. Mida keerulisem on reljeef, seda kiiremini ta muutub ja seda väiksemad tuleb valida halsside vahekaugused ning vastupidi. Piki samasügavusjoont on sügavuse muutumine võrdne nulliga, seepärast on ühekiireliste kajaloodide kasutamisel üldjuhul vaja suurema informatiivsuse saamiseks rajada halsid samasügavusjoontega risti.

Selgelt väljenduva põhjakaldega piirkondades, madalatel ja laugrannikul, samuti kuhjevormidega rannikul rajatakse loodimishalsid risti samasügavusjoonte üldise suuna või rannajoonega. Selline halsside suund on otstarbekas ka mandrinõlva, mandrijalami, kaarsaarestike ja ookeanide keskahelike uurimisel (vt joon. 9.3).

Analoogilisel kaalutlusel rajatakse halsid risti väikeste väljavenitatud kujuga lahtede ja abajate, samuti kanalite ja faarvaatrite pikitelgedega.

Kui loodimispiirkonnale on iseloomulik tasandikuline või künklik reljeef ja suurel alal ei ilmne märgatavat põhja kallet, võib halsid rajada kas suvaliselt või arvestades teisi faktoreid, näiteks hoovuste või lainete suunda, kohamäärangu meetodeid ja nende realiseerimistingimusi, laeva manööverdamisvõimalusi jms.

Neil aladel, kus võib oletada seljakulist reljeefi ja veealuseid valle, aga samuti laugrandadel, kus kuhjevormid vahelduvad kulutusvormidega, tuleb halsid reljeefi usaldusväärseks väljaselgitamiseks rajada samasügavusjoonte üldise suunaga 30...45^{o} nurga all.

Üldjuhul, kui kogu pindala tuleb läbi uurida ühesuguse üksikasjalikkusega, on vaja loodimishalsid rajada üksteisega paralleelselt.

Paralleelsete halsside süsteemi on otstarbekas rakendada järk-järgult madalduva põhjaga piirkondades **abüssaalsetel**, s.o suures (üle 3000 m) meresügavuses asetsevatel küngastikel, seljakute või teiste monotoonsete reljeefivormidega aladel.

Kasutatakse veel siksak-, radiaal- ja vastastikku ristuvaid halsse (vt joonis 9.4).

Siksakhalssidega uuritakse väljavenitatud alasid, kus on vaja täpsustada reljeefi eri elementide (mandrinõlva alad, süvikud, kanjonid) kuju.

Radiaalhalssidega (nn lehvikuga) uuritakse selliseid piirkondi, kus halsside vahekauguste suurenemine on kooskõlas sügavuse suurenemisega ja loodimise üksikasjalikkuse vähenemisega (veealused mäed, vulkaanid), aga samuti neemede ja väikeste saarte ümbruses ning kohtades, kus reljeefi iseloomustavad järsult koolduvad samasügavusjooned. Mandri- ja saarenõlval rajatakse halsid nõlva üla-, kesk- ja allosades, ent väljavenitatud kerkealadel ning seljakutel – mööda kerkeala telge ja vastasnõlvadel.

Ristuvad halsid rajatakse kohtades, kus loodimisega on avastatud samasügavusjoonte suuna järsk muutumine, kusjuures need jooned lõikuvad põhihalssidega 30^{o} väiksemate nurkade all. Peale selle rajatakse ristuvad halsid ebaharilike sügavuste, leetseljakute ja veealuste mäestike uurimisel.

Kui halsside rajamisel kasutatakse GNSS-meetodeid, siis suurim rajamistäpsus saavutatakse NS- (λ = const) ja EW- (φ = const) suunalistel halssidel.

Kui külgvaatesonareid kasutatakse loodimisega koos, rajatakse mõõdistamise halsid põhimõttel, et nende suund vastaks loodimise nõuetele. Kui külgvaatesonareid kasutatakse loodimisest eraldi, rajatakse halsid reeglina piki samasügavusjoonte üldist suunda ja üksnes juhtudel, kui akvatooriumi morfoloogia tõttu on seda nõuet raske täita, rajatakse halsid risti samasügavusjoontega.

Külgvaatesonarite ja lausuuringu halsid rajatakse üksteise suhtes tavaliselt paralleelselt. Neemede ja väikeste saarte juures rajatakse halsid lehvikukujuliselt.

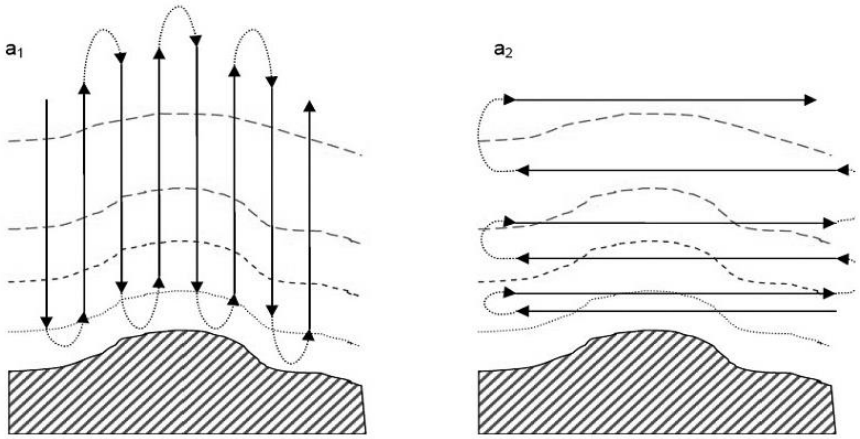
Mitmekiireliste hüdroakustiliste komplekside või kajatraalide abil sooritatavate lausuuringute halsid rajatakse selliselt, et laev saaks vabalt manööverdada. Seejuures on soovitatav rajada halsid nii, et need oleksid samasügavusjoonte üldise suunaga paralleelsed ja laev teeks manööverdades võimalikult vähe pöördeid. Tasase või künkliku reljeefi korral, kui üldine kalle on nõrgalt väljendunud, rajatakse lausuuringu halsid samasügavusjoonte suhtes suvaliselt, püüdes valida sobivamad looduslikud tingimused ning teha mõõdistamist vähima halsside arvuga. Piklike lahtede, abajate, kanalite ja faarvaatrite lausuuringu halsid rajatakse piki uuritavate vormide telgi või nendega paralleelselt.

Mõõdistamise kvaliteedi kontrollimiseks rajatakse kontrollhalsid. Kõigi mõõdistamisviiside korral rajatakse need põhihalssidega risti ja mitte harvemini kui 15-kordne põhihalsside vahekaugus.

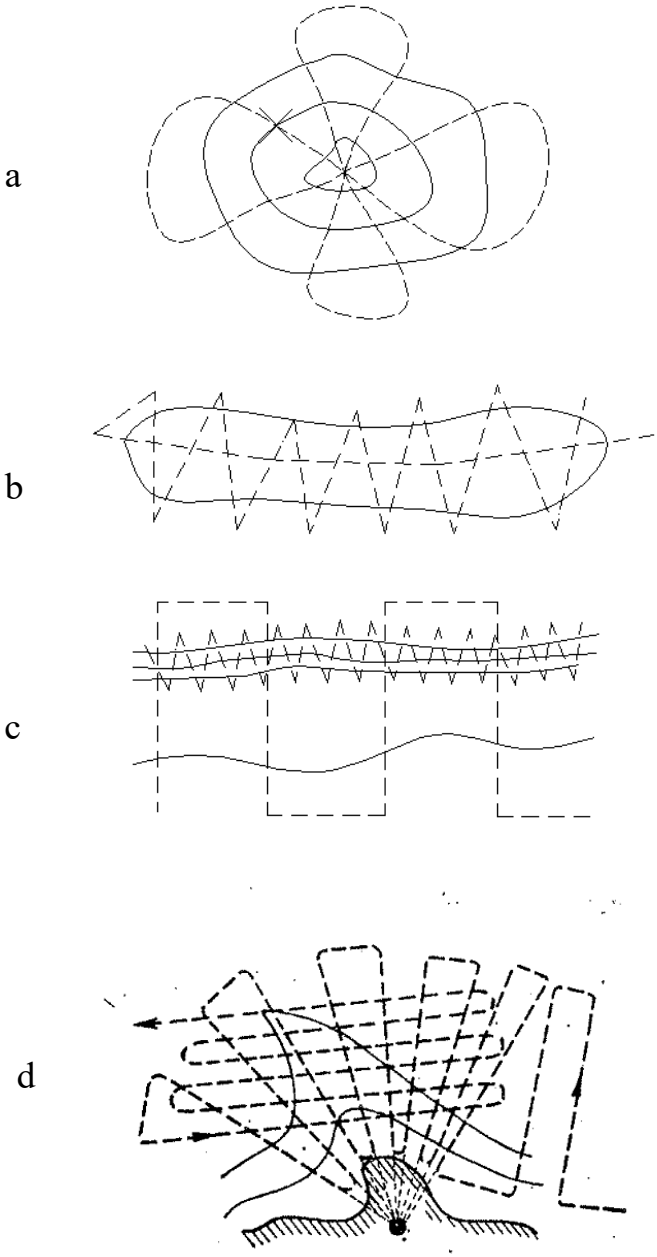
9.6. Halsside rajamise viisid ja täpsus

Mida täpsemini on realiseeritud planeeritud halsside süsteem, seda usaldusväärsemad on mõõdistamise tulemused. Järelikult usaldusväärsete ja täpsete halsside rajamine on mõõdistamise tähtis element. Põhjareljeefi mõõdistamisel ja hüdrograafilisel traalimisel rakendatakse järgmisi halsside rajamise viise:

- pardariistade automatiseeritud süsteemide abil;
- satelliitgeodeesia meetodite abil;
- liitsihtide järgi;
- rannalt näidatavate suundade järgi;
- liinide (trosside) järgi;
- toodrite järgi.



Joonis 9.3. Halsside võimalikud joonised tasase põhjaga rannalähedastel aladel (samasügavusjooned on kriipsjooned): a_1 – halsside rajamine ühekiirelise kajaloodiga; a_2 – halsside rajamine lehvikkajaloodiga [IHO Manual, 2005, *corrections to* 2011]



Joonis 9.4. Halsside võimalikud joonised (halsid on kujutatud kriipsjoontega): *a* – veealuse mäe loodimine radiaalhalssidega; *b* – veealuse moldoru uurimine siksakhalsside ja pikihalsiga; *c* – hõredate põhihalsside tihendamine järsul nõlval siksakhalssidega; *d* – vee all tõenäoliselt kaugele ulatuvaid neemikuid uuritakse radiaal-/paralleelhalssidega [ПГС № 4, 1984]

Halsside rajamisel peavad laeva kurss ja kiirus halsil jääma konstantseks. Laeva hälbimisel etteantud halsilt korrigeeritakse kurssi, kuid kursi muutmist üle 3° ei lubata. Oluliste kursi või kiiruse muutuse korral korratakse mõõtmist kogu halsi ulatuses. Kohamäärangu viisi valik sõltub vahendite olemasolust, piirkonna kaugusest rannikust ja teistest faktoritest, kuid määravaks on halsside täpsus. Põhiliseks meetodiks peaks siiski olema DGNSS või RTK GNSS.

Kohamäärangu täpsust hinnatakse harilikult keskmise ruuthälbe σ_{KM} abil.

Praktikas tavaliselt ei õnnestu täielikult tagada laeva sirgjoonelist ja absoluutselt ühtlast liikumist, sest terve rea põhjuste tõttu tekivad kõrvalekalded. Nende seas on peamisteks hüdrometeoroloogilised tingimused, laevade mehhanismide tööreżiimi ebastabiilsus, kursi ja kiiruse indikaatorite inerts (kõige suuremad vead tekivad laeva seiskamisel ja uuesti liikuma hakkamisel), aga samuti vahiroolimeeste individuaalsed iseärasused. Nende tegurite koosmõju määrab laeva juhitavuse astme halsil. Väliselt ilmneb see laeva seegamisena, mida esitatakse massikeskme sinusoidaalse võnkumisena halsi suhtes. Seejuures võib põiknihet loodimise halsi suhtes hinnata keskmise ruuthälbega σ_q, mis arvutatakse valemist

$$\sigma_q = 0{,}177 v T \sin\alpha_{\max,} \tag{9.5}$$

kus v on laeva kiirus sõlmedes; T – seegamisperiood, s; $\alpha_{\max}$ – maksimaalne seegamisnurk.

Keerulisemat mõju avaldab seegamine lausmõõdistamisele mitmekiireliste komplekside abil. Siin mõjub külgkiirtele lisaks põiknihkele ka pikinihe, mille ruutkeskmist väärtust σ_p võib hinnata valemiga

$$\sigma_p = 0{,}33 R \sin\alpha_{\max,} \tag{9.6}$$

kus R on vertikaalkiire ja kaldkiire vaheline horisontaalkaugus mõõdetava sügavuse tasemel.

Laeva nihkumisest tingitud halsi keskmist ruuthälvet σ_y võib arvutada avaldisest

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_q^2 + \sigma_p^2}\ . \tag{9.7}$$

Järelikult võib halsil kohamääranguteevahelisel alal mõõdetud sügavuse asukoha keskmist ruuthälvet σ_z hinnata üldjuhul valemist

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{KM}^2 + \sigma_{gr}^2 + \sigma_y^2}. \tag{9.8}$$

Automatiseeritud süsteemides hoitakse laeva kursil arvuti abil, mis võrdleb laeva jooksvaid koordinaate halsi etteantud koordinaatidega. Erinevused kõrvaldatakse jälgivsüsteemiga, mis annab vastavad korraldused juhtimisseadmeile.

Poolautomaatsed juhtimissüsteemid töötavad laevatee või koordinaatide kohta saadud info analüüsimise alusel välja soovitused hälbe (vasakule-paremale) likvideerimiseks ja edastavad need valgustablool roolikambrisse.

Halsside rajamist liitsihtide järgi võidakse kasutada reljeefi detailmõõdistamisel, märkimisväärsete hoovustega piirkondades.

Liitsihtide moodustamiseks rajatakse rannal spetsiaalne magistraalkäik, mis harilikult kujutab endast halsside suunaga ristuvat sirgjoont. Piki seda joont tähistatakse halsside vahekaugustega võrdsete vahemike L tagant piketid, mis tähistavad eesmisi liitsihi märgi asukohti. Igal piketil märgitakse risti magistraalkäiguga vaiadega tagumiste liitsihtmärkide rajamise punktid. Iga liitsihi eesmise ja tagumise märgi vahekaugus d peab olema vähemalt $0{,}04D$, kus D on kaugus esimesest märgist kuni halsi lõpuni. (Loetakse, et eesmine liitsihi märk on merele ligemal.)

Kui maastik ei võimalda rajada sirget magistraali, asendatakse see murdjoonega, mille lülide nurgad halsside suhtes on $90^\circ \pm \gamma$ (γ on teada). Pikettidevaheline kaugus S leitakse siis valemist

$$S = L \sec \gamma. \tag{9.9}$$

Kaugusi piki magistraali ja vajaduse korral nurki mõõdetakse elektrontahhümeetritega.

Kui on vaja rajada radiaalhalsse, rajatakse liitsihid lehvikukujuliselt kindla nurgaintervalli $\Delta\theta$ tagant:

$$\Delta\theta = 57{,}3\frac{\ell}{d+D}, \tag{9.10}$$

kus ℓ on halsside ettenähtud vahekaugus mõõdistuspiirkonna välisäärel; $D + d$ – kaugus liitsihtide poolusest kuni halsi lõpuni.

Liitsihi järgi rajatud halsi täpsust hinnatakse halsi normaali suunalise keskmise ruuthälbe σ abil:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_K^2 + \sigma_\alpha^2}\,, \tag{9.11}$$

kus σ_T on liitsihi tundlikkusest sõltuv viga (tundlikkus – vähim hälve liitsihist, mida on võimalik märgata); σ_K – laeva liitsihist kõrvalekaldumisest tulenev viga; σ_α – liitsihi ebatäpsest orienteerimisest sugenev viga.

Liitsihi tundlikkusest tingitud vea σ_T võib saada liitsihi teadaolevate elementide abil:

$$\sigma_T = \frac{\alpha}{\rho} D\left(\frac{D}{d} + 1\right). \tag{9.12}$$

Võttes liitsihi tundlikkuse α, st punktide ühel joonel asumise määramistäpsuse palja silmaga vaatlemisel võrdseks $2'$ (binokliga on määramistäpsus suurem vastavalt binokli suurenduse kordadele), saame

$$\sigma_T = 0{,}59D\left(\frac{D}{d}+1\right), \tag{9.13}$$

kus σ_T on meetrites, aga D ja d kilomeetrites.

Vea σ_K (m) võib arvutada valemist

$$\sigma_K = 0{,}009V_L\, t\, \sigma_L\,, \tag{9.14}$$

kus V_L on laeva kiirus halsil, sõlmedes; t – aeg laeva liitsihist kõrvalekaldumise algushetkest kuni maksimaalse eemaldumise hetkeni liitsihist, s; σ_L – laeva liitsihil hoidmise keskmine ruuthälve, kraadides.

Suurused t ja σ_L määratakse eksperimentaalselt.

Viga σ_α (m), mis on põhjustatud liitsihi ebatäpsest orientatsioonist, arvutatakse valemiga

$$\sigma_\alpha = 0{,}29D_t\sigma'_\alpha\,, \tag{9.15}$$

kus σ'_α on nurkade märkimise keskmine ruuthälve liitsihi rajamisel, kaareminutites; D_t – vaatleja kaugus liitsihi tagumisest märgist, km.

Halsside rajamine vaatlustugipunktidest näidatavate suundade järgi seisneb selles, et elektrontahhümeetri abil jälgitakse pidevalt laeva ning edastatakse roolimehele asendi korrektsioonid.

Seda moodust kasutatakse juhtudel, kui maastiku eripära tõttu ei õnnestu rajada liitsihti, aga samuti detailmõõdistamisel sadamates, merekitsustes, kaide ja randumiskohtade ääres, kus mingil põhjusel ei saa GNSSi kasutada.

Laeva halsilt kõrvalekaldumise suuruse y annab elektrontahhümeeter automaatselt, kui salvestada halsi suund x-teljena.

Halsside rajamise täpsust hinnatakse siinjuhul valemiga

$$\sigma = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_\alpha^2 + \sigma_J^2}\,, \tag{9.16}$$

kus $\sigma_i = 0{,}29Dm_{\text{mi}}$ on laeva hälve halsilt selle lõpp-punktis metoodiliste ja riistavigade σ_{mi} tõttu suundade mõõtmisel, (m); $\sigma_\alpha = 0{,}29\, D\sigma'_\alpha$ on laeva hälve halsilt selle lõpp-punktis (m), mille põhjuseks on nurgamõõduinstrumendi orientatsiooni standardmääramatus σ'_α; σ_J – laeva hälve halsilt sõltuvalt juhitavusest ja hüdrometeoroloogilistest tingimustest, (m).

Üksikutel väikestel, piiratud laevaliikluse ja tugevate hoovustega aladel, merekitsustes ja kanalites võib halsid rajada piki liine. Sel juhul fikseeritakse halsi asend vähem kui 200 m pikkuse pinguletõmmatud painduva terastrossi või ujuva, ankrupoisid ühendava liiniga. Kitsuste loodimisel kinnitatakse liin mõlemas rannas rammitud vaiadega.

9.7. Mõõdistusplanšetid

Planšetiks nimetatakse paberi- või matistatud plastikulehte, millel on kaardivõrk ja raamjooned ning millele mõõdistustööde ajal kantakse mitmesugused mõõdistusandmed. Vastupidavuse huvides liimiti planšett vahel jäigale alusele.

Planšetid jaotuvad tööplanšettideks ja aruandeplanšettideks.

Tänapäeval kasutatakse tööplanšettidena üldjuhul elektroonilisi kaarte, mille informatsioon on salvestatud arvuti mälus või spetsiaalses salvestis ning mida saab kuvada kas arvutiekraanil või teha vajaduse korral printeri abil väljatrükke. Tööplanšetid jagunevad halsside ja sügavuste tööplanšettideks.

Halsside tööplanšetid on ette nähtud halsside jooksvaks pealekandmiseks mõõdistamise ajal ning nende asetuse ja ülekatte kontrolliks.

Mõõdistushalsse saab kavandada näiteks Eesti firma ASi R-Süsteemid väljatöötatud programmiga RAN, mida kasutatakse ka Veeteede Ametis. Programmi sisestatakse esimese halsi alguspunkti koordinaadid, halsi suund ja halsside vahekaugus ning väljundiks saadakse halsside asukohad.

Tänapäeval edastatakse mõõdistusandmed (koordinaadid, sügavused) DGNSS- või RTK DGNSS-vastuvõtjast pardaarvutisse, mille kuvarilt saab pidevalt kontrollida halsi asendit, võrrelda seda kavandatuga ja vajaduse korral teha ka väljatrükke. Halsside tööplanšeti jaoks tuleb arvutisse sisestada projekteeritud halsid ja piirid, kus tuleb korrigeerida helikiirust vees ja soolsust.

Sügavuste tööplanšetina kasutatakse esialgsete mõõdistusandmete kuvasid ekraanil ja mõõdistusandmete (parandamata) väljatrükke, mida laeval uuritakse reljeefi iseärasuste ja mõõdistamise kvaliteedi välja selgitamiseks, et vajaduse korral sooritada otsekohe täiendavaid mõõtmisi.

Mõõdistusandmete kogumisel kasutatakse *online*`i tarkvara, mis kogub ja salvestab kajaloodilt, gürokompassilt, GNSS-vastuvõtjalt, tasemevaatluspostidelt, kõikumisanduritelt ja helikiiruse mõõtjatelt salvestatud infot.

Kõigis uuemates mõõdistussüsteemides on hulgaliselt nii arvutuslikke kui ka visuaalseid vahendeid pidevaks kvaliteedi kontrolliks, sealhulgas saab kontrollida laeva juhtimist planeeritud mõõdistushalssidel (ka automaatjuhtimine, käsutades laeva autopilooti arvuti abil), mõõdistushalsside jooksvat planeerimist, töötava aparatuuri parameetrite muutmist jms.

Kaasaegne automaatne mõõdistussüsteem (AMS) võib otsekohe joonestada esialgsed (parandamata) samasügavusjooned. Tööpäeva või mõõdistusala lõpul tehakse tavaliselt nende väljatrükid ja see on üks võimalus, saamaks sooritatud töö üldpilti. Jooksvas töös kasutatakse enamasti mitmesuguste andmete kuvamist monitoril.

Aruandeplanšetid on ette nähtud hüdrograafiliste uurimistööde lõplike tulemuste kajastamiseks ning merekaartide ning plaanide koostamise algmaterjaliks.

Üldmõõdistamise planšetid koostatakse enamasti Mercatori normaalprojektsioonis, aga geograafilistel laiustel üle 75° Mercatori põikprojektsioonis. Ka detailmõõdistamise planšetid koostatakse analoogiliselt eelmistega, kuid rannikumerealadel võib kasutada ka näiteks Mercatori põikprojektsiooni (Eestis selle Baltimaade versiooni TM-Balti telgmeridiaaniga 24°ip, mõõtkavaga telgmeridiaanil 0,9996 ja koordinaatide alguspunktiga ekvaatoril) või Lamberti koonilise konformse projektsiooni Eesti varianti Lambert-Est. Viimase telgmeridiaan on 24°ip, koonuse lõikeparalleelid on 58°00′ ja 59°20′pl, koordinaatide alguspunkt asub paralleelil 57°31′03,19415″pl, kusjuures selle punkti ristkoordinaatideks on TM-Balti süsteemi koordinaadid x = 6 375 000 m ja y = + 500 000 m. Mõlemad projektsioonid kasutavad sedapuhku WGS-84 ellipsoidi parameetreid. Kõrgussüsteemina on Mercatori normaalprojektsioonis kasutusel juba Amsterdami null, teistes veel viimast aastat BKN-77 normaalkõrgused.

Mercatori normaalprojektsioonis planšettidel ja kaartidel mõõtkavas 1 : 100 000 (ja väiksemas) võetakse Läänemerel peaparalleeliks[41] 60°pl, mõõtkavas 1 : 50 000 Eesti terrritoriaalvete kaartidel ja planšettidel 59°pl, suuremates mõõtkavades aga on peaparalleeliks mõõdistuspiirkonna keskmine paralleel.

Planšettide valmistamisprotsess koosneb kolmest põhietapist:

1. planšettide kavandamine koos raaminurkade koordinaatide määramisega;
2. raami joonestamine ja kartograafiliste võrkude ning tugipunktide pealekandmine;
3. sügavuste pealekandmine ja samasügavusjoonte joonestamine.

Aruandeplanšetid valmistatakse harilikult tulevase kaardiga ühesuguses mõõtkavas (harva ka suuremas) ning ühes ja samas kartograafilises projektsioonis ning ellipsoidil.

Planšettide kavandamine toimub mõõdistustööde projekteerimise etapil. Kavandamise kartograafiliseks aluseks kasutatakse kogu tööde piirkonda hõlmavat väikesemõõtkavalist merekaarti, kus määratakse planšettide mõõtmed ja ratsionaalne paigutus eelseisvate uuringute jaoks akvatooriumil.

Mõõdistatav piirkond peab olema kaetud võimalikult väheste planšettidega, kusjuures maismaa-alad ei tohiks hõlmata üle 50% planšeti pinnast.

Planšeti mõõtkava oleneb mõõdistamise eesmärgist, põhjareljeefi tüübist, mõõdistatava ala tähtsusest, halssidevahelisest kaugusest, ala mõõtmetest, kusjuures ena-

[41] Peaparalleel – paralleel Mercatori normaalprojektsioonis, millel kehtib kaardi peamõõtkava, üldjuhul – silindri ja maaellipsoidi lõike- või puuteparalleel.

masti kasutatakse nominaalseid mõõtkavasid 1 : 200 000, 1 : 100 000, 1 : 50 000, 1 : 20 000, 1 : 10 000, 1 : 5000, 1 : 2000.

Kehtivates IHO nõuetes [S44, 2008] ei reglementeerita mõõdistustööde mõõtkava, vaid käsitletakse täpsusnõudeid vastavalt mõõdistatavate alade iseloomule. Kogu akvatoorium on jagatud klassideks (eri-, 1.a, 1.b ja 2. klass) ning igale klassile on esitatud konkreetsed nõuded mõõdistustöödeks.

Et esimese kahe klassi alad tuleb lausmõõdistada (see on defineeritud järgmiselt: eriklassis ja 1.a klassis ei ole maksimaalne halsside vahekaugus määratletud, sest on ette nähtud merepõhja lausmõõdistamine), siis sel juhul oleneb halssidevaheline kaugus ainult kasutatavast aparatuurist (korraga kaetava ala laiusest) ning keskmisest meresügavusest sel alal. Seega võib eri- ja 1.a klassi alade mõõdistamise tulemi interpreteerida kõikideks nominaalsete mõõtkavadega merekaartideks (nõutaval ellipsoidil ja kaardiprojektsioonis).

Planšeti mõõtmed valitakse vabalt, arvestades sealjuures väljatrüki võimalust. Enamasti ei kasutata suuremat formaati kui A0 (1189 × 841). Kuna tänapäeval toimub nii andmete kogumine kui ka töötlemine täielikult arvutiga, siis planšeti suurus ilma väljatrükke tegemata enam erilist tähtsust ei oma. Reeglina naaberplanšettide servaalade kattumist ei kasutata, kuigi see võiks olla tõhus kvaliteedikontroll. Aruandeplanšeti kohustuslik lisa on digitaalne andmekandja mõõdistusandmetega.

Aruandeplanšetile kantakse [EVA, REGIO, 1996]:

- planšeti raamid (musta värvi);
- mõõdistatava ala piirid (musta värvi);
- navigatsiooniohud – karid, madalad, iseäralikud sügavused, mis kantakse üle varem koostatud merekaartidelt või planšettidelt (fuksiinpunast värvi);
- iseloomulikud sügavused, mis saadakse varem koostatud merekaartidelt või planšettidelt (sinist värvi);
- kaldajoon ja tugipunktid (musta värvi).

TM-Balti või Lambert-Est projektsioonis planšettide kavandamisel peavad raaminurkade koordinaadid olema täiskilomeetrite kordsed (suurtes mõõtkavades – hektomeetrite kordsed). Seetõttu tuleb kavandamist alustada kilomeetrivõrgu kandmisest projekteerimisaluseks olevale Mercatori normaalprojektsioonis kartograafilisele alusele, kusjuures võrgu naaberjoonte vahekaugus võetakse 8...10 cm kaardi mõõtkavas. Planšetid on täisnurksed, kuid nende kujutised Mercatori normaalprojektsioonis alusel on pööratud rombi laadsed.

Lambert-Est ja TM-Balti ristkoordinaadid tuleb Mercatori normaalprojektsiooni üleviimiseks taandada kõigepealt geodeetilisteks koordinaatideks. Seda teemat käsitletakse kõrgema geodeesia ja kartograafia aluste kursuses, mistõttu käesolevas õpikus seda ei käsitleta.

Siinkohal vaadeldakse Mercatori normaalprojektsiooni kaardikoordinaatide arvutamist geodeetiliste koordinaatide abil.

Geograafilisele laiusele φ vastav **meridionaalosa** ellipsoidil leitakse valemiga

$$D = \rho' \left[\ln\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right) - e^2 \sin\varphi - \frac{e^4 \sin^3\varphi}{3} \right], \qquad (9.17)$$

kus ρ' on radiaani väärtus kaareminuteis, üldjuhul 3437,7468', e – ellipsoidi ekstsentrilisus.

Kaardiühik[42] leitakse valemiga

$$\varepsilon = \frac{N_0 \cos\varphi_0}{\rho' C_0}, \qquad (9.18)$$

kus C_0 on kaardi peamõõtkava nimetaja; N_0 – peaparalleeli esimese vertikaali raadius (m), mis leitakse valemiga

$$N_0 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2\varphi_0}}, \qquad (9.19)$$

kus a on ellipsoidi pikema pooltelje pikkus (m).

Kaardikoordinaadid (indeksvõrgu koordinaadid) leitakse valemitega

$$\left.\begin{aligned} x_i &= \varepsilon\left(D_i - D_S\right) \\ y_i &= \varepsilon\left(\lambda_i - \lambda_W\right)' \end{aligned}\right\}, \qquad (9.20)$$

kus D_i on punkti meridionaalosa, D_S – kaardi (planšeti) lõunaraami meridionaalosa; λ_i – punkti geodeetiline pikkus; λ_W – kaardi (planšeti) lääneraami geodeetiline pikkus.

Planšettide kavandamiseks Mercatori normaalprojektsioonis koostatakse algul skeem väikesemõõtkavalisel merekaardil, kus asetseb kogu uurimiseks ettenähtud piirkond. Nimetatud piirkond jaotatakse planšettideks, arvestades nende maksimaalseid mõõtmeid, ühes vahetuses mõõdistatavat ala ja asjaolu, et mõõdistatav ala peab hõivama vähemalt 50% planšetist.

Planšettide raamid kantakse skeemile nende nurkade geograafiliste pikkuste ja meridionaalosade järgi arvutatud kaardikoordinaatide abil (vt valemid 9.17…9.20).

[42] Kaardiühik – kaardi peaparalleeli minutilise kaare pikkus millimeetrites või sentimeetrites Mercatori normaalprojektsioonis kaardil.

Geograafiline võrk kantakse kaardile 8…10 cm vahedega, raamile tehakse kaarejaotised vastavalt antud mõõtkavas merekaartidele ettenähtud vahedega. Et Mercatori normaalprojektsioonis moodustavad kaardi või planšeti raami teatud omavahel ristuvad meridiaanid ja paralleelid, siis on planšett täisnurkne.

Mercatori normaalprojektsioonis kaartide ja planšettide mõõtkava suureneb pooluste poole. Seetõttu tuleb leida, millistes piirides võib Mercatori miili lugeda jäävaks (st leida niisugune koordinaatjoonte vahekaugus, mille puhul võib sooritada geograafiliste koordinaatide lineaarset interpoleerimist). Merekaartidel on need vahemikud olenevalt mõõtkavast standardsed, kuid planšetid ei pruugi olla standardmõõtkavas.

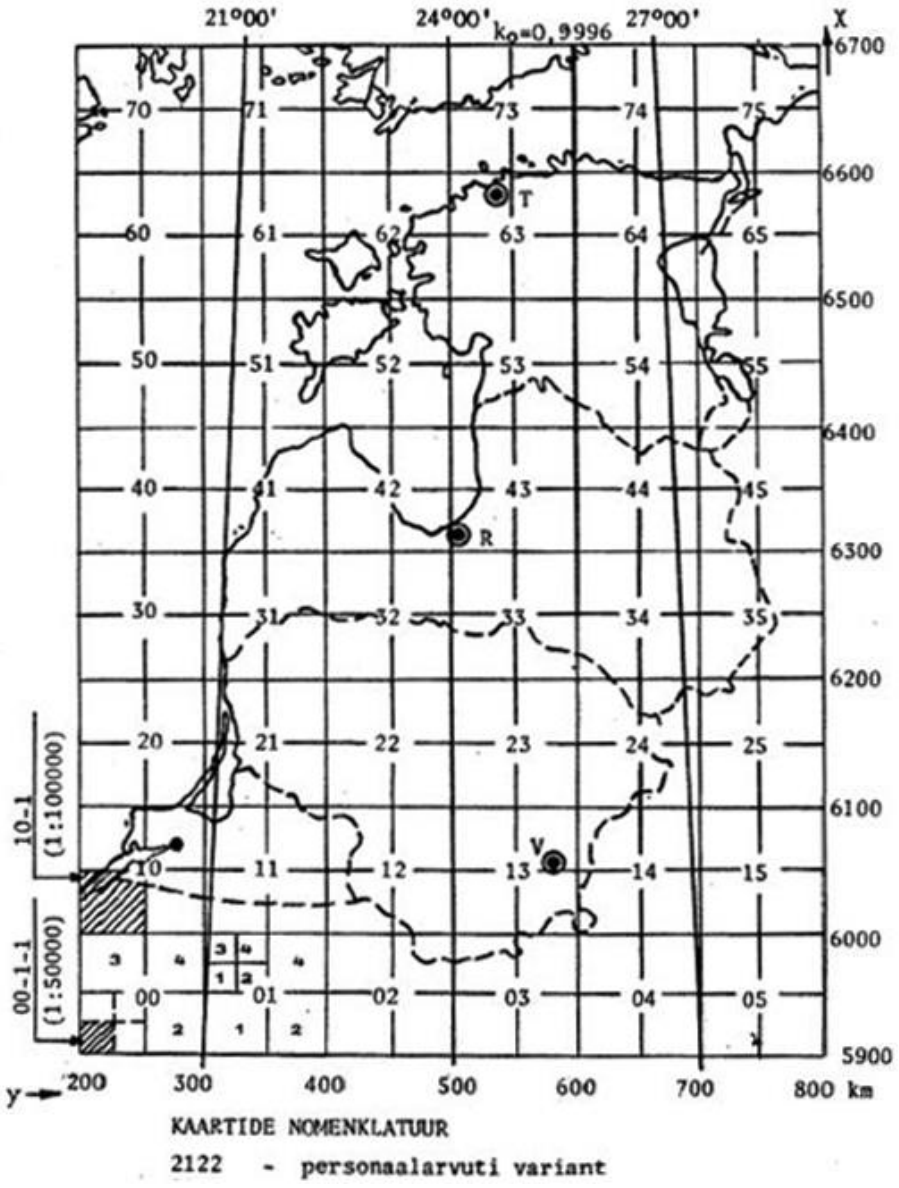
See vahemik kaareminutites leitakse küllaldase täpsusega valemiga

$$\Delta\varphi' = \sqrt{\frac{C_0 \cos\varphi_N}{675 \cos\varphi_0 \tan\varphi_N}} \ , \qquad (9.21)$$

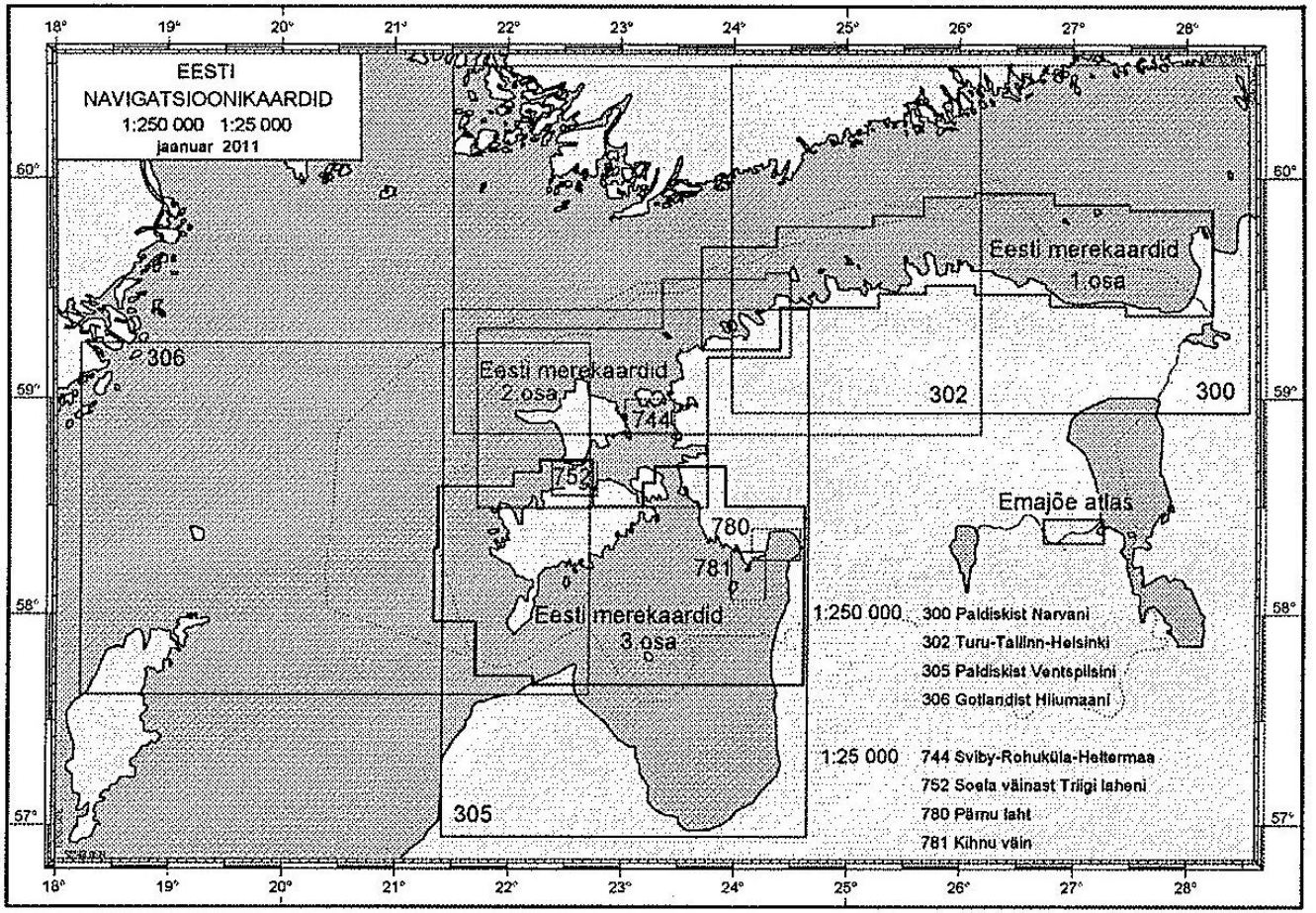
kus φ_N on kaardi või planšeti põhjaraami geograafiline laius; C_0 – kaardi või planšeti peamõõtkava nimetaja; φ_0 – peaparalleeli geograafiline laius.

Lõplikuks vahekauguseks valitakse üks järgmistest kaugustest, mis valemiga (9.21) arvutatust on vahetult väiksem: 5º, 2º, 1º, 30’, 10’, 5’, 2’, 1’, 30”, 12”, 6”.

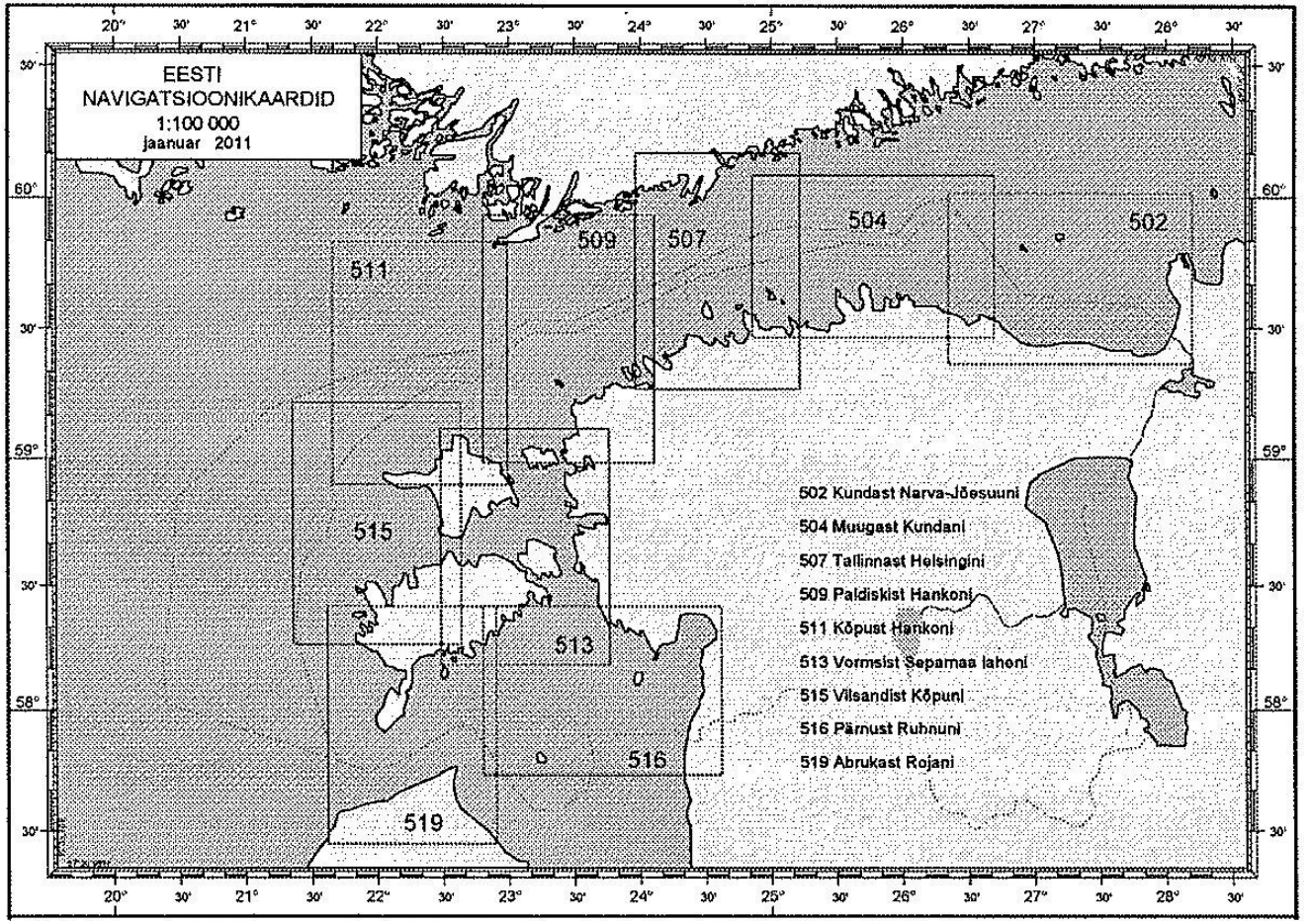
Järgnevatel joonistel 9.5...9.9 on TM-Balti kaartide nomenklatuur (Maa-amet) ja Eesti navigatsioonikaartide kartogrammid (Veeteede Amet).



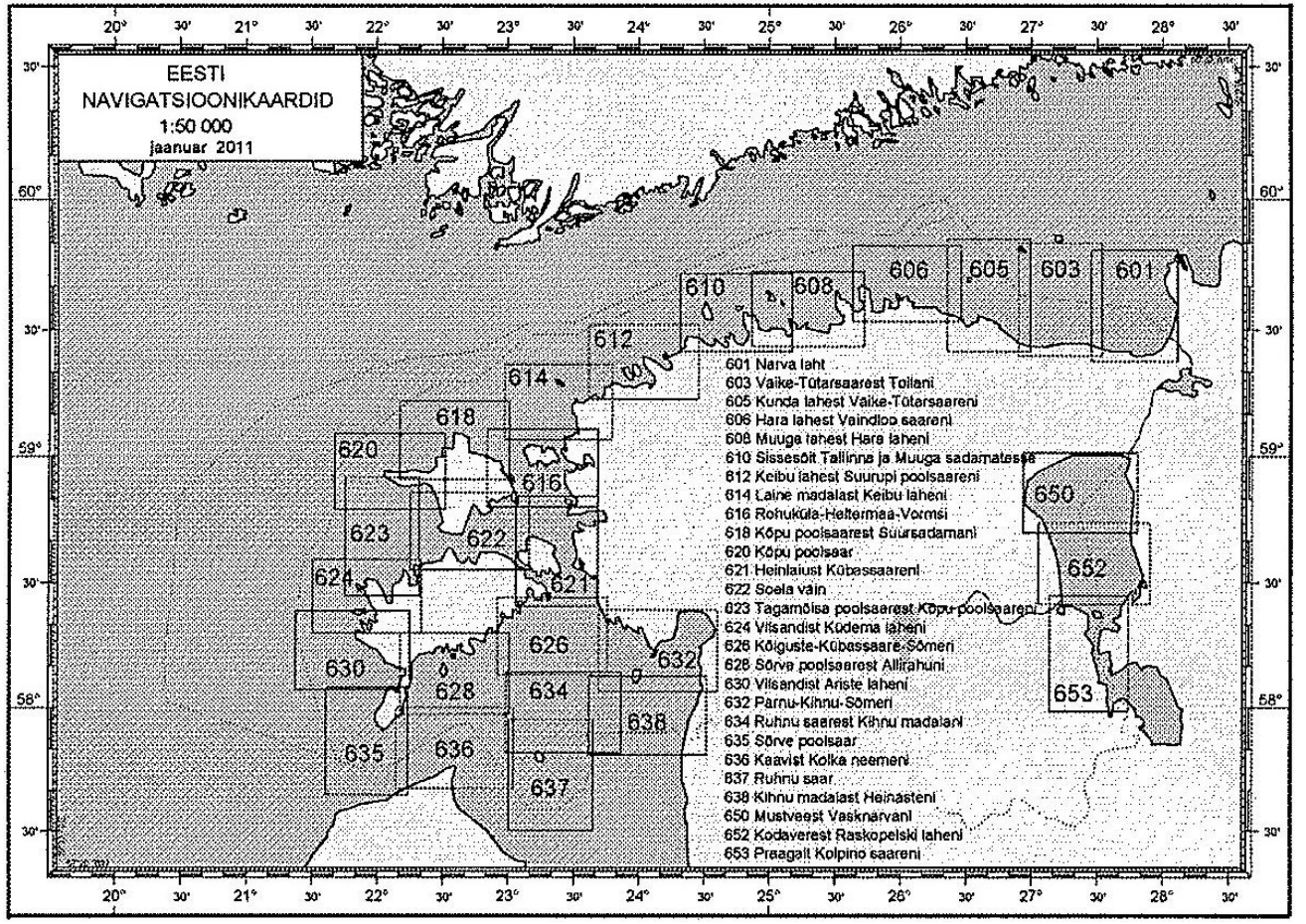
Joonis 9.5. TM-Balti kaartide nomenklatuur ja põhiline kaardikoordinaadistik [Maa-amet]



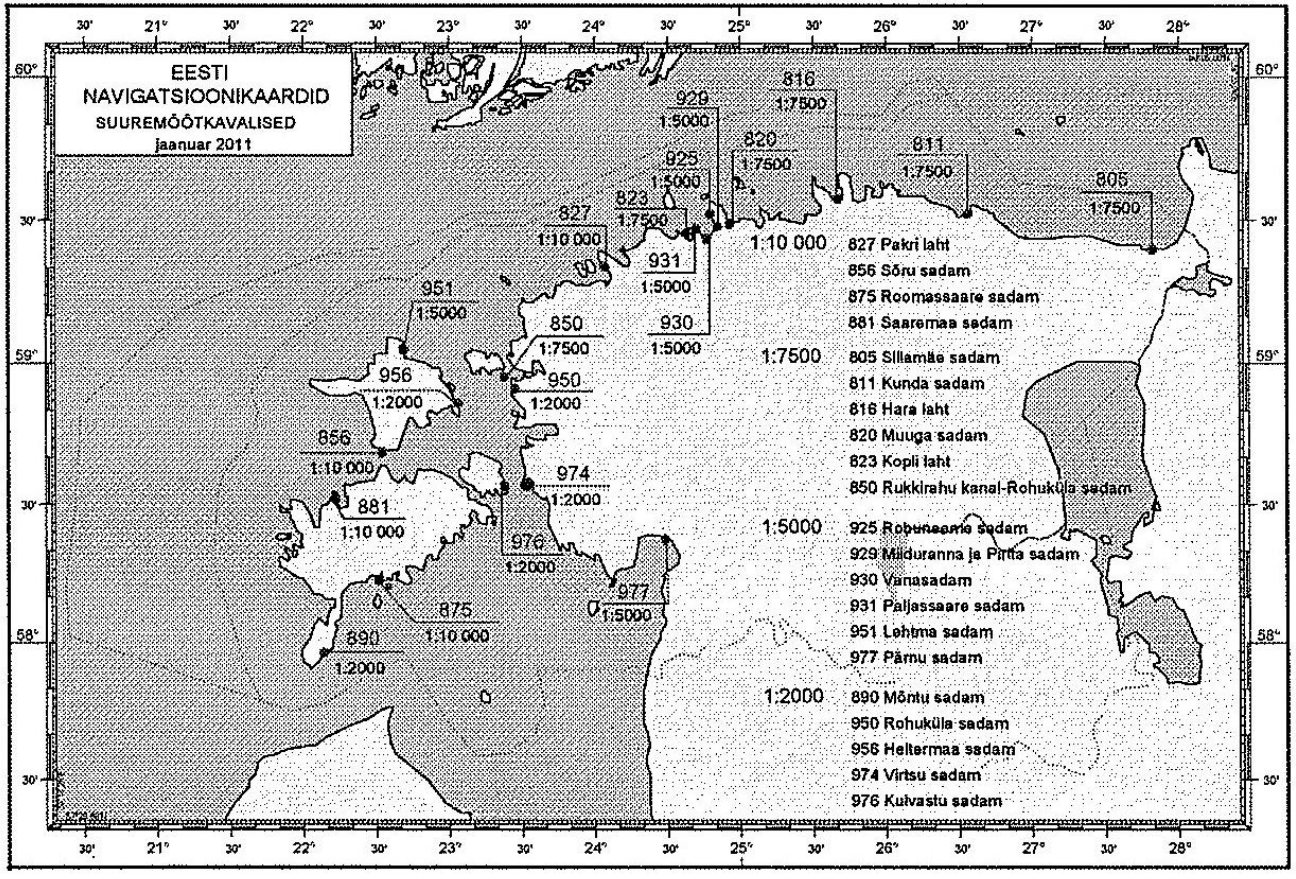
Joonis 9.6. Eesti 1:250 000 ja 1:25 000 navigatsioonikaartide kartogramm [Veeteede Amet]



Joonis 9.7. Eesti 1:100 000 merekaartide kartogramm [Veeteede Amet]



Joonis 9.8. Eesti 1:50 000 merekaartide kartogramm [Veeteede Amet]



Joonis 9.9. Eesti suuremõõtkavaliste navigatsioonikaartide kartogramm [Veeteede Amet]

Neljas osa

ANDMETÖÖTLUSE ALUSED

10. MÕÕDISTUSTULEMUSTE TÖÖTLEMINE

10.1. Andmetöötluse üldmõisted

Mõõdistustulemuste töötlemise eesmärgiks on põhjareljeefi arvmudeli koostamine tehnilises andmekandjas ja vajaduse korral selle kujutamine aruandeplanšetil. Kuivõrd tänapäeval kasutatakse mõõdistusandmete kogumisel ja esialgsel töötlemisel *online*-tarkvara, mis kogub ja salvestab andmed kõigilt anduritelt (kajalood, DGNSS- või RTK GNSS-vastuvõtja, gürokompass, kõikumise ja õõtsumise andurid, helikiiruse mõõtja jms), siis jääb hüdrograafi peamiseks ülesandeks kontrollida mõõdistuse kvaliteeti arvuliste ja visuaalsete vahenditega.

Aruandeplanšettide koostamisel juhitakse sügavusarvude valikut (sh tihedust), näiteks sügavustel kuni 100 m võiksid nende vahekaugused olla 5...6 mm ja sügavuste suuremate väärtuste puhul vahekaugustega piki halssi 8...12 mm [ПГС №4, 1984]. Sellist ühtlaste vahedega valikut kasutatakse aga ainult tasase põhjareljeefi puhul. Esmalt kantakse planšetile:

- ekstreemsed sügavused;
- sügavused reljeefi murdepunktides;
- sügavused, mis vastavad samajoontele.

Valitud sügavused parandatakse tasemeparandiga (eeldusel, et kõik ülejäänud kajaloodi parandid olid määratud ja arvestatud juba mõõdistamise käigus). Lõplike sügavuste alusel moodustatakse lõplikud samasügavusjooned.

Kui planšett hõlmab väga erinevate reljeefitüüpidega alasid, on soovitatav valida kaks põhilist lõikevahet. Reljeefi iseloomulikud vormid, mis ei väljendu põhi-

samasügavusjoontega, märgitakse täiendavate samasügavusjoontega või veealuse leetseljaku või järsu nõlva leppemärgiga.

Väikesemõõtkavalistel keeruka reljeefiga planšettidel tuleb arvestada põhjareljeefi morfoloogilisi iseärasusi, joonestada struktuurijooned ning samasügavusjooned, tüpiseerides seda, mis on iseloomulik kujutatavale reljeefile.

Samasügavusjoonte moodustamise järel tuleks sooritada sügavusarvude ja samasügavusjoonte ühtlustamine põkkuvate naaberplanšettide servaaladel.

Kõigil üldistamise juhtudel jäetakse joonestatava samasügavusjoonega võrduvad sügavusarvud samasügavusjoonest väiksemate sügavuste poole. Kui mingi samasügavusjoon ei sobi kokku naabersamasügavusjoonega, siis võib teda nihutada suuremate sügavuste poole sügavusarvude kahekordse mõõtmistäpsuse piires.

Aruandeplanšettidel peavad olema näidatud sügavusarvud, samasügavusjooned, navigatsiooniohud, rannajoon, geodeetilise võrgu punktid ja orientiirid ning koordinaatide võrk.

Erilist tähelepanu tuleb pöörata põhjareljeefi kujutise analüüsile. Sel eesmärgil kontrollitakse sügavuste ühtivust põhi- ja kontrollhalsside lõikepunktides ning mõõdistustulemuste kokkulangevust eelmiste tööde tulemustega. Samasügavusjoonte joonestamisel analüüsitakse seda, kui põhjalikult on uuritud madalikke, ebaharilikke sügavusi, ohule viitavaid alasid, aga ka valitud mõõdistamise üksikasjalikkust. Üks uurimise põhjalikkuse esmastest tundemärkidest on reljeefi geomorfoloogilise ettekujutuse vastavus väljaselgitatud sügavusjaotusele ja samasügavusjoonte üldpildile.

Mõõdistamistulemuste võrdlemiseks eelmiste aastate töödega koostatakse **põhjareljeefi võrdluse planšett**. Sellele kantakse kõigilt võrreldavatelt kartograafilistelt materjalidelt erinevate värvidega kõik navigatsiooniohud, ebaharilikud sügavused ning mõõdistamispiirkonna üldist põhjareljeefi iseloomustavad sügavused (viimased vähendatud tihedusega) ja seejärel analüüsitakse varasemate ning uute andmete erinevusi. Analüüsi põhjal tehakse järeldused uuringute ammendavuse kohta ja esitatakse ettepanekud navigatsiooniohtude ning ebaharilike sügavuste kaardilt elimineerimise või sinna alles jätmise kohta. Kahtlasteks kohtadeks peetakse sügavusel kuni 10 m eelmistest andmetest vähemalt 0,5 m madalamaid; sügavusel 10...31 m eelmistest andmetest kuni 1,0 m madalamaid; sügavustel üle 31 kuni 200 m eelmistest andmetest 5% või rohkem madalamaid kohti [IHO,2005, *corrections to* 2011].

10.2. Kajaloodi antenni ja kohamäärangu punkti erinevusest tingitud parandite *dx* ja *dy* leidmine

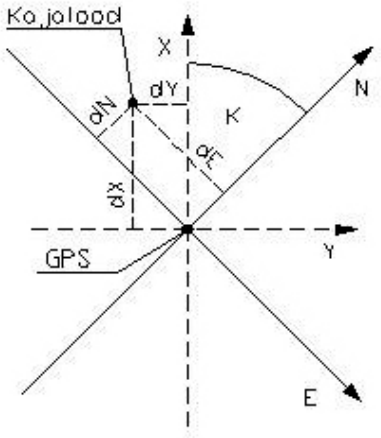
Kajaloodi antenni ja kohamääranguga saadava punkti erinevusest tingitud parandite leidmise skeem on joonisel 10.1.
Telg N on läbi GPS-antenni suunduv laeva pikitelje paralleeltasand. Teljed X ja Y on läbi GPS-antenni suunduvad kartograafilise taustsüsteemi telgede paralleelid.
Kajaloodi ja GPS-antennide asendite erinevusest tingitud sügavuspunktide asendi parandi leiame valemitega

$$\left.\begin{aligned} dY &= dE\cos K + dN\sin K \\ dX &= dN\cos K - dE\sin K \end{aligned}\right\}, \qquad (10.1)$$

kus *K* on laeva kursinurk.

Olenevalt kohamäärangu meetodist võib GPS-antenni asemel olla ka kaugusmõõturi reflektor.

Kajaloodi antenni ja GNSS-antenni omavahelise orientatsiooni võib määrata kohe, kui laevale on dokis kajaloodi antenn paigaldatud. Selleks sooritatakse kajaloodi antenni ja GNSS-antenni kohamäärang elektrontahhümeetri ja miniprisma või laserkaugusmõõturi abil. Elektrontahhümeeter peaks olema orienteeritud laeva pikitelje järgi. Kohamäärangu ajal peab laeva pikitelje tasand asetsema kaldemõõturi järgi vertikaalselt.



Joonis 10.1. Kajaloodi antenni koordinaatide korrektuur. N – laeva pikitelje paralleeltasand, mis läbib GPS-antenni

10.3. Üldmõisteid andmetöötlusest automatiseeritud mõõdistussüsteemi abil

Automatiseeritud mõõdistussüsteemide (AMS) kasutamisel peab kõigepealt arvestama, et need süsteemid ei ole kõikvõimsad ja osa parandeid tuleb sisestada manu-

aalselt. Siia hulka kuulub eelkõige tasemeparand, mis viiakse sisse järeltöötlusel, sest tasemevaatlused toimuvad mõõdistamise ajal (ajutises TVPs) üldjuhul tunnise intervalliga, vahepealsed tasemed aga interpoleeritakse järeltöötlusel automaatselt.

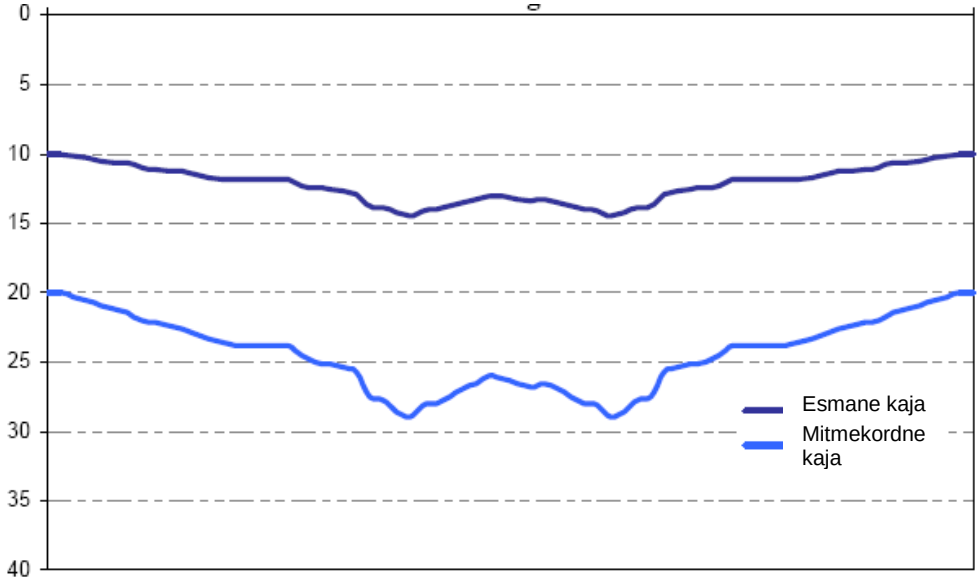
Ka helikiiruse parand, mida määratakse üldjuhul kaks-kolm korda päevas, st mõõdistamise algul, keskel ja lõpul, sisestatakse manuaalselt, kuid interpoleeritakse automaatselt.

Andmed põhjapinnase kohta, mis määratakse pinnasejaamades, viiakse planšetile manuaalselt.

Kõikumise ja õõtsumise parandid lisatakse mõõtmisandmetesse automaatselt, kuid kuuluvad järeltöötlusel teatud „silumisele“, mis võib olla olenevalt kasutatavatest programmidest kas automaatne või manuaalne.

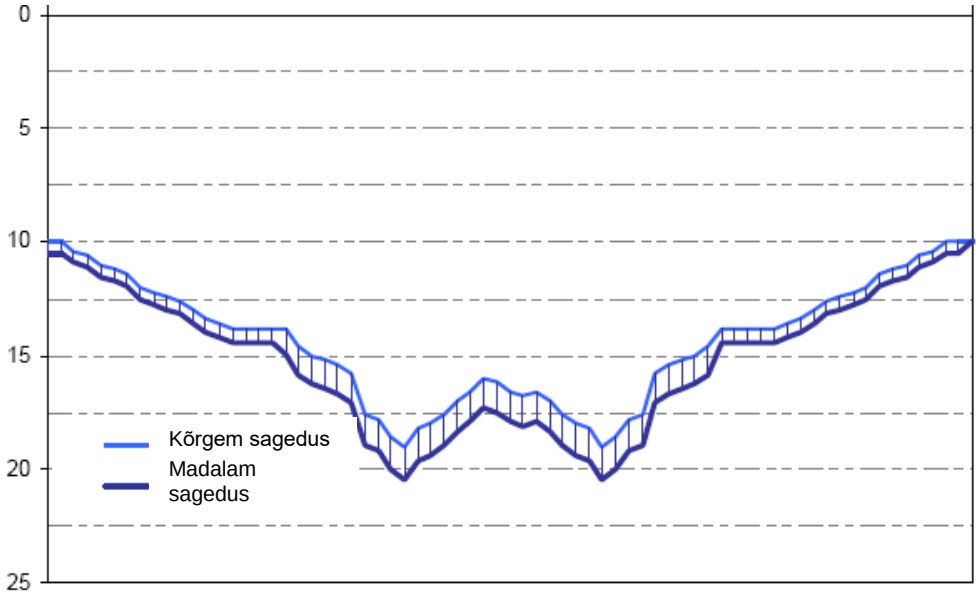
Kohamäärangu ja sügavuste kooskõlastused ja põhjakalde arvutused toimuvad automaatselt, samuti iseloomulike sügavuste valik.

Ühekiirelise kajaloodi ja külgvaatesonari kasutamisel täpsustab operaator halssidevahelise ala iseloomu külgvaatesonari andmete abil, kusjuures kahtlased alad fikseeritakse ja neid uuritakse täiendavate halssidega.



Joonis 10.2. Mitmekordne kaja ja esmane kaja [IHO, 2011]

Mitmekordne kaja (joon. 10.2) tekib helilainete edasi-tagasi peegeldusel põhja ja veepinna vahel, tekitades vale ettekujutuse piirkonna sügavusest.



Joonis 10.3. Mõõtmistulemused kahesageduselise kajaloodiga. Põhjaprofiilid, saadud kõrgema ja madalama sagedusega [IHO, 2011]

Kui kõvema pinnase kohal on poolvedelad setted, siis kõrgematel sagedustel töötavad kajaloodid võivad lugeda seda pärispinnaseks. Taoliste eksituste ärahoidmiseks tuleks kasutada kahel sagedusel töötavat kajaloodi, mis tuvastab nii poolvedela ebapinnase kui ka kõvema pärispinnase (joon. 10.3).

Automatiseeritud süsteeme (AMS) kasutades võib andmetöötluse ja aruandeplanšeti lõpliku koostamise jaotada kolme etappi.

1. Mõõdistustööde kvaliteedi kontrollimine reaalajas

Mõõdistustööde kvaliteeti võib kontrollida nii arvutuslike kui ka visuaalsete meetoditega. Tüüpiliseks arvutuslikuks kontrolliks on mitmesugune jooksev statistika (sh kogu mõõteaparatuuri töö kontroll, kogutud andmete võrdlemine eelmiste mõõtmistega, mitmekiireliste kajaloodide sisemine kontroll, mis annab konkreetse kiire usaldatavuse). Visuaalsed kontrollimeetodid on enamasti mitmesuguste andmete kuvamine koos huvipakkuvate piirkondade detailsema uurimisega (värvuskodeeritud sügavuspunktide kuva, 3D-mudelid, samasügavusjooned, ülekatte jälgimine, st paljude kõrvutiste ülekattega mõõdistushalsside olemasolu ja nende andmete kooskuvamine, profiilide kuvad, külgvaatesonari andmete kuvamine koos sügavusandmetega jms). Kogutud andmeid varasematega võrreldes kasutatakse taustinfona varem tehtud digitaalkaarte. Samal ajal võib kontrollida ka navigatsioonimärkide asukohti ja liitsihte.

Enamasti neist võimalustest piisab, et kontrollida mõõdistuse kvaliteeti reaalajas, sest olulisemad vead (suured kohamäärangu vead, „augud" halsside kattuvuses, suured sügavuserinevused oletatavalt tasase põhjaga merealal, sügavuste ja külgvaatesonari andmete mittevastavus jms) tulevad nimetatud meetoditega valdavalt ilmsiks.

2. Andmete puhastamine ja uus kvaliteedikontroll juba parandatud andmete baasil

Puhastamine tähendab kõigi kasutatud aparaatide andmete ülekontrollimist, vigaste näitude eemaldamist või silumist ning puuduvate parandite (nt tasemeparand) lisamist.

Kvaliteedikontrolli tehakse eelkõige eri halsside kokkulangevate sügavuspunktide võrdlemisega, kusjuures sellised punktid ning nende sügavuste vahed leitakse automaatselt ja sügavusvahede põhjal arvutatakse mitmed mõõdistamise kvaliteeti iseloomustavad statistilised näitajad. Kirjeldatud protsess toimub täisautomaatselt. Kasutatakse ka mitmeid visualiseeringuid (eespool kirjeldatud meetodil leitud sügavusvahede kuvamine, kattuvuse kontroll, sügavuspunktide ja külgvaatesonari andmete koosvaatlus jms).

Teise etapi lõpul peab kõigi sügavuspunktide täpsus olema vastavuses IHO nõuetega. Siis toimub sügavuspunktide üldistamine, sest tänapäevastes mõõdistussüsteemides koguneb juba lühikese ajaga sadu tuhandeid või miljoneid punkte ning kõiki neid enamasti edasises töös vaja ei ole. Üldistamise käigus valitakse automaatselt välja nn **esinduslikud sügavuspunktid (**väikseim sügavus teatud ruumipiirkonnas**)** ja salvestatakse need eraldi. Kogu algandmestik muidugi säilib.

3. Lõplike planšettide valmistamine

Puhastatud andmete põhjal koostatakse 3D-põhjamudel ning genereeritakse selle põhjal samasügavusjooned (viimaseid saab kasutada ka kvaliteedi kontrollimiseks.). 3D-mudelit on kõige õigem koostada üldistamata sügavusandmetest, sest selle kvaliteet sõltub otseselt andmetihedusest. Vahel koostatakse 3D-mudel üldistatud andmete baasil (nt kui ei taheta saada väga detailseid samasügavusjooni).

Planšett tehakse arvutis ja sisaldab järgmist andmestikku: geograafiline (või kilomeetri-) võrk, üldistatud sügavuspunktid, samasügavusjooned, mitmesugune geograafiline informatsioon (nt rannajoon), navigatsioonialane informatsioon (sh ka navigatsiooniohud), andmed mõõdistamise ja koostajate kohta.

Lõpuks lisatakse veel info andmete kvaliteedi kohta.

Kolmandas etapis võib teha ka mitmesuguseid analüütilisi töid, nagu süvendustööde planeerimine koos mahuarvutustega, merepõhja koostise määramine vastava andmestiku alusel jms. See etapp saab ka lõplikuks mõõdistustööde kvaliteedi

kontrolliks eelkõige paljude visualiseeringute kaudu. Kui vaja, siis nüüd tehakse ka kõik väljatrükid. Lõpliku planšeti põhjal saab edaspidi otsustada mõõdistustööde ammendavuse ja navigatsiooniohtude olemasolu üle ning hiljem on see aluseks kaartide koostamisel.

Tavaliselt on iga etapi jaoks eraldi programmipaketid, kusjuures esimene etapp kuulub tegelikult andmete kogumissüsteemi koosseisu. On olemas ka selliseid programme, mis sisaldavad endas kõiki ülaltoodud komponente.

10.4. Digitaalse reljeefimudeli üldmõisted

Kõrgusmudelite tegemine võib toimuda kas spetsiaalsete hüdrograafiliste andmetöötluspakettidega (GEOSEA, CARIS, HYPACK, NAVILINE, ISIS jt) või geoinfosüsteemi (GIS) vahenditega (ARC/INFO, MICROSTATION jt). Siinkohal kasutame näitena ARC/INFO vahendeid.

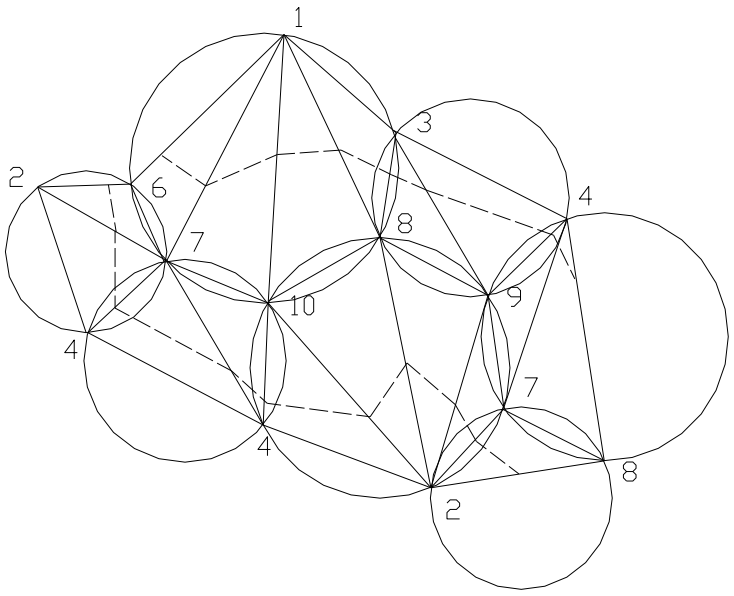
Kahemõõtmelise mudeli puhul võib igas punktis koordinaatidega *X* ja *Y* olla kõrgust määraval koordinaadil *Z* teatud väärtus, kusjuures pidevat infot võib kujutada pinnana kolmemõõtmelises (3D-) ruumis. Matemaatiliselt on pind ruumi selliste koordinaatide hulk, mille kõrgus avaldub kahe ülejäänud parameetri pideva funktsioonina $Z = f(X; Y)$. See funktsionaalne pind ei tohi olla katkev. Katkevuse näiteks on täiesti vertikaalne järsak, kusjuures sellel teatud punktil on erinev kõrgus, mis sõltub sellest, kas lähenetakse jalami poolt või veere poolt. Tarkvarapakett ARC/INFO võib siiski arvestada looduses esinevate järsakute olemasolu.

Reaalne pind moodustub lõpmatust hulgast punktidest. Pinnamudeli loomiseks kasutatakse lõplikku hulka punkte (valim), mille interpoleerimisel saab võimalikult täpselt taastada esialgse pinna. Lisaks peab mudel võimaldama kasutada lihtsalt saadavaid algandmeid ja sooritada efektiivset info salvestust ja töötlust.

Praktikas kasutatakse kahte liiki pinnamudeleid: rastermudelit ja TIN-mudelit.

Rastermudeli puhul võetakse valimi punktid nii abstsissi *X* kui ordinaadi *Y* suunal üldjuhul võrdse sammu järel, saades nii ristkülikulise võrgu. Olenevalt aplikaadi *Z* interpreteerimisest eristatakse võret ja võrku. Võre puhul esindab aplikaadi väärtus *Z* ainult konkreetset pinnapunkti ehk võre silma. Pinna suvalise punkti väärtus võre silmade vahel saadakse ümbritsevate naabersilmade väärtusi interpoleerides. Võrgu puhul moodustub iga punkti ümber võrdne ruudukujuline tsoon piksel, kusjuures need tsoonid katavad kogu pinna. Kõik punktid **piksli** sees omavad ühesugust väärtust.

Pinna esitamine arvutis rasterkujul on üldjuhul lihtne, kuid raster ei suuda edasi anda pinna morfoloogiat. Tasasematel aladel piisaks suuremast sammust, enam liigestatud piirkondades oleks vaja tihedamat sammu. Samuti lähevad kaduma sammust palju väiksemad anomaaliad (lohud, künkad). Üldjuhul peaks samm olema viiendik väikseimast eristatavast objektist.



Joonis 10.4. TIN-mudeli põhimõte. Märka, et kolmnurkade tippudest läbi tõmmatud ringjoonte sisse ei jää ühegi kolmnurga tippu. Nurkade tippudes on sügavussarvud ja kriipsjoonega on märgitud nende järgi interpoleeritud isobaat sügavusega 5

TIN-mudel (*Triangulated Irregular Network*) on kõrgusmudeli esituskuju, kus *xy*-tasandil ebakorrapäraselt asetsevad ja kõrgust *z* omavad punktid on ühendatud joontega nii, et need moodustavad kolmnurgad [Jagomägi, 1999]. Punktid ühendatakse omavahel Delaunay kriteeriumi alusel, st **suvalise kolmnurga tippudest läbi tõmmatud ringjoone sisse ei tohi jääda teisi punkte** (vt joon. 10.4). Sel moel moodustub kogu pinda kattev tasapinnaliste kolmnurkade korrapäratu võrk.

Kui rastermudelis kandsid infot ainult regulaarse võrgu punktid, siis TIN-mudeli puhul on väärtus ka kolmnurkade külgedel ja kolmnurkadel kui pindadel. Kolmnurkade küljed võivad kujutada endast näiteks järsakuid. Selliseid murdejooni on võimalik mudelisse sisse viia. ARC/INFO eristab kolme liiki murdejooni: pehmet ja tugevat murdejoont ning tõket. Pehmet murdejoont kasutatakse, kui soovitakse, et kolmnurkade servad jookseksid mööda joonobjekti või piirkonna serva, kusjuures pinna sujuvuse järsku muutust ei teki. Tugev murdejoon tekitab mudelis sujuvuse järsu muutuse. Et mudel vastaks Delaunay kriteeriumile, tekitatakse vajaduse korral murdejoonele lisapunkte. Reaalsel pinnal esinevaid järsakuid viiakse mudelisse tõkke abil. Tõke on selline joon, millel puudub aplikaat ja kolmnurkvõrk moodustub mõlemalt poolt ainult jooneni.

Pinna interpoleerimine seisneb aplikaatide *Z* interpoleerimises suvalise pinna mudeli vastavate valimipunktide järgi.

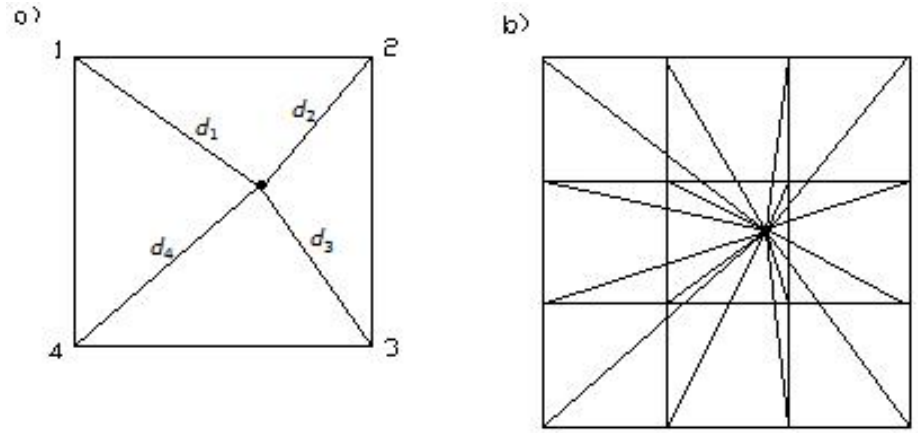
Nii võib taastada esialgse pinna, moodustada samajooni või profiile. TIN-mudeli puhul on võimalik kasutada lineaarset või kahe muutujaga viienda astme polünoomiga interpoleerimist. Rastermudeli korral võib kasutada lähima naaberpunkti kõrguse omistamist, bilineaarset interpolatsiooni või kuupahendamist.

Lineaarsel interpolatsiooni puhul loetakse leitav punkt olevaks ühe mudelit moodustava kolmnurga pinnal. Punkti aplikaadi *Z* väärtus leitakse ainult selle kolmnurga tippude aplikaatide väärtustest, mille sisse see punkt jääb. Selliselt taastatud pind ei ole sujuv. Meetod on kiire (seda kasutatakse muuseas ka käsitsiarvutamisel) ja tulemus on representatiivse valimi korral (kus on esindatud lokaalsed miinimumid ja maksimumid, murdepunktid ja -jooned) üsna tõene.

Kahe muutujaga (*X* ja *Y*) **viienda astme polünoomiga interpoleerimisel** saadakse sujuvalt muutuva pinna mudel, st pinna gradient muutub sujuvalt nii iga kolmnurga sees kui ka üleminekul naaberkolmnurgale. Lineaarne tugev murdejoon ja tugeva murdejoonega defineeritud ala kontuur tekitavad sujuvuse järsu muutuse, lisaks toimub sellise ala sees lineaarne interpoleerimine. Tulemus on parem kui lineaarsel interpoleerimisel, aga on oht, et viienda astme polünoom interpreteerib tegelikkuses mitteesinevaid pinnavorme. Tiheda valimi puhul on mõlema meetodi tulemused võrdlemisi sarnased, kuid polünoommeetod on arvutuslikult mahukam.

Bilineaarne interpolatsioon (vt joon. 10.5.a) arvutab aplikaadi *Z* väärtuse suvalises punktis nelja lähima võre silma kaalutud kauguste järgi. Kõik 3D-käsud ARC/INFOs, mille argumendiks on rasterkujul kõrgusmudel ja milles toimub interpoleerimine, kasutavad seda meetodit.

Kuupahendamine (vt joon. 10.5.b) on analoogiline bilineaarse interpolatsiooniga, ainult nelja lähima võre silma asemel võetakse neid kuusteist (st 2 × 2 silma asemel 4 × 4 silma). Kasutades interpoleerimisel punkti ümber suuremat pinda, saame kokkuvõttes sujuvama pinna, sest lokaalsed ekstreemumid tasandatakse.



Joonis 10.5. a) Bilineaarne interpoleerimine; b) kuupahendamine

Kõrgusmudeli loomine. TIN-mudeli genereerimiseks võivad algandmed tulla korraga mitmest andmekogumist (ARC/INFO kaardikihid, tekstifailid, rasterpinnad). Objektid, millest TIN genereeritakse, on kõrgust omavad punktid ja jooned, murdejooned ning tõkked. Iga andmekogumi peal on võimalik valida loogilise tingimusega objekte, mida kaasatakse, ja iga sisendobjektiga saab lisaks kaasa anda infot selle morfoloogia kohta (massipunkt, murdejoon jt). Andmeid saab enne sisestamist automaatselt üldistada.

Rasterkujul pinna võib luua TINist, korrapäraselt asetsevatest punktandmetest või korrapäratult asetsevatest punktandmetest. Et rasterkujul pinna salvestusformaat ARC/INFOs on sama mis rasterandmetel (ARC/INFO GRID-formaat), võib suvalist rasterkujutist, kuidas see ka saadud pole, vajaduse korral käsitada pinnana.

TINi teisendamisel rastriks interpoleeritakse aplikaadi väärtus rastri võre silmades kas lineaarse interpolatsiooni või viienda astme polünoomi abil. Ette saab anda rastri suuruse ja sammu.

Ebakorrapäraselt asetsevatest punktandmetest rasterpinna genereerimiseks on neli meetodit: kaugusega pöördvõrdeline kaal, kriging, trendipind ja splain. **Kaugusega pöördvõrdelise kaalu** puhul on valimi punkti kaalu funktsioon pöördvõrdeline kaugusega interpoleeritavast võre silmast. Valimi punktide mõju pinnale saab reguleerida kauguse funktsiooni astmega.

Kriging annab samuti valimi punktile kaalu, kuid meetod arvestab sealjuures interpoleeritava funktsiooni statistilisi omadusi. Põhimõtteliselt on kriging üldistatud lineaarse regressiooni liik, mis kasutab pindade moodustamiseks minimaalseid keskmisi ruuthälbeid. Meetodi idee seisneb nihketa keskmise printsiibis, st kõigi kaardilt võetud sügavuste väärtuste keskmine peab olema õige. Siin on võimalik valimi punktide kaugust analüüsida kahe muutuja (X, Y) järgi ja valida pinna genereerimiseks sobivamad parameetrid, st ennustada funktsiooni väärtus antud punktis, arvutades funktsiooni väärtuse kaalutud keskmise selle teadaolevate väärtuste järgi antud punkti naabruses olevates punktides. Krigingu abil lahendatakse kaks ülesannet:

- andmete ruumilise struktuuri määrang;
- prognoosi koostamine.

Trendipinna interpolaator moodustab kahe muutujaga (X, Y) polünomiaalse pinna nii, et valimi punktides on punktide ja pinna vahe keskmine ruutviga vähim. Pind moodustatakse kõigi väärtuste põhjal ja see kajastab andmete üldist jaotust. Polünoomi astme saab ette anda.

Splain on tükati polünomiaalne pind. Valimi punktide vahel kasutatakse erinevate kordajatega (aga sama astmega) polünoome nii, et tekkiv pind läbib täpselt valimi punkte ja on samal ajal üleminekukohtades sujuv.

Teoreetiliselt on kõrgusmudeli parimaks kujuks üldjuhul TIN, sest selle moodustamisse on võimalik kaasata kõige rohkem täpsustavaid andmeid (murdejooned, tõkked). ARC/INFO 3D-analüüsi ja visualiseerimise vahendid töötavad võrdselt nii

TINi kui ka rastermudeli puhul. Peab märkima, et mere loodimise süsteem ühekiireliste kajaloodidega suhteliselt hõredate halssidega ning palju tihedamate loodimispunktidega halsil ei ole TINi genereerimisel kõige parem. Universaalse Delaunay triangulatsiooni generaatorid (ka ARC/INFO omad) tekitavad sama halsi punkte kasutades selle ümber horisontaalsetest kolmnurkadest riba ja halsijoonte vahele paratamatult pikad kitsad kolmnurgad. Nii tekib trepilaadne kõrgusmudel. Mitmekiirelise või lehvikkajaloodiga sellist ilmingut ei esine.

Siiski tuleb märkida, et kuigi TIN on küll kõige täpsemini tõelist reljeefi peegeldav kõrgusmudel, on ta ka kõige töömahukam ning seega kõige aeglasem meetod. Väga suurte andmehulkade puhul (miljonid punktid) nõuab kõrgusmudeli tegemine selle meetodiga suhteliselt palju aega. Väga suured andmehulgad tekivad peamiselt interferomeetriliste kajaloodide kasutamisel (enamik neist annab üle 1500 punkti sekundis, seega on juba tunnise mõõdistamise järel punkte ligikaudu 5,4 miljonit) ning seetõttu on ka sügavuspunktide tihedus väga suur (keskmiselt 3–6 punkti ruutmeetril). Sellise tiheduse puhul võib ka rastermudeleid päris edukalt kasutada, mida hüdrograafiliste mõõtmiste andmetöötluses sageli tehaksegi. Suurimaks probleemiks siin on rastermudelite põhjal genereeritud samasügavusjoonte võimalik mittesobivus navigatsioonis kasutatavatele andmetele esitatavate nõuetega (mõned sügavuspunktid võivad jääda valele poole samajoont). TIN-mudeli puhul seda karta pole.

10.5. Digitaalkaardi üldmõisted

Digitaalkaardi all mõistetakse üldiselt andmekogumit, milles reaalse maailma objektid (nii füüsilised nagu reljeef või navigatsioonimärgid kui ka mõttelised nagu laevatee jms.) on esitatud digitaalkujul. Digitaalkaart võib eksisteerida nii rasterkui vektorkujul või mõlema kombinatsioonina. Rasterkaart kujutab endast ühtlast ruudustikku, millel informatsioon esitatakse ruutude erinevate värvustega.

Vektorkaardil koosneb info nn algelementidest (punkt, joon, polügoon jms). Rasterkaardi põhipuudusteks on objektide info puudumine (eraldi eksisteerivaid objekte ei ole rastervormingus olemas, sest kogu info on esitatud ruudustikuna) ning suur tundlikkus mõõtkava muutmise suhtes. Plussiks on kindlasti vormingu lihtsus. Vektorkaartidel eelnimetatud puudusi ei ole ning ainsaks miinuseks võib pidada selliste kaartide sisemist keerukust. Navigatsioonis kasutatakse seni nii raster- kui ka vektorkaarte.

Uueks suunaks elektrooniliste merekaartide juures on ühtne vahetusstandard S57, millest on juba ilmunud mitu versiooni. See erineb tublisti kõigist senituntud digitaalkaartidest, eelkõige just sellepärast, et on ette nähtud spetsiaalselt navigatsiooni ECDIS (*Electron Chart and Information Display*) süsteemides kasutamiseks. Tegemist ei ole enam lihtsalt digitaliseeritud kaardiga, vaid objektide ning orientatsiooni spetsiaalses formaadis andmebaasiga, mis sisaldab infot nii teatud objekti kujutise kui ka olemuse kohta. Info kujutamise seisukohalt võib selle standardijärgsed kaardid liigitada vektorkaartide alla.

MicroStationi puhul, mida võib kasutada näiteks andmetöötlusel, kui rannamerd mõõdistatakse kajaloodi ja elektrontahhümeetri abil, on kaardi esmaseks digitaalväljundiks dgn-vormingus fail, kus kogu topograafiline või hüdrograafiline info on klassifitseeritud ja atribuutide järgi sorteeritav. (Siin peetakse silmas objekti atribuute – kihi number, värvi number värvitabelis, joone stiil, joone kaal, objekti klass, kaldenurk, mõõtkava, teksti šrift, teksti suurus, tähevahe MicroStationi dgn-failis ja analoogilistes salvestusvormingutes. Salvestatakse ka objekti tüüp (punktobjekt, joonobjekt, pindobjekt ehk ala, kujunduselement, ala kirjeldav punkt). Siinjuures kasutatakse kaardi digitaalsalvestusel järgmisi graafilisi kujundeid: sirgjoon, jadajoon, kinnine kujund, tekst. Pinnad ja viirutatud alad moodustatakse väljatrükkide ettevalmistamisel. Digitaliseerimisel jälgitakse järgmisi põhimõtteid:

1) kõik alad suletakse mingi joonobjektiga;
2) jooni ei katkestata, vaid vajadusel maskitakse;
3) jooni üldjuhul ei dubleerita ja kokkulangevate joonobjektide kujutamiseks kasutatakse kindlat joonte asendumise järjekorda;
4) kõik alad peavad olema defineeritud kas ala kirjeldava leppemärgiga, ala piirjoone tüübiga või muul viisil;
5) leppemärke kasutatakse vaid normaalsuuruses, st neid ei mõõtkavastata; vajaduse korral muudetakse leppemärgi suurust või kuju kõigil märgi esinemisjuhtudel;
6) ala kirjeldava leppemärgi siduspunkt peab asuma selle ala sees.

Digitaalkaartide valmistamiseks olemasolevad kaardid digitaliseeritakse ning vajaduse korral need hiljem muudetakse. Digitaliseerimine võib toimuda paberkaardi skaneerimisel skanneriga, kusjuures on võimalik saada nii raster- kui vektorkaarte. Digitaliseeritud kaardiga saab sooritada mitmesuguseid operatsioone: lisada mingit infot või muuta olemasolevat, ühendada erinevaid kaarte uut tüüpi kaardi koostamiseks jms.

Digitaalkaartide ja geograafiliselt määratletava infoga tegeleb suur informaatikaharu, mida nimetatakse GIS (*Geographical Information Systems*). Kõige üldisemalt võib öelda, et GIS on ühendanud digitaalkaardid andmebaasidega, st reaalse maailma objekte mitte ainult ei kujutata, vaid ka töötatakse nende objektidega kaasneva infoga.

Digitaaltehnoloogia võimaldab lähtematerjalina kasutada ka selliseid kaarte, mille mõõtkava, koordinaadistik või projektsioon ei ühti koostatava kaardi omaga.

Rahvusvahelise tava kohaselt ei ole digitaalkujul kaart dokument. Dokument on alles selle väljatrükk. Tihti kasutatakse värvilisi väljatrükke, millel on mitmesuguseid puudusi (paberi deformeerumine ja kerge kahjustatavus, värvide pleekumine jm). Digitaalse kaardi analoogkoopia on vajalik monokromaatse koopiamasinaga koopiate tegemiseks juhul, kui kaardi digitaalvarianti ei ole võimalik või otstarbekas kasutada. Kaardi analoogvariandi olemasolul saab kaardiinfot täiendavalt säilitada. Otstarbekas on digitaalse kaardi analoogvariant trükkida filmiprinteri abil filmile, mis tagab:

- arhiivioriginaali väga hea trükikvaliteedi;
- hea säilivuse;
- hea kopeeritavuse, seejuures võimaluse kasutada ka läbivalgustamisel põhinevaid tehnoloogiaid;
- võimaluse filmile trükitud kaardileht asetada samade piiridega ja samas mõõtkavas ortofoto peale.

Kokkuvõtteks võib konstateerida:

1) digitaalsalvestuse jaoks on oluline kaardistatavate objektide loetelu, objekti õige sisu ja asupaik, salvestuse manipuleeritavus ja konverteeritavus;

2) digitaalsalvestuse jaoks ei ole oluline, millistesse kihtidesse on kaardistatud objektid salvestatud, milliseid joonestiile ja -jämedusi kasutatakse, millise kuju ja suurusega leppemärke kasutatakse, milline on leppemärkide värvitoon, kui need atribuudid ei ole mingi standardiga kindlaks määratud.

11. MEREPÕHJA RELJEEFI KUJUTAMINE

11.1. Merepõhja reljeefi kujutamine väikese mõõtkavaga kaartide koostamisel

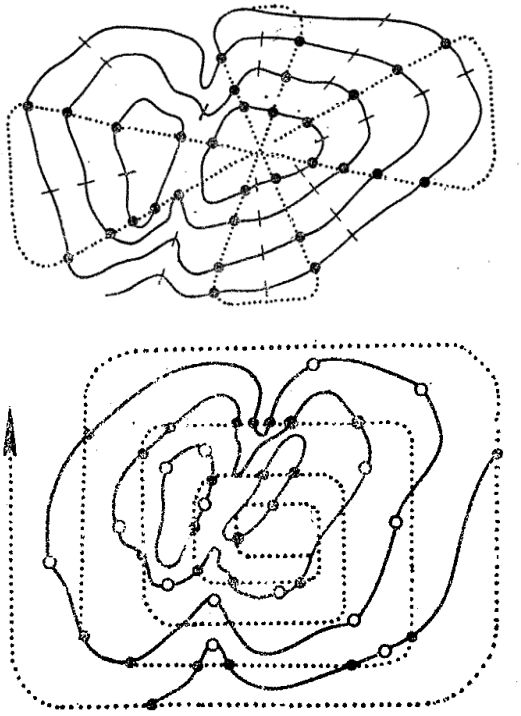
Reljeefi kujutamine väikese mõõtkavaga kaartidel peab täpselt ja loogiliselt kajastama merepõhja morfoloogilisi iseärasusi, mis on tuvastatud sooritatud mõõdistuse ja uuringute materjalide alusel. See saavutatakse reljeefi struktuurijoonte ja samasügavusjoonte abil, millel on iga reljeefivormi spetsiaalne konfiguratsioon. See teema on päevakorras ka tänapäevases automatiseeritud andmetöötluses ning reljeefi matemaatilisel modelleerimisel ning tekitab probleeme väga keeruka reljeefi ja väikese mõõtkavaga kaartide koostamisel.

Reljeefi kujutamise protsess koosneb üldjuhul järgmistest operatsioonidest, mille järjekord ja maht võivad muutuda olenevalt loodimise üksikasjalikkusest ja täpsusest:

a) kartograafiliste ja kirjeldavate materjalide tundmaõppimine ja põhjareljeefi iseärasuste ning ehituse selgitamine eelmiste uuringute geomorfoloogiliste andmete alusel;
b) esialgsete samasügavusjoonte moodustamine;
c) eelmiste uuringute materjalides kajastuse leidnud reljeefivormide äratundmine;
d) eelmiste uuringute materjalides mittekajastunud reljeefivormide äratundmine;
e) reljeefi kujutise moonutuste väljaselgitamine ja kõrvaldamine;
f) reljeefi lõplik kujutamine struktuurijoonte ja korrigeeritud samasügavusjoonte abil koos nende jooniste tüpiseerimisega.

Kartograafilisi ja kirjeldavaid materjale õpitakse tundma põhiliselt selleks, et saada andmeid globaalsete, regionaalsete ja kohalike reljeefivormide leviku kohta. Need andmed kajastuvad üldistel ja batümeetrilistel merekaartidel, ookeanide atlaste kaartidel ja teistel nüüdisaegsetel kaartidel, mis on koostatud geofüüsikaliste uuringute alusel, kusjuures on kasutatud veealuse reljeefi mõõdistamise uusimaid meetodeid. Kirjeldavate materjalide hulka kuuluvad ka mitmesugused ajakirjade ja kogumike artiklid uuritava piirkonna geomorfoloogia ja tektoonika kohta.

Samasügavusjoonte asend loodimishalssidel leitakse kas vahetult mõõdistusandmetest või digitaalselt saadud diskreetsete sügavuste puhul interpoleerimise teel. Samasügavusjoonte asend halsside vahel määratakse, olenevalt halssidevahelistest kaugustest ja halsside orienteeritusest struktuurijoonte suhtes, kas naaberhalsside sügavuste interpoleerimise või ekstrapoleerimise abil, st levitades halssidel leitud samasügavusjoonte vahelisi kaugusi halssidevahelisse alasse. Harilikult on otstarbekas kasutada kõiki nimetatud meetodeid kompleksselt. Kasutamise näited on joonisel 11.1.



Joonis 11.1. Veealuse kõrgendi (või süvendi) samasügavusjoonte vahetu määramine radiaalhalssidega (ülemine joonis) ning interpoleerimine ja vahetu määramine spiraalhalssidega (alumine joonis). Parim lahend on meetodite kooskasutamine. Halsid on kujutatud punktiiriga. Mustad punktid – halsil saadud samasügavusjoonte kõrgused, ringikesed – interpoleeritud sügavuspunktid [ПГС № 4, 1984]

Punktid, mis on saadud lineaarse interpoleerimise ja ekstrapoleerimise abil (joonisel tähistatud rõngakestega), ühendatakse sujuvate kõveratega, saades nii esialgsed isobaadid.

Eelmiste uuringutega väljaselgitatud reljeefivormide äratundmine toimub sügavuste ja esialgsete isobaatide vastandamisel reljeefi kujutusega eespool mainitud üldistel ja batümeetrilistel merekaartidel ning ookeanide atlaste jms kaartidel.

Kui avastatakse erinevusi vastandatavate objektide mõõtmetes, orienteeringus ja piirjoontes, tuleb mittevastavuse põhjuste selgituseks analüüsida loodimise materjale.

Eelnevate uuringutega väljaselgitamata reljeefivormide äratundmine oleneb:

- halssidevaheliste kauguste L ja kajagrammidel ning planšettidel avastatud reljeefivormide ulatuvuse s_t suhtest;
- halsside suunast reljeefivormide lebamise suhtes.

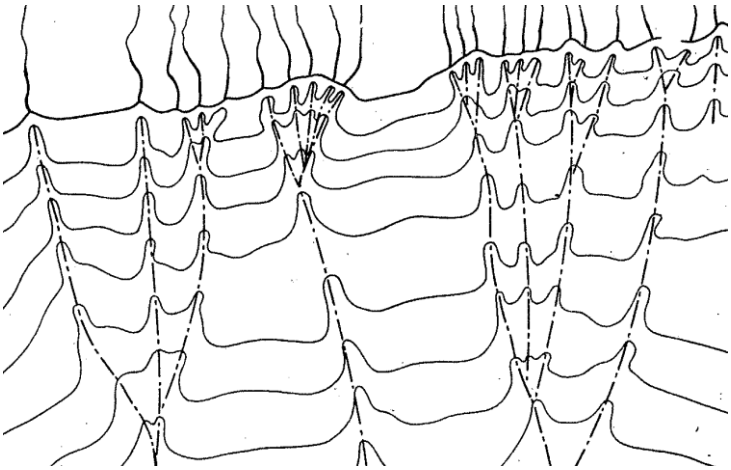
Sealjuures esinevad järgmised variandid:

a) kui $s_t > 2L$, siis reljeefivormid tehakse kindlaks isobaatide iseloomuliku joonise järgi;
b) kui $L \leq s_t \leq 2L$ ja halsside suund võimaldab kasutada naaberhalssidevaheliste sügavuste interpoleerimise meetodit, siis võib reljeefivorme ära tunda isobaatide iseloomuliku joonise järgi. Halsside teistsuguse suuna puhul tuleb kasutada järgmises alajaotises kirjeldatud spetsiaalseid võtteid;
c) kui $s_t < L$, siis võib juhtuda, et mõned reljeefivormid jäävad vahele, mistõttu tuleb loodimist (halssidevahelisi kaugusi) tihendada.

11.2. Šelfi reljeefivormide tuvastamine planšetil

Šelfil võib ilmneda palju maismaa jäänukreljeefi vorme, näiteks uputatud jõeorgusid, ürgsetel jäätumisaladel aga liustikuorgusid, künkaid, seljakuid jms.

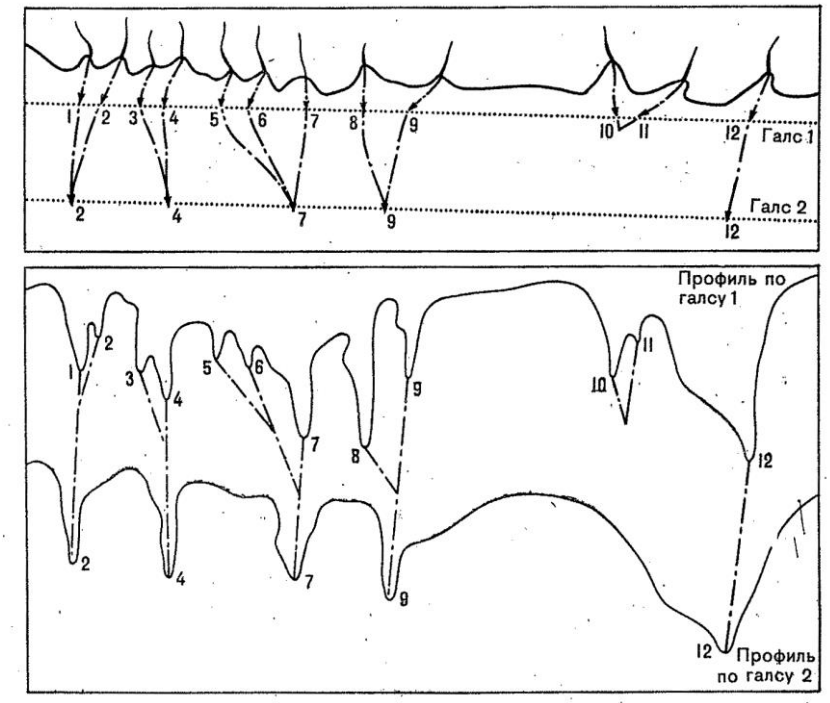
Veealused orud (sh ka liustikutekkelised) tehakse kindlaks isobaatide iseloomuliku joonise järgi: isobaadid moodustavad kitsaste aasataoliste loogete rea, mis algab jõeorus või fjordis. Tihti kuuluvad nende juurde selgelt väljendunud harunemised, mis vastavad lisajõgede orgudele (joon. 11.2).



Joonis. 11.2. Veealuste orgude kujutised isobaatide aasataoliste loogetena, mis on välja venitatud piki jõeorgude suunda [ПГС № 4, 1984]

Hõreda halssidevõrgu puhul võib avastada veealuse oru, kõrvutades isobaatide joonist rannaäärse maismaa-ala reljeefiga.

Kõige kindlamalt on veealused orud äratuntavad rannaga paralleelsetel halssidel, sest need fikseerivad veealuste orgude ristlõiked, mis asuvad jõeorgude telgede pikendustel (joon. 11.3).

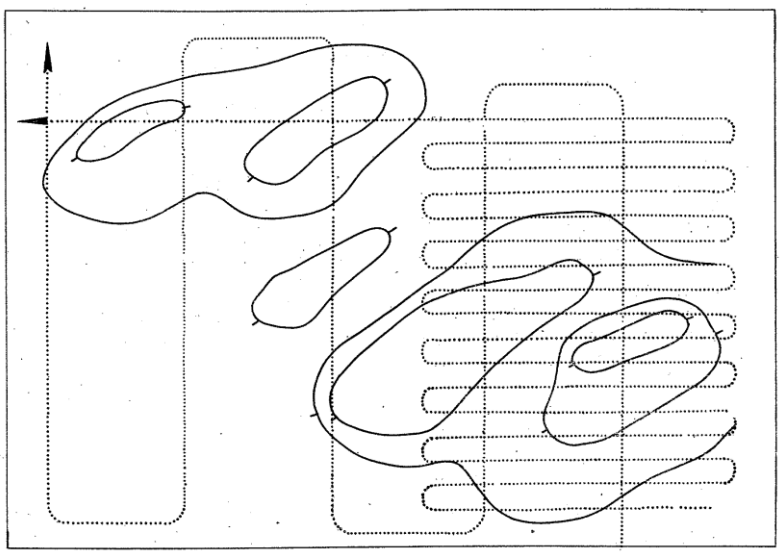


Joonis 11.3. Veealuste orgude kindlakstegemine profiilide kõrvutamise abil. Ülemine joonis on kaart, alumisel on profiilid, mis on ülemisel näidatud punktiiriga. Struktuurijooned on kujutatud kriips-punktjoonega ja planšeti ning profiili vastavad elemendid numbritega [ПГС № 4, 1984]

Halssidel, mis paiknevad risti isobaatide üldise suunaga, kui halsid on sealjuures rajatud peaaegu piki veealuseid orgusid, on orud halvemini jälgitavad, sest neile vastavad looked on kajagrammil vähenähtavad. Esialgsed isobaadid annavad sel juhul reljeefist vale ettekujutuse, st šelfi pinda liigendavate orusarnaste alangute asemel joonestuvad välja eraldi asetsevad merepõhja tõusud, mis paiknevad eraldi horisontidel, aga vahel ka rannajoonega paralleelsed kitsad seljakud.

Selleks et veenduda orgude olemasolus, tuleb vaadelda loodimishalsside profiile ja märkida planšetil alangud, mis on eraldatud näivate kõrgendikega. Kui need kõrgusmärgid asetuvad ühte seaduspärasesse ritta, mis on välja venitatud jõeorgude pikendustele, siis reljeefi avastatud ebatasasused kuuluvad tõenäoliselt reliktsetele jõeorgudele. Taolise oletuse kinnitamiseks tuleb võrrelda kaugusi naaberhalsside ühesuguste isobaatide vahel, arvestades, et veealuste orgude pikiprofiil erineb orgudevahelise ala profiilist.

Šelfi piirkonnas asuvad üksikud merepõhja kõrgendid ilmnevad isobaatide lihtsate ovaalsete või kandiliste suletud kontuuridena. Neid võib ära tunda tingimusel, et kasvõi üht kõrgendit on uuritud küllalt üksikasjaliku loodimise abil, st on kindlaks tehtud selle mõõtmed ja orientatsioon ning sooritatud vajalikud kõrvutamised maismaa morfostruktuuridega. Niisiis võib jooniselt 11.4 näha, et kagupoolseim kõrgend, mida uuriti üksikasjalikult, on välja venitatud kirde–edela suunas ja võib järeldada, et ülejäänud põhihalssidega avastatud kõrgendid on samasuunalise orientatsiooniga. Äratundmise usaldusväärsuse aste tõuseb koos detailselt uuritud vormide hulga suurenemisega.

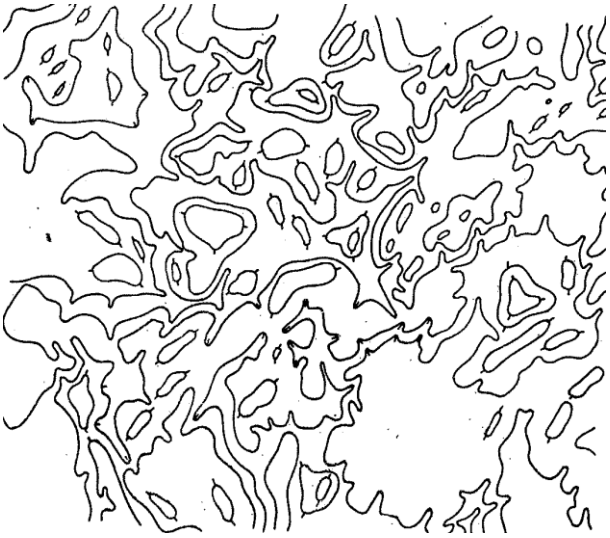


Joonis 11.4. Halsside vahekaugus peab olema väiksem reljeefivormide mõõtmetest. Põhjapoolse kõrgendi läänetipp jääb hõredate halsside korral täiesti märkamata ja idatipust ning kahe suure kõrgendi vahelisest väikesest kõrgendist saab väga ebamäärase ettekujutuse [ПГС № 4, 1984]

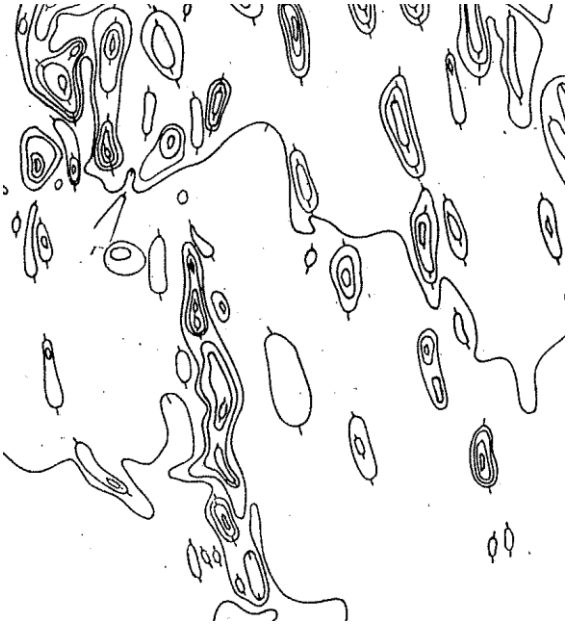
Endis- ja nüüdisaegsete jäätumisaladega külgnevate merede šelfialadel on laialt levinud moreenkünkad ja -seljakud, mis on grupeerunud korrapäratuks künklikuks reljeefiks (joon. 11.5). Kui nende kohta pole piisavalt üksikasjalikke andmeid, on ka nende vormide mõõtmeid ja orienteeritust võimatu määrata isegi ligikaudselt, sest need võivad olla isegi väikestel aladel väga erisugused.

Liustikulised moodustised võivad kujutuda isobaatide reeglipärase ja selge joonisega. Näiteks üleujutatud voored näivad ühes suunas orienteeritud ovaalsete isobaatide kogumina (joon. 11.6).

Oosid (vallseljakud) näivad kitsaste lintidena, mis joonise poolest sarnanevad jõesängiga, kuid kujutavad positiivseid reljeefivorme. (Sarnasus on võrdlemisi tinglik.)



Joonis 11.5. Liustikmoreeni künklik reljeef nõuab väga tihedat halsside paigutust, kuna isobaadid on väga korrapäratud [ПГС № 4, 1984]



Joonis 11.6. Veealused voored ja oosid näivad kitsaste, ühtlase orientatsiooniga ovaalidest koosnevate lintidena [ПГС № 4, 1984]

Šelfialad, mis külgnevad endis- või nüüdisaegsete jäätumispiirkondadega, võivad üksikutel aladel olla nn plokkehitusega, sest on liigestatud piki- ja põiknõgudega ning kanjonitega (joon. 11.7).

Joonis 11.7. Jäätumisaladega kokku puutunud šelfi osad on sageli liigestatud piki- ja põikvaonditega (struktuurijooned on kriips-punktjooned) ja kanjonitega (struktuurijooned on kaldesuunalised kriipsjooned) [ПГС № 4, 1984]

Korallrifid näivad kitsaste lintidena, millel on kas ovaalne või hobuseraua kuju. Nende kontuuride sees on sügavused harilikult väikesed ning erinevad järsult tunduvalt suurematest sügavustest väljaspool kujundeid. Profiilijoonel fikseeruvad rifid suhteliselt teravaotsaliste tippudena.

Riffide kontuuride õige kujutamine on võimalik ainult väga üksikasjaliku mõõdistamise või lausuuringute korral, kasutades viimasel juhul kajatraale või aerofotomõõdistamist.

11.3. Reljeefi kujutamise moonutused ja nende kõrvaldamine

Reljeefi moonutuste all mõistetakse:
- reljeefivormi plaanilise joonise hälvet vormidest, mis on iseloomulikud antud pinnavormi tekkele;
- ühe ja sama vormi kahekordset kujutumist (näiteks ühetipulise mäe kujutumine kahetipulisena);
- olematute vormide ilmnemist reljeefi kujutamisel.

Seega loetakse tasaste alade kujutumine õigeks, kui isobaatidel on sujuv joonis järskude loogeteta halsilt halsile. Isobaatide teravate loogete ja piki halssi väljavenitatud piklike suletud kontuuride ilmumine on tõenäoliselt põhjustatud vigadest sügavuste mõõtmisel või parandamisel, näiteks järsu liigestatud reljeefi puhul.

Kui halsside arv on väike, tuleb jätta alles sellise halsi andmed, mis annavad veealuse kõrgendi tipu juures väiksema sügavuse; ülejäänud halsside andmed kustutakse planšetilt, määrates eelnevalt mäe ulatuse iga isobaadi piires, et kasutada neid andmeid reljeefi edasisel joonestamisel.

11.4. Reljeefi lõplik kujutamine

Merede ja ookeanide põhjareljeefi lõplikul kujutamisel tuleb peatähelepanu pöörata üksikute reljeefielementide iseärasuste selgitamisele loodimismaterjalide geomorfoloogilisel analüüsil. Seda tuleb eriti teha väikese mõõtkavaga kaartide puhul.

Reljeefi lõplikul kujutamisel on järgmised põhietapid:
- struktuurijoonte moodustamine;
- lõplike isobaatide joonestamine koos nende jooniste tüpiseerimisega.

11.4.1. Struktuurijoonte moodustamine

Reljeefi struktuurijooned jagatatakse kahte rühma: telgjooned ja piirjooned. Telgjooned on struktuurijooned, mis vastavad mäeahelike ja seljandike harjade või orutaoliste moodustiste talvegite[43] telgjoontele.

Piirjooned on struktuurijooned, mis piiravad reljeefivorme ja -elemente ning vastavad nõlva pervele ja alumisele äärele. Need jooned saadakse reljeefi põikprofiilide abil. Vahel on otstarbekas moodustada struktuurijooned, mis piiravad mingeid sügavusi ega arvesta sealjuures veealuste orgude ja kanjonite tekitatud lookeid.

Pikkuse järgi võib struktuurijooni jaotada veel regionaalseteks ja lokaalseteks.

---

[43] Talveg – merepõhja reljeefi voolunõva, st joon, mida mööda liigub veerudelt alla valguv muda või lahtine kivim. Need joonestatakse piki ekstreemseid sügavusi. Ümarad, kolm- ja nelinurksed reljeefivormid kujutatakse mitme telgjoonega, mis väljuvad kujundi tsentrist.

Regionaalsete joontega märgitakse suurimate morfostruktuuride elemendid: mäeahelike teljed, šelfi perv jms.

Lokaalsete struktuurijoonte hulka kuuluvad nii eraldi seisvate mägede kui ka väiksemate pinnavormide teljed ja piirjooned.

Mandri veealuse ääreala kujutamiseks moodustatakse regionaalsed struktuurijooned: šelfi perve joon, mandrinõlva alumise ääre joon, mandrijalami väline piir, teatud samasügavusjooned. Peale eelnimetatute kasutatakse järgmisi kohalikke ehk lokaalseid struktuurijooni: veealuste orgude ja kanjonite teljed ja piirjooned, mandrinõlva astmete piirjooned, maakoore tektoonilistest liikumistest ja laava väljavoolust tekkinud põhja kerkealade teljed, seljakute teljed.

Šelfi perve ja mandrinõlva alumise ääre joon moodustatakse põikprofiilide abil, millest kantakse planšetile vastavate paindejoonte punktid. Viimased ühendatakse sujuva kõveraga, kusjuures ei arvestata veealuseid orgusid ega kanjone kujutavaid kumerusi.

Kui halsid on orienteeritud risti mandrinõlva veealuste orgude ja kanjonite telgedega, siis kujutatakse viimaseid viie struktuurijoone alusel: talvegi telg, kanjoni mõlemad perved ja veeru alumised ääred.

Kui nurk halsi suuna ja kanjoni telje vahel on väike, kasutatakse kolme joont – talvegi telg ja mõlemad perved.

Kui halsid on orienteeritud piki veealuseid orge ja kanjoneid, siis kujutatakse neid ainult telgjoonte alusel.

Mandrinõlva astmete piirjooned vastavad astme servadele (perv, terrassi tagaäär ja kaks külgtahku). Need jooned joonestatakse läbi esialgsete isobaatide vastavate loogete nii, et kaks neist, mis vastavad ühe ja sama astme külgtahu servadele, oleksid paralleelsed.

Eraldi asuvate või suuri morfostruktuure liigestavate kerkealade teljed joonestatakse läbi minimaalsete sügavuste. Kui kerkealasid ei ole detailselt uuritud, kasutatakse telgede joonestamisel kaudseid tunnuseid (andmed rannalähedase maismaa morfostruktuuride ja detailselt uuritud veealuste kerkealade orienteerituse kohta). Ülemineku tsooni reljeefi struktuurijoonte hulka kuuluvad saarkaarte, sisemiste kerkealade ja sügavate nõgude regionaalsed teljed ja piirjooned ning mäeahelikke, sügavaid nõgusid, sadulhäile ja mäeharju liigestavate kanjonite lokaalsed teljed.

Regionaalsed teljed ja piirjooned joonestatakse, kasutades nii loodimise materjale kui ka mandri mäeahelike struktuurijoonte pikendamist üle rannajoone. Samuti arvestatakse üksikasjalikult uuritud veealuste mäeharjade ja nõgude telgede pikendamise teel saadud andmeid.

Regionaalsed piirjooned joonestatakse läbi profiilide vastavate paindepunktide morfostruktuuride suurimatel laienditel. Ülemises osas üksikasjalikult uuritud ja alumises osas uurimata morfostruktuuride kujutise piirjoonteks on jooned, mis

puutuvad morfostruktuuri esialgse kontuuri suurima laienemise alal kõige sügavamat uuritud taset iseloomustavaid isobaate.

Kanjonite ja sadulhäilude teljed moodustatakse samuti kui mandrinõlva kanjonite teljed.

Üleminekutsooni mäetippude struktuurijooned on radiaalsed, kuivõrd selle tsooni mäetipud on esindatud põhiliselt vulkaanide koonustega. Mäetippude üksikasjalikul uurimisel, aga ka mäe tipul koonduvate radiaalhalsside puhul ei ole struktuurijooni vaja.

Ookeani keskaheliku kujutamisel on regionaalseteks struktuurijoonteks keskse riftioru telg ja põik-süvamurrangute teljed ning lokaalseteks struktuurijoonteks riftiorgude ja mägede teljed eraldi plokkide piires, **ruhiorgude**[44] ja **transformsete murrangute**[45] piirjooned.

Riftiorgude ja riftimägede teljed moodustatakse reljeefi üldistatud profiilide alusel. Reljeefivormide puhul, mis on tingitud transformsetest murrangutest, joonestatakse teljed läbi keskharja kontuuri järskude laiendite ja riftioru telje järskude loogete.

Ookeanisängi morfostruktuuri kujutamise struktuurijoonteks on regionaalsed jooned, st vulkaaniliste mägede ja küngaste ahela, põikmurrangute ookeanivallide ja kurrutus- või pangaliste[46] moodustiste teljed ja piirjooned, ning lokaalsed jooned, st koonusekujuliste vulkaaniliste mägede ja küngaste teljed ja piirjooned, ookeanivallide nõlvade astmete piirjooned, mäetippude ja sadulhäilude teljed.

Need struktruurijooned moodustatakse samuti nagu mandri veealuse ääreala ja üleminekutsooni analoogiliste morfostruktuuride struktuurijooned.

11.4.2. Lõplike isobaatide moodustamine ja nende jooniste tüpiseerimine

Seoses sellega, et põhjareljeefi vormide ja elementide iga kujutis on mingil määral tinglik, tuleb nende iseärasuste kujutamiseks isobaatide joonised tüpiseerida. See protsess hõlmab isobaatide silumist, nende käänakute kooskõlastamist struktuurijoontega ja käänakute kuju kooskõlastamist reljeefi üksikute elementide geomeetrilise kujuga.

Isobaatide silumine toimub juhul, kui isobaadid, mis on joonestatud risti omavahel paralleelsete halsside süsteemiga, saavad teatud loogelisuse, aga halsid, mis on rajatud piki isobaate, näitavad liigestatuse puudumist sellel suunal.

Kui aga isobaatidesuunalised halsid näitavad reljeefi liigestatust, siis peab isobaatide loogelisus säilima.

---

[44] Ruhiorg – transformse murrangu või liustiku moodustatud künataoline org.

[45] Transformne (põik-)murrang on murrang, mis on suunatud risti või põiki ookeani keskaheliku või saarkaare üldsuuna suhtes. Piki murrangut on üksikud alad nihkunud horisontaalselt.

[46] Pank – ookeanipõhja ala, mis on piiratud murrangutega.

Isobaatide loogete kooskõlastamine struktuurijoontega seisneb loogete tippude ühildamises põhjareljeefi elementide ja vormide telgede ning piirjoontega.

Isobaatide loogete vormi kooskõlastamine reljeefi üksikute elementide geomeetrilise vormiga seisneb alljärgnevas.

Kanjonite, veealuste orgude, fjordide veealuste pikenduste kujutamisel antakse isobaatide loogetele kas ümar-, V-kujuline või trapetsiaalne vorm vastavalt alanguste põiklõikele. Kui põikprofiil ei ole välja selgitatud, siis isobaatide joonise tüpiseerimiseks antakse looke tipule selline kuju, mis vastab antud morfostruktuuri looduses kõige levinumale profiilile. Nii saavad kanjonite looked V-kuju, fjordide veealused pikendused – trapetsiaalse vormi, veealused orud – kergelt ümarad looked.

Isobaatide käänakute vorm nende lõikumisel kanjonite, fjordide ja orgude veealuste pikenduste piirjoontega peab peegeldama nende pinnavormide nõlvade iseloomulikku liigestatust.

Selgelt väljendunud perve pinna järsule paindele vastab isobaatide järsk pööre, ümarale pervele vastab isobaadi väikese raadiusega ümarus, aga selgelt väljendumata pervele – suure raadiusega ümarus. Isobaatide käänakud kohtades, mida pole uuritud küllalt detailselt, kujutatakse väikese raadiusega kõverustega.

Orgudevahelise, muutuva kaldega ala kujutamise tüpiseerimisel kooskõlastatakse isobaadid piirjoontega, mis on joonestatud läbi reljeefi lõiketasandikordsetel sügavustel asuvate vastavate punktide, nii et loogete tipud puutuksid iga orgudevahelise ala piirjooni. Selle võttega saavutatakse orgudevaheliste naaberalade ühtsus, mis peegeldab neid reljeefivorme tekitanud protsesside ühtsust (isobaatide täpsel väljajoonestamisel lõikaksid need vastavaid piirjooni või vastupidi, ei ulatuks nendeni).

Vulkaaniliste veealuste mägede isobaatide jooniste tüpiseerimine seisneb nendele konstentriliste ringjoonte kuju andmises, kuivõrd need reljeefivormid on looduses üldjuhul peaaegu täpsed koonused. Koonusekujuliste mägede tipud peaksid asetsema võimalusel mäeaheliku teljel, s.t regionaalsel struktuurijoonel.

Vulkaaniliste mägede ja küngaste kuuluvust ühele või teisele mäeahelikule võib rõhutada isobaatide kooskõlastamisega regionaalsete piirjoontega. Sel juhul joonestatakse iga ahelikku kuuluva mäe nõlva kõige madalamat taset iseloomustavad isobaadid nii, et nad puutuksid regionaalseid piirjooni.

Sadulhäilude kujutamise tüpiseerimine seisneb vastassuunaliste loogete tippude paigutamises sadulhäilu teljele. Põikkuristikega läbilõigatud mäeahelike kujutamisel näidatakse nende üksikud plokid isobaatidega, mida võib iseloomustada üksteises asuvate nelinurkadena.

Ookeani keskahelike tüpiseerimine seisneb nende morfostruktuuride (riftiorud, riftimäed, pikiastangud, põikmurrangute tsoon) ühetüübilisuse edasiandmises. See saavutatakse isobaatide joonestamisega iga eraldi ploki piires paralleelselt üksikute morfostruktuuride telgedega. Eriti selgelt tuleb väljendada üksikute morfostruktuuride horisontaalsuhted.

11.5. Mõõdistamise kvaliteedi hindamine

11.5.1. Mõõdistamise kvaliteedi näitajad

Mõõdistamise kvaliteeti hinnatakse näitajate kogumiga, mis võimaldab otsustada, kas mõõtmistulemused vastavad hüdrograafiliste uuringute täpsusnõudeile.

Põhiliseks mõõdistamise tulemuseks on aruandeplanšetid reljeefi kujutisega ja (või) reljeefi arvmudelid. Vastavalt IHO standarditele tuleb merepõhja reljeefi kujutada sellise üksikasjalikkusega, et igas kasutatavas mõõtkavas saaks näidata kõiki navigatsiooniohte ja kujutada kõiki reljeefivorme. Kõige tähtsamad nõuded reljeefi kujutise usaldatavuse ja vajaliku üksikasjalikkuse tagamisel on mõõdistamise geomeetriline täpsus ja kogu piirkonna katmine halsside süsteemiga, mis tagab põhjareljeefi vormide väljaselgitamise.

Kõigil mõõdistamisetappidel määratakse ja sisestatakse vastavad parandid, valitakse ja korrigeeritakse halssidevahelised kaugused ning sooritatakse kontrollmõõtmised. Neid töid ja vastavat metoodikat vaadeldi eelmistes peatükkides. Lõplik töötlus eesmärgiga saada tõenäoseimad väärtused kõigile elementidele, mis kujundavad reljeefi graafilise või arvmudeli, toimub uurimistööde lõppetapil, kui on kasutada kogu vajalik teave ning saab teha usaldatavaid statistilisi hinnanguid.

Sellegipoolest ei tohi unustada, et hüdrograafilistel töödel kasutatakse tihti parandite aprioorseid suurusi ja täpsuse aprioorset hinnangut. Seetõttu on loomulik nõuda, et töötluse lõppetapil antaks mõõdistamistulemuste aposterioorne hinnang. See puudutab eelkõige mõõtmiste õigsust ja täpsust. Tuletame meelde, et õigsust iseloomustab mõõtmistulemuste süstemaatiliste vigade nullilähedus, täpsust aga parandatud mõõtmistulemuste lähedus nende tõelistele väärtustele.

Vaatleme selguse mõttes mõõtmisi ühekiirelise kajaloodiga. Koostame põhi- ja kontrollhalssidel tehtud sügavuste mõõtmise tulemustest andmiku, kuhu kanname halsside lõikepunktide sügavused nii põhihalsi (z_{0i}) kui ka kontrollhalsi järgi (z_{ki}). Interpoleerides nüüd naaberpõhihalsside vahekauguse telgjoonele, saame sügavused $\overline{z}_{0j}$. Samade punktide jaoks saame sügavused kontrollhalssidelt z_{kj} (joon. 11.8). Moodustame vahed

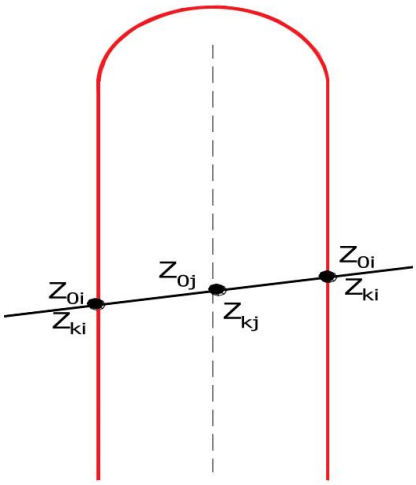
$$\Delta_i = z_{0i} - z_{ki}\,;\ \delta_i = \overline{z}_{0j} - z_{kj}\,.$$

Need vahed võimaldavad saada kolm väga tähtsat mõõdistamiskvaliteedi hinnangut:

- sügavuse mõõtmise keskmise ruuthälbe σ_z;
- sügavuse mõõtmise süstemaatilise hälbe jääkväärtuse keskmise suuruse $\overline{\delta}$;
- vahepealsete sügavuste plaanile interpoleerimise keskmise ruuthälbe σ_{in}.

Esmajärjekorras tuleb mõõtmiste õigsuse hindamiseks anda hinnang süstemaatilise hälbe jääkväärtuse keskmisele suurusele $\overline{\delta}$. Vaatleme põhi- ja kontrollhalsside sügavuste erinevuste väljavõtet:

$$\left.\begin{aligned} z_{01} - z_{k1} &= \Delta_1 \\ z_{02} - z_{k2} &= \Delta_2 \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots \\ z_{0i} - z_{ki} &= \Delta_i \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots \\ z_{0n} - z_{kn} &= \Delta_n \end{aligned}\right\} \qquad (11.1)$$



Joonis 11.8. Põhi- ehk tööhalsi (punane joon) ja kontrollhalsi (must joon) lõikumine. Kriipsjoon – halssidevahelise ala telg, z_{0i} – tööhalsil mõõdetud sügavused, z_{0j} – tööhalsil interpoleeritud sügavused, z_k – kontrollhalsil mõõdetud sügavused

Vahed $\Delta_i = z_{0i} - z_{ki}$ on ühtlasi samade vahede tõelised vead Δ_i, mis koosnevad kahest komponendist: juhuslikust veast ℓ_i ja süstemaatilisest veast δ_i. Nii võib avaldises (11.1) võrduste paremad pooled kirjutada järgmisel kujul:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \ell_1 + \delta_1; \\ \Delta_2 &= \ell_2 + \delta_2; \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \Delta_n &= \ell_n + \delta_n. \end{aligned} \qquad (11.2)$$

Liites võrduste (11.2) paremad ja vasakud pooled ning jagades summad võrduste arvuga, saame:

$$\frac{[\Delta_i]}{n} = \frac{[\ell_i]}{n} + \frac{[\delta_i]}{n}.$$

Juhuslike vigade omaduste alusel võib küllalt suure võrduste arvu *n* puhul eeldada, et

$$\frac{[\ell_i]}{n} \approx 0.$$

Tähistame süstemaatiliste vigade summa ja nende arvu *n* jagatise $\overline{\delta}$. Siis valem

$$\overline{\delta} = \frac{[\delta_i]}{n} \approx \frac{[\Delta_i]}{n} \qquad (11.3)$$

iseloomustab sügavuse mõõtmise süstemaatiliste vigade jääkväärtuste keskmist suurust. Sügavuste vahe keskmise ruutvea hinnangu, rea (11.1) andmetel, saame tõeliste vigade Δ_i järgi vastavalt valemile (5.8)

$$m_\Delta = \sqrt{\frac{\Delta_i^2}{n}}. \qquad (11.4)$$

Arvestades seda, et kahe suuruse vahe keskmise ruuthälbe ruut võrdub lähtesuuruste keskmiste ruuthälvete ruutude summaga, kirjutame

$$\sigma_\Delta^2 = \sigma_0^2 + \sigma_k^2,$$

kus σ_0 ja σ_k on sügavuste mõõtmise keskmised ruuthälbed vastavalt põhi- ja kontrollhalssidel.

Sügavused põhi- ja kontrollhalssidel mõõdetakse harilikult sama täpsusklassi kajaloodidega ja ühes ning samas keskkonnas. Seetõttu võib eeldada, et

$$\sigma_0 = \sigma_k = \sigma_z.$$

Siit saame

$$\sigma_\Delta^2 = 2\sigma_z^2$$

ning

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{[\Delta_i^2]}{2n}}, \qquad (11.5)$$

kus σ_z kujutab endast mõõtmiste piirkonnas tehtud sügavusmõõtmiste keskmist ruuthälvet.

Saadud hinnang iseloomustab sügavuste mõõtmise reaalset täpsust, sest on juhuslike mõõtmisvigade ja pärast mõõtmistulemuste parandamist alles jäänud süstemaatiliste jääkvigade koosmõju tulemus.

Interpoleerimise keskmine ruuthälve σ_{in} oleneb põhjareljeefi liigestatuse astmest ja on sel kombel seotud halsside vahekaugusega L. Selleks et hinnata σ_{in} suurust, talitame järgmiselt. Kontrollhalsside mõõtmisandmetest saame sügavused z_{kj}, mis paiknevad põhihalssidevahelise ala teljel. Nende jaoks leiame sügavused $\overline{z}_{0j}$, kasutades lineaarset interpoleerimist sügavuste z_{aj} ja z_{bj} järgi, mis asuvad kontrollhalsi ja naaberpõhihalsside lõikepunktides a ja b.

$$\overline{z}_{0j} = \frac{1}{2}\left(z_{ai} + z_{bi}\right). \qquad (11.6)$$

Moodustame sügavuste $\overline{z}_{0j}$ ja z_{kj} vahed δ_j nii nagu valemi (11.1) puhul.

$$\left.\begin{aligned} &\overline{z}_{01} - z_{k1} = \delta_1; \\ &\overline{z}_{02} - z_{k2} = \delta_2; \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ &\overline{z}_{0n} - z_{kn} = \delta_n. \end{aligned}\right\} \qquad (11.7)$$

Sügavuste vahe keskmise ruuthälbe σ_e halssidevahelise ala telgjoonel saame

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{[\delta_j^2]}{n}}. \qquad (11.8)$$

Arvestades seda, et sügavuste vahed on antud juhul tingitud sügavuste $\overline{z}_{0j}$ ja z_{kj} vigadest ning interpoleerimisvigadest σ_{in}, võib keskmise ruuthälbe σ_e esitada kujul

$$\sigma_e^2 = \sigma_{\bar{z}}^2 + \sigma_k^2 + \sigma_{in}^2 \qquad (11.9)$$

Eeldame, et $\sigma_k = \sigma_0 = \sigma_a = \sigma_b = \sigma_z$. Arvestades valemit (11.6), saame sügavuse $\overline{z}_{0j}$ dispersiooniks (keskmise ruuthälbe ruuduks)

$$\sigma_{\bar{z}}^2 = \frac{1}{4}\left(\sigma_a^2 + \sigma_b^2\right) = \frac{1}{2}\sigma_z^2 \qquad (11.10)$$

Kasutades valemit (11.10), anname valemile (11.9) kuju

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2}\sigma_z^2 + \sigma_z^2 + \sigma_{in}^2;$$

$$\sigma_e^2 = \frac{3}{2}\sigma_z^2 + \sigma_{in}^2. \qquad (11.11)$$

Keskmise ruuthälbe σ_e suurus on teada valemi (11.8) põhjal, aga σ_z valemi (11.5) põhjal. Lahendades valemi (11.11) σ_{in} suhtes, saame

$$\sigma_{in} = \sqrt{\left|\frac{\left[\delta_j^2\right]}{n} - \frac{3}{2}\sigma_z^2\right|}. \qquad (11.12)$$

11.5.2. Mõõdistamise kvaliteedi näitajate hindamine

Eespool vaadeldud võte sügavuste võrdlemiseks põhi- ja kontrollhalssidel võimaldab saada statistilised hinnangud suurustele $\overline{\delta}$, σ_z, σ_{in}, mis iseloomustavad reljeefi mõõdistamise reaalset täpsust. Nende hinnnagute analüüs peab andma vastuse küsimusele, kuivõrd vastavad saadud näitajad eeskirjadele ja mõõdistamise konkreetsetele eesmärkidele.

Kuna tulemuste juhuslikud hälbed on vältimatud, tuleb otsustada, kas hälbed on lubatavad. Kui hälbed on lubamatult suured, tuleb otsida vigade allikaid ja elimineerida need.

Vaatleme statistilisi kriteeriume, mis võimaldavad otsustada mõõdistamise kvaliteedi üle.

1. Keskmise süstemaatilise jääkhälbe lubatavus määratakse mõõtmiste õigsuse alusel. Õigeteks mõõtmisteks tunnistatakse sellised, mille puhul keskmine süstemaatiline jääkhälve on oluliselt väiksem kui juhuslik keskmine ruuthälve, st parandid on õigesti määratud. Geodeesias kasutatakse näiteks järgmist suhet:

$$\bar{\delta} \le \frac{1}{5}\sigma . \qquad (11.13)$$

Keskmine süstemaatiline jääkhälve $\bar{\delta}$ annab hinnangu, mida on otstarbekas määrata enne teisi (σ_z, σ_{in}). Seetõttu tuleb leida avaldis selle vea hindamiseks, ilma et peaks tegema tunduvalt töömahukamat keskmise ruuthälbe σ arvutamist.

Tõenäosusteooria põhjal on mingi hälvete rea absoluutväärtuste aritmeetiline keskmine, mida nimetatakse keskmiseks hälbeks θ (hälbe mood), ja keskmine ruuthälve σ omavahel seotud järgmise suhtega:

$$\sigma = 1{,}253\ \theta. \qquad (11.14)$$

Asendades $\bar{\delta} = \frac{1}{n}[\Delta]$, $\upsilon = [|\Delta|]$ ja σ väärtuse valemist (11.13) valemisse (11.14), saame

$$|[\Delta]| \le 0{,}25[|\Delta|]. \qquad (11.15)$$

Niisiis ei tohi õigete mõõtmiste puhul sügavusvahede algebraline summa kontroll- ja põhihalsside lõikepunktides ületada veerandit (0,25) nende vahede absoluutsest summast. See väärtus (0,25) võetakse harilikult süstemaatiliste hälvete lubatavuse kriteeriumiks põhjareljeefi mõõdistamiskvaliteedi hindamisel. Kriteeriumi laialdane kasutamine tuleneb sellest, et arvutused on lihtsad ja praktiliselt küllaltki usaldatavad selliste kaksikmõõtmiste ridade jaoks, kus vahed Δ_i alluvad normaaljaotuse seadusele ning väljavõtud on suured.

2. Vastavalt kehtivale juhendile põhjareljeefi mõõdistamise kohta või tehnilisele ülesandele antakse ette sügavuse mõõtmise keskmise ruuthälbe lubatav väärtus, arvestades sealjuures ka asukoha määramise viga σ_{z_0} . Oletame, et sügavuste võrdlemisel valemi (11.5) järgi on saadud tegelik keskmine ruuthälve σ_z, mis veidi ületab lubatava väärtuse σ_{z_0} . Nüüd on vaja kindlaks teha erinevuse olulisuse aste. Selle ülesande võib lahendada valikulise ja hüpoteetilise ülddispersiooni võrdlemise teel. Nullhüpoteesina kasutatakse siinjuures tingimust, et vaadeldud sügavuste väljavõtu ülddispersioon σ_z^2 võrdub hüpoteetilise väärtusega $\sigma_{z_0}^2$. Konkureeriva hüpoteesina kasutatakse seost $\sigma_z^2 > \sigma_{z0}^2$.

Nullhüpoteesi kontrolli eksperimentaalseks kriteeriumiks on juhuslik väärtus

$$\chi^2 = \frac{(n-1)\sigma_z^2}{\sigma_{z0}^2}. \qquad (11.16)$$

Nullhüpotees loetakse tõestatuks juhul, kui $\chi^2 \le \chi^2_{kr}$, st kui $\chi^2 \le \chi^2_{kr}$, siis σ_z on veel lubatav. χ^2_{kr} (α, k) on jaotuse kriitiline punkt, mis valitakse χ^2-jaotuse tabelitest argumentide vabadusastme $k = n - 1$ ja **olulisuse nivoo** $\alpha = \frac{1-\beta}{2}$ järgi (β on tõenäosus), kusjuures hüdrograafias võetakse β võrdseks üldjuhul 0,95.

3. Kriteeriumiks, mis määrab sügavuse interpoleerimise keskmise ruutvea lubatavuse, on võrratus

$$\sigma_{in} \le \frac{1}{3}\sigma_z, \qquad (11.17)$$

kus σ_{in} on sügavuse interpoleerimise (samasügavusjoonte) keskmine ruuthälve, mis saadi valemiga (11.12); σ_z on sügavuse keskmine ruuthälve (põhja tasasuse mõõt) üldise kalde puudumisel. Viimase võib leida valemiga

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum (z_i - \bar{z})^2}{n-1}}, \qquad (11.18)$$

kus z_i on veekogu põhja mõõdetud sügavusarvud; $\bar{z}$ – keskmine sügavus.

Tingimus (11.17) on täidetud, kui halssidevahelised kaugused on valitud õigesti ja kaart kujutab reljeefi vajaliku usaldusväärsusega. Vastasel korral on tarvis tihendada loodimishalsse või sooritada lausmõõtmine.

Hinnates mõõdistamise kvaliteeti vaadeldud täpsusnäitajate ja statistiliste kriteeriumide abil, eeldatakse, et üksikute planšettide piirides on reljeef ühtlane ja ükski veaallikas ei domineeri. Reljeefi ebaühtlus avaldub põhjakallete gradientide oluliste erinevustena (gradiendi $\vec{g}_z$ moodul $g_z = \tan \alpha$). **Järelikult ei tule hinnata mitte tervet planšetti korraga, vaid selle üksikuid osi, kus kallete hajuvus on ühesugune.**

Olulised muutused sügavusmõõtmise vigade jaotuses tekivad ümardamisel. Seetõttu tehakse väljavõtud andmeridade (11.1) ja (11.7) koostamiseks enne ümardamist. Anomaalseid vahesid (Δ_i, δ_i) uuritakse jämedate vigade kriteeriumide järgi ja vajaduse korral jäetakse need kõrvale. Anomaaliate allikad tuleb aga välja selgitada.

Tihti esinevad anomaalsed sügavuste vahed Δ_i punktides, kus on anomaalsed gradiendid $\vec{g}_z$.

Arvutusnäide 11.1

Allolevas tabelis on mõõdetud sügavused põhihalssidel (z_0) ja samades punktides kontrollhalssidel (z_k). Samas tabelis on ka arvutatud sügavused (z_{0j}) halssidevahelise ala teljel (viimane rida) ja mõõdetud sügavused samades punktides kontrollhalsil (z_{kj}).

Arvuta: 1) sügavuste mõõtmise keskmine ruuthälve (KRH) σ_z; 2) sügavuste interpoleerimise KRH σ_{in}.

Hinda: 1) süstemaatiliste vigade olemasolu võrratuse abil; 2) võimalust, et lubatavat väärtust ületav KRH on siiski lubatav; 3) sügavuse interpoleerimise KRH lubatavust.

Tabel 11.1

z_0	20,3	19,8	20,1	19,6	18,8	17,5	17,0	16,8	16,4
z_k	20,9	19,6	20,3	19,3	18,3	17,5	17,3	16,4	15,8
z_{kj}		20,3	20,8	19,8	19,5	18,4	16,7	16,6	16,8
z_{0j}		20,05	20,45	19,85	19,20	18,15	17,25	16,90	16,60

Lahenduskäik:

1. Sügavuse mõõtmise KRH $\sigma_z = \sqrt{\frac{[\Delta^2]}{2n}} = \sqrt{\frac{1{,}39}{2 \times 9}} = 0{,}278 \text{ m} \cdot$

2. Sügavuste interpoleerimise KRH

$$\sigma_{in} = \sqrt{\left|\frac{[\delta^2]}{n} - \frac{3\sigma_z^2}{2}\right|} = \sqrt{\left|\frac{0{,}772}{8} - \frac{3 \times 0{,}278^2}{2}\right|} = 0{,}139 \; m \cdot$$

3. Hindame süstemaatiliste hälvete olemasolu

$|[\Delta]| = 0{,}9$; $[|\Delta|] = 3{,}1$; seega $|[\Delta]| > 0{,}25[|\Delta|]$ ja süstemaatilised hälbed on tõenäolised.

4. Leiame lubatava mõõtemääramatuse, arvestades, et mõõtmised toimuvad 1.a täpsusklassi järgi.

Keskmine sügavus (arvestame tabeli kolme esimest rida) on 480,6/26 = 18,48 m.

Lubatud mõõtmismääramatus $= \sqrt{a^2 + (b \times d)^2} = \sqrt{0{,}5^2 + (0{,}013 \times 18{,}48)^2} = 0{,}55$ m.

Lubatud KRH on 0,55/2 = 0,275 m.

5. Püstitame nullhüpoteesi, et tegelik mõõtmismääramatus ei ületa lubatud mõõtemääramatust.

Leiame nullhüpoteesi kontrolli eksperimentaalse kriteeriumi

$$\chi^2 = \frac{(n-1)m_z}{m_{z0}} = \frac{(9-1)0{,}278}{0{,}275} = 8{,}087 \cdot$$

Arvestades nullhüpoteesi tõenäosust (olulisuse nivoo) α = 0,05, leiame nullhüpoteesi kriitiliseks punktiks χ^2 (k=n-1; α/2) = 17,53.

Kuivõrd nullhüpoteesi kontrolli eksperimentaalne kriteerium 8,087 jääb alla nullhüpoteesi kriitilist punkti 17,53, võib eeldada, et mõõtmistäpsus on rahuldav.

6. Leiame sügavuse interpoleerimise keskmise ruuthälbe lubatavuse.

Leiame sügavuste keskmise ruuthälbe

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\Sigma(z_i - z_k)}{n-1}} = \sqrt{\frac{65{,}33}{26-1}} = 1{,}58 \text{ m} \cdot$$

Kuna interpoleerimise KRH 0,139 m (vt punkt 2) on väiksem kui $\frac{1}{3}\sigma_z$, siis võib interpoleerimise täpsust pidada rahuldavaks.

Viies osa

ERITÖÖD

12. MEREPÕHJA RELJEEFI AEROMÕÕDISTAMINE

12.1. Aerofotomõõdistamine

Kõik varem vaadeldud mõõdistamismeetodid võimaldavad saada sügavuste väärtusi ja koostada nende järgi merepõhja reljeefi graafilisi või arvmudeleid, kuid isegi nüüdisaegsete mitmekiireliste hüdroakustiliste seadmete puhul jääb saadud informatsioon põhimõtteliselt diskreetseks ning see loob võimaluse, et mingid väiksemad põhjareljeefi moodustised jäävad siiski vaatluse alt välja. Tuleb silmas pidada ka teist eelnimetatud meetodite puudust – mõõdistamise suhteliselt väikest kiirust ja seda eriti madalaveelistes akvatooriumides. Tulemuseks on hüdrograafiliste tööde madal tootlikkus ja suur maksumus.

Aerofotomõõdistamine kujutab endast juba tõelist lausmõõdistamist, mis annab maksimaalse hulga teavet objekti vormi ja mõõtmete kohta. Peale selle fikseeritakse igas kaadris situatsioon praktiliselt silmapilkselt. Kui seejuures arvestada, et aerofotomõõdistamine toimub kiiresti lendavatelt kandjatelt, siis on meetodi eelised silmanähtavad. Kahjuks on eeliste kõrval ka tõsiseid puudusi, millest alljärgnevalt.

Merepõhja aerofotomõõdistamisel levib valgus kahes erinevas keskkonnas – õhus ja vees, mistõttu kuivamaa-aerofotomõõdistamise meetodite otsene kasutamine on võimatu, sest veekiht moonutab oluliselt valguskiirte teed. Pealegi fikseerib optiline vastuvõtja vees asuva objekti ainult siis, kui selle heledus erineb ümbritseva tausta omast. Aerofotomõõdistamisel pildistatakse merepõhja filmile, mis peab olema eriti kontrastne, nii et oleks võimalik eristada objekti detaile.

Põhjareljeefi fotografeerimise eripära ja filmi järgneva töötlemise keerukuse tõttu on aerofotomeetodi kasutamisel terve rida probleeme, mis muudavad selle keeru-

kamaks. Kõige viljakamaks on osutunud reljeefi mõõdistamise ja aerofotomõõdistamise meetodite kombineerimine. Aerofotomeetodeid kasutatakse seejuures šelfi madalveealade üksikasjalikuks uurimiseks ja navigatsiooniohtude (karid, madalikud) väljaselgitamiseks. Navigatsiooniohtude tuvastamiseks soovitatakse kasutada ainult plaanilist aeromõõdistamist võimalikult suures mõõtkavas (nt 1:5000 või 1:2000) ja pärast ohu tuvastamist uurida seda näiteks kajatraaliga.

Aerofotode järgi saab sügavust määrata peamiselt kahel teel: fotomeetriliselt ja stereofotogramm-meetriliselt. Mõlema puhul peab märkima, et merevesi nõrgendab valgusvoogu tunduvalt ja seetõttu sügavuse kasvades väheneb objektide nähtav heledus kiiresti.

Fotomeetriline meetod põhineb negatiivi optilise tiheduse ja sügavusest oleneva põhjaala heleduse sõltuvusel.

Fotomeetrilise meetodi täpsus oleneb paljudest faktoritest, kusjuures mitmeid neist pole võimalik usaldatavalt leida ega arvesse võtta.

Põhilised fotomeetrilise meetodi vigade allikad on järgmised:
- merepõhja pinnase (värvuse) ebaühtlus;
- veetaimestik;
- reljeefi liigestatus;
- merevee hüdrooptiliste omaduste ebaühtlus;
- mere lainetus;
- aerofotode töötluse ebaühtlus;
- ligikaudsete sõltuvuste kasutamine parandite ja arvutusvalemite tuletamisel.

Kõigi nende puuduste tõttu kasutatakse fotomeetrilist meetodit tänapäeval harva.

Stereofotogramm-meetrilise meetodi puhul koostatakse aerofotodest moodustatud **stereopaaride**, st osaliselt kattuvate aerofotode järgi põhjareljeefi ruumilis-optiline mudel. Sellel sooritatakse mõõtmised, mis võimaldavad saada vastavate punktide plaanilisi koordinaate ning kõrgusi. Samas tuleb silmas pidada, et valguskiirte murdumisel vees tekivad täiendavad moonutused.

Mõõtmistulemuste töötlus sügavuste saamise eesmärgil on võimalik ainult juhul, kui igal stereopaaril on vähemalt neli tugipunkti, mille sügavused on teada. Selliste punktidena võib kasutada põhja kontuurpunkte, mille sügavused on mõõdetud kajaloodiga või teiste vahenditega, meremärke, rannajoone punkte või maapinnal tähistatud punkte.

Aerofotomõõdistamise eeskirjade rangel järgimisel ja hästi märgatavate kontuuridega põhja puhul saab stereofotogramm-meetria meetodil määrata sügavusi 5–20 m (olenevalt vee läbipaistvusest) täpsusega 0,3–0,5 m.

Üldjuhul on aerofotomeetodite täpsus madal ja usaldatavus väike ning neid kasutatakse valdavalt rannajoone asendi määramisel, samuti juhtudel, kus esmajärguline on kiire andmehõive, näiteks hüdrograafilise mõõdistamise kavandamisel ja rekognostseerimisel, madalate avastamisel või militaarotstarbel.

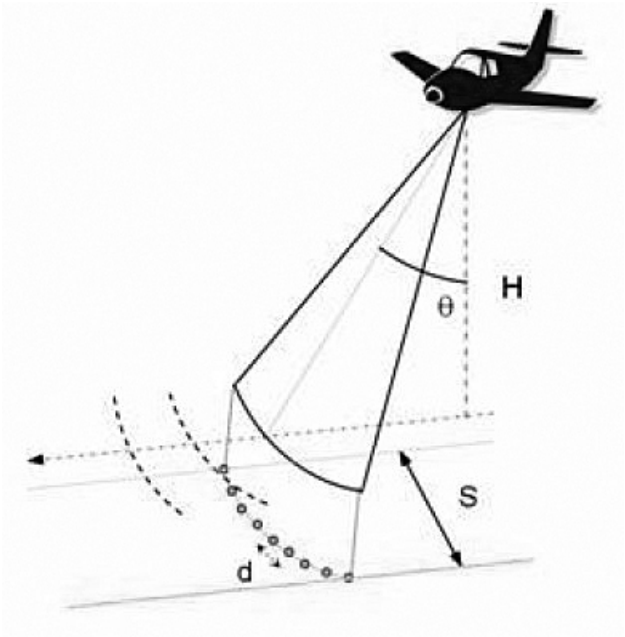
12.2. Aerolasersondeerimine

Aerolasersondeerimine (ALS) kujutab endast loodimist lennukilt skaneeriva laserkiire abil. Vaatleme seda joonisel 12.1.

Lennukist, mis lendab teatud kõrgusel *H* ja kiirusega *V*, kiiratakse kahesageduselised laserimpulsid, millest üks, infrapunane, peegeldub veepinnalt ja teine, roheline, läbib veekihi ja peegeldub põhjast. Impulsid skaneeritakse sektoris tipunurgaga φ, mis lennuki konstantse kõrguse puhul võimaldab mõõdistada riba laiusega $S = \frac{\varphi \times H}{\rho \times \cos\theta}$.

Skanner on enamasti suunatud loodjoonest nurga θ võrra ettepoole (kooniline skaneerimine). Saadud kõrguspunktide tihedus oleneb lennuki kiirusest *V*, skaneerimiskiirusest, lennu kõrgusest ja impulsside sagedusest. Kasutada võib ka vertikaalset skaneerimist. Sügavus arvutatakse kahe erineva sagedusega kiiratud impulsi saabumise ajavahe järgi, arvestades sealjuures kiire kaldenurki, refraktsiooni (nii õhus kui ka vees), murdumist kahe keskkonna piiril, lainetust, RTK GNSSi abil saadud lennuki kõrgust ja/või veetaseme parandit.

Kohamäärang peaks toimuma RTK GNSSi abil.



Joonis 12.1. Aerolasersondeerimine lennuki abil. *S* – skaneerimisriba laius; *d* – skaneerimise tihedus; *H* – lennu kõrgus; Θ – skaneerimisnurk [IHO, 2005, *correction to* 2011]

Aerolasersondeerimine on eriti sobiv navigatsiooniliselt ohtliku madalmere mõõdistamiseks, kusjuures selle täpsus on võrreldav kajaloodiga ja tootlikkus aerofotomõõdistamisega. Teisest küljest võib rannaäärne meri olla läbipaistmatu mudase põhjakihi ja bioloogiliste tegurite tõttu.

Lennukiirusel 35 m/s ja kõrgusel 300 m peaks saama 2 × 2 m sügavuspunktide võrgustiku, kusjuures tunniajalise lennuga kaetakse ala 18 km^2.

Heades tingimustes on sügavusmäärangu täpsus $\sigma_z = \pm 0{,}15$ m.

Ideaaltingimustes (lõunameredes) on mõõdetud sügavusi 50–70 m. Läänemeres on ulatus tunduvalt väiksem. Vee läbipaistvuse mõõduks on nn Secchi sügavus, mis määratakse Secchi kettaga.

Secchi ketas on valge või mustvalgete sektoritega ketas, mis lastakse nii sügavale, kuni vaatleja seda enam ei näe. Saadud sügavust nimetatakse Secchi sügavuseks. Ketast vaadeldakse nn pööratud periskoobiga. ALSi suurim kasutussügavus on 2...3 Secchi sügavust. Eesti vetes on ALSi kasutussügavus väike: Läänemeres 13 m, Soome lahes 8...10 m, Liivi lahes kõigest 4...6 m, Väinameres 3..5 m [Vahter, 2005], intensiivse vetikate vohamise korral vähemgi.

13. HÜDROGRAAFILINE TRAALIMINE

13.1. Hüdrograafilise traalimise eesmärgid ja vahendid

Eespool käsitletud merepõhja pinnamoe mõõdistamismeetodid, eriti aga loodimine, ei luba alati isegi suure üksikasjalikkuse korral kindlalt väita, et tööde piirkonnas on kõik navigatsiooniohud avastatud. Ainult eriline lausuurimine annab kindluse, et uuritud akvatooriumis võivad ohutult sõita kõik laevad, mille süvis on võrdne uurimissügavusega või sellest väiksem.

Hüdrograafilisi töid, mille eesmärgiks on navigatsiooniohtude väljaselgitamine ettenähtud sügavuseni kogu uuritava akvatooriumi ulatuses, nimetatakse hüdrograafiliseks traalimiseks. Seda tehakse nn hüdrograafiliste traalidega suure navigatsioonilise tähtsusega aladel.

Hüdrograafilise traalimise eesmärgid on järgmised:

- veenduda teatud süvisega aluste (**projektlaeva**) ohutu navigeerimise võimaluses vaadeldavas piirkonnas või laevateel;
- avastada kõik veealused kivid, madalad, kaljud ja teised navigatsiooniohud;
- teha kindlaks uuritava piirkonna või laevatee kõige väiksemad sügavused;
- kontrollida süvendustööde kvaliteeti.

Hüdrograafilised traalid jagunevad tööprintsiibilt kahte suurde rühma:

1) mehaanilised ja 2) hüdroakustilised traalid.

Mehaanilised traalid avastavad veealuse takistuse, kui traal selle vastu puutub. Takistuse puudumist näitab traali vaba liikumine rangelt jälgitavas sügavuses.

Hüdroakustilised traalid töötavad mitme kajaloodiga ja neid kasutatakse enamasti mõõdistamisel.

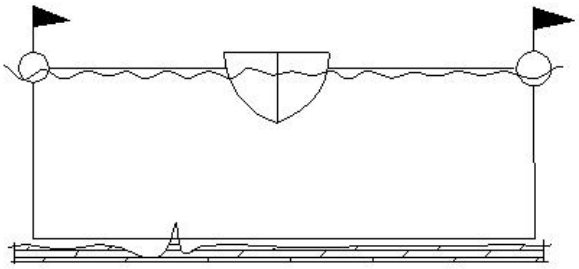
Mehaaniliste hüdrograafiliste traalide põhiosad on traal ja sügavusseadis. Traal on veealuste takistuste avastamiseks, sügavusseadis hoiab traali teatud sügavusel.

Mehaanilise traali tähtsaim omadus on tema tundlikkus, st traali võime reageerida traalimisügavuses asuvatele veealustele takistustele. Hüdrograafiliste mehaaniliste traalide tundlikkus oleneb nende jäikusastmest.

Jäikusastmete põhjal jaotatakse traalid jäikadeks (*bar sweep*), pooljäikadeks ja paindtraalideks (*wire sweep*).

Jäigad traalid (traalimissügavus kuni 12 m, traalimisriba laius kuni 30 m, sügavuses püsimise keskmine viga 0,15 m) kindlustavad suurima traalimistäpsuse ja seetõttu kasutatakse neid eriti tähtsate ja keeruka põhjareljeefiga akvatooriumide uurimiseks, kui seal liiguvad ka sellise süvisega laevad, millel jääb kiilu ja põhja vahele vaid õhuke veekiht. Jäikadel traalidel kujutab traaliv seade endast traali jäiga metallkonstruktsiooni – raami alumist (horisontaalset) poomi. Sügavusseadise abil võib tõsta või langetada vertikaalseid poome ja koos nendega ka alumist poomi.

Pooljäigaks traaliks (traalimissügavus kuni 30 m, traalimisriba laius kuni 30 m, sügavuses püsimise keskmine viga 0,25 m) nimetatakse konstruktsiooni, mille üks osa on jäik ja teine elastne, st enamasti alumine jäik poom on riputatud trossidega.



Joonis 13.1. Jäik traal. Kui traali alumine poom puudutab takistust, siis ujukite küljes olevad lipud kalduvad ja annavad märku takistusest

Paindtraalidel (traalimissügavus kuni 14 m, traalimisriba laius kuni 160 m, sügavuses püsimise keskmine viga kuni 1,0 m) on nii traal kui ka sügavusseadis valmistatud koormiste ning ujukitega varustatud metalltrossidest. Need traalid ei ole täpsed, kuid tootlikkus on suur ja seetõttu kasutatakse neid juhtudel, kus traalimist peab sooritama kiiresti, kuid täpsus ei ole eriti oluline (militaarotstarve).

Hüdrograafilisi mehaanilisi traale liigitatakse veel mitmeti:

- liikumisviisi järgi: traallaeva külge kinnitatud või pukseeritavad traalid (üksik- ja paaristraalid);
- traaliva aluse järgi: laeva-, kaatri- ja paaditraalid;
- tööpiirkonna järgi: mere- ja jõetraalid.

Kõigil neist on oma eelised ja puudused. Näiteks kindlustavad jäiktraalid veealuste ohtude leidmise suure usaldusväärsuse ning võimaldavad võrdlemisi täpselt hoida traali nõutavas sügavuses. Teiselt poolt ahendavad jäiktraalide väike laius (kuni 30 m) ja piiratud töösügavus nende kasutamisvõimalusi. Paindtraalidel on lai traal (kuni 160 m), kuid nõutava sügavuse hoidmise täpsus on väike.

Traalimiseks tuleb valida selline traal, mis kindlustab traalimisülesande kõige parema tulemuse antud konkreetsetes tingimustes nõutud täpsusega.

Hüdrograafilisel traalimisel on vaja jälgida järgmisi põhinõudeid:

1) kogu ettenähtud akvatooriumil tuleb teha lausuuring, mistõttu traalimishalsid rajatakse nii, et traalitavate naaberribade kattuvus tagaks kogu piirkonna lünkadeta läbiuurimise küllalt suure tõenäosusega;
2) traalitud piirkond on vaja üldjuhul plaaniliselt siduda geodeetilise põhivõrguga, milleks tuleb luua plaaniline alusvõrk;
3) traalimissügavus on vaja taandada ettenähtud nullsügavusele, mis tuleb tööde piirkonnas eelnevalt kindlaks määrata;

4) kogu traalitava akvatooriumi piires ei tohi ettenähtud nullsügavusest loetud sügavused olla väiksemad kui traalimissügavus.

Traalimishalsiks (ka traalimisliiniks**)** nimetatakse töötava traaliga hüdrograafialaeva ühes suunas läbitud teed. Ühel halsil läbiuuritavat pindala nimetatakse **traalimisribaks.** Mida täpsemini on traalimishalsid rajatud, seda väiksem peab olema naabertraalimisribade kattuvus tagamaks laustraalimise.

Traalimissügavuseks nimetatakse traali süvist, mis on taandatud ettenähtud nullsügavusele ja millest on lahutatud traali vajalikus sügavuses hoidmise täpsusest olenev parand.

Töökorralduselt jaguneb traalimine nagu teisedki hüdrograafilised tööd kolmeks põhietapiks: ettevalmistus, vahetu traalimine ja andmetöötlus.

Ettevalmistusetapil luuakse tööde plaaniline alusvõrk, valitakse traalid, seatakse need töökorda ja seejärel uuritakse nende töökindlust ning vastavust tehnilistele näitajatele, valmistatakse ette **traalimisplanšetid**, lahendatakse tasemevaatluste korraldamisega seotud küsimused.

Traalimise ajal uuritakse ettenähtud sügavusele seatud traalidega läbi kogu piirkond, liikudes mööda traalimishalsse, mis peavad kindlustama kogu akvatooriumi lünkadeta lausuuringu.

Kui traal puutub mingi takistuse vastu, tuleb laeva sõukruvi viivitamatult seisata, anda laeva peatumiseks tagasikäik ja heita sisse poi või tooder. Tähistuse asukoht määratakse ja kantakse planšetile, seejärel uuritakse võimaliku ohu laadi, tehakse kindlaks selle ulatus ja vähim sügavus. Vajaduse korral täpsustatakse andmeid tuukrite või akvalangistide kaasabil. Vähima sügavuse asukoht määratakse võimalikult täpselt ja kantakse planšetile.

Traalimisriba piirid kantakse planšetile halsijoone suhtes.

Traalitud ala piirid kantakse planšetile alles pärast seda, kui naaberribade kattumise kontroll näitab, et traalitud alale ei jää lünkasid, ja kohad, kus traal puutus vastu takistusi, on hoolikalt läbi uuritud ning leitud nende vähim sügavus. Traalitud ala kontuuritakse planšetil jämeda punase joonega.

Kontuuritud ala traalimissügavus loetakse võrdseks kogu traalimise jooksul määratud minimaalse sügavusega.

Pärast planšeti väljajoonestamist koostatakse tehniline aruanne, milles analüüsitakse üksikasjalikult tulemusi ja antakse tehtule omapoolne hinnang. AMSi ja DGPSi kasutamisel saadakse traalimisribade asendid reaalajas arvutiekraanil mis tahes mõõtkavas. Aruandlusplanšeti saab arvutiandmete väljatrükina.

Traalimisriba laius, s.t piiride vahekaugus risti halsijoonega, on traalide üks põhilisi iseloomustajaid ja antud traalimismeetodi usaldatavuse oluline näitaja.

Jäiktraalide traalimisriba laius võrdub traali laiusega (kui puudub triiv). Paindtraalide traalimisriba laius on väiksem traali laiusest ja oleneb kiirusest, pukseerimismeetodist ning traali konstruktsiooni iseärasustest.

Traalimise aruandeplanšetile kantakse ristkoordinaatide võrk Mercatori põiksilindrilises või Lambert-Est97 projektsioonis ning planšeti raamile tehakse geograafiliste koordinaatide märgistus. Raamide mõõtmed ja traalimisplanšettide planeering valitakse vastavalt piirkonna kujule ilma standardsete piiranguteta. Erinevalt mõõdistamisplanšettidest määratakse traalimisplanšettide omavaheline kohustuslik kattuvus naabertraalhalsside kohamäärangute täpsuse abil. Planšettide mõõtkavad valitakse nii, et traalimisriba laius planšetil oleks vähemalt 4 mm. Traalimise tööplanšetile kantakse kõik koormuselemendid niisama hoolikalt kui aruandeplanšetile.

Kursi rajamise hõlbustamiseks kantakse traalimisplanšetile või vähemalt selle raamile meridiaanide ja paralleelide võrk, kirjutatakse peale meridiaanide koonduvus (γ) ning arvutatakse suunad laevatee märkimiseks **kilomeetrivõrgu**[47] suhtes.

Halsijoone saamiseks planšetil ühendatakse kohamäärangu punktid sirglõikudega või loetakse halsijoon vastavaks laevasõiduks ettenähtud liitsihijoonele.

Traalimisriba kantakse planšetile halsijoone suhtes. Laeva külge kinnitatud jäikade traalide kasutamisel kantakse mõlemale poole halsijoont sellega risti lõik pikkusega

$$0{,}5R = 0{,}5L\cos TN\,, \qquad (13.1)$$

kus TN on triivinurk.

Pukseeritava traaliga traalimisel tuleb arvestada ka traali triivi puksiiri halsijoone suhtes. Sel juhul märgitakse risti puksiiri halsijoonega traali laiusega võrdne lõik, nii et lõigu keskpunkt oleks nihutatud triivi suunas suuruse

$$b = B\sin\beta \qquad (13.2)$$

võrra, kus b on traalimisriba keskme siire puksiiri halsijoone suhtes; B – kaugus kohamäärangu punktist puksiiril kuni traali keskpunktini, mis peilitakse traalimise ajal; β – nurk puksiiri halsijoone ja traali keskpunkti suuna vahel.

13.2. Traalimise plaaniline põhitamine

Ilma vahedeta ja lünkadeta saab kogu akvatooriumi lausuuringut sooritada ainult siis, kui on tehtud traalimise plaaniline põhitamine. See näeb ette plaanilise alusvõrgu rajamise (vajaduse korral), traalimise naaberhalsside vajaliku kattuvuse arvutuse ja halsside selliste rajamismeetodite valiku, mis võimaldavad tagada halsside arvutuslikku kattuvust. Vaatleme neid plaanilise põhitamise tähtsamaid osi üksikasjalikumalt.

[47] Kilomeetrivõrk – topograafilisele kaardile kantud ristkoordinaatide võrk, mille joonte koordinaadid erinevad üksteisest täiskilomeetri või selle kordse võrra (enamasti 1, 2, 5 või 10 km).

Plaaniline alusvõrk. Enne traalimist on vaja luua geodeetiline võrk, mis võimaldab nõutava täpsusega määrata traallaevade asukohta ja rajada traalhalsse.

Tänapäeval kasutatakse põhiliselt halsside rajamist DGPSi või kinemaatilise GPSi abil, kusjuures vastavad tugijaamad üldjuhul juba eksisteerivad.

Geodeetilise võrgu rajamise või tihendamise teisi meetodeid vaadeldi kolmandas ja viiendas peatükis.

Traalimise naaberribade kattuvuse arvutus. Kui traalimisribade planeeritud asukohti oleks võimalik looduses täpselt järgida, oleks kogu akvatooriumi laustraalimine tagatud isegi sel juhul, kui naaberribade servad üksteist ainult puudutavad.

Tegelikult tekib halsside rajamisel paratamatult vigu ja nii võivad servad ettenähtud asendist kõrvale kalduda, mis tekitab naaberribade vahel lünki ja osa alasid jääb traalimata. Seetõttu tuleb traalimisribad planeerida nii, et nende naaberservad asetuksid üksteise peale, moodustades teatud ulatusega kattuvuse ℓ_k. Ka sel juhul võib iga serv ettenähtud asendist kõrvale kalduda, kuid lüngad tekivad vaid siis, kui summaarne kõrvalekalle ületab suuruse ℓ_k. Järelikult akvatooriumi uurimispidevuse usaldatavuse määrab traalimishalsside rajamise vigade ja kattuvuse suhe.

Oletame, et kõrvalekalded halsist on juhuslikud ja alluvad normaaljaotuse seadusele. Tähistame traalimisribade T_1 ja T_2 summaarse keskmise ruuthälbe piki halsi ristjoont

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_{T_1}^2 + \sigma_{T_2}^2}\ . \tag{13.3}$$

Nendel tingimustel saab naaberribade pidevuse tõenäosuse leida normaaljaotuse jaotusfunktsioonist

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^{+t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \tag{13.4}$$

kus

$$t = \frac{\ell_k}{\sigma_T} \tag{13.5}$$

ja ℓ_k on halsside plaanitud kattuvus. Funktsiooni (13.4) väärtuse võib argumendi t järgi saada vastavatest tabelitest tõenäosusteooria ja matemaatilise statistika alases kirjanduses. Kasutame valemit (13.4) sellise kattuvuse väärtuse leidmiseks, mille puhul traalimishalsside teatud hälbe σ_T puhul oleks kindlustatud naaberribade pidevuse ettenähtud tõenäosus. Koostame pidevuse tõenäosuse P_P ja argumendi t sõltuvuse tabeli.

Tabel 13.1

t	0,1	0,4	0,7	1,0	2,0	2,5	3,0
P_P	0,080	0,311	0,516	0,683	0,955	0,988	0,997

Andes ette tõenäosuse P_P, leiame tabelist väärtuse t ja muudame valemit (13.5) vajaliku kattuvuse leidmiseks

$$\ell_k = t\sigma_T. \tag{13.6}$$

Traalimishalsside rajamise meetodid. Hüdrograafilisel traalimisel kasutatakse jaotistes 9.5 ja 9.6 vaadeldud halsside rajamise meetodeid.

Traalimishalsside rajamistäpsus määratakse summaarse veaga, mis sisaldab laeva kohamäärangu viga, laeva traalimishalsil hoidmise viga, graafilisi jt vigu.

Üldiselt oleks soovitatav rajada traalimishalsid DGPSi või kinemaatilise GPSi meetoditega, kasutades põhja-lõuna- või ida-läänesuunalisi halsse.

13.3. Traalimise kõrguslik põhitamine

Traalimissügavuse taandamiseks kindlaksmääratud nullsügavusele tuleb lahendada vähemalt kolm ülesannet:

1) määrata nullsügavuseks võetud loodpinna asend;
2) korraldada merepinna kõikumise pidevad vaatlused;
3) leida meetod traali pidevaks hoidmiseks ettenähtud traalimissügavusel.

Kahe esimese ülesande täitmine ei erine millegi poolest analoogilistest töödest merepõhja pinnamoe mõõdistamisel. Kolmanda ülesande lahendamine nõuab täiendavat uurimist.

Ettenähtud traalimissügavuseks z_0 nimetatakse vertikaalkaugust nullsügavuseks võetud veetasemest kuni horisondini, millel tuleb kindlaks teha veealuste ohtude olemaolu.

Selleks et traal püsiks pidevalt sellel horisondil, on vaja ilmselt muuta traali (kui seadise) sügavust (olenevalt põhjustest, mis tingivad traali asendi muutumise). Traalimise eesmärke arvestades ei tohi seadis kunagi sattuda nimetatud horisondist kõrgemale, mis tähendaks traalimissügavuse tegelikku vähenemist.

Ettenähtud sügavusele seatud traal võib kavatsetud horisondist kõrgemale või madalamale sattuda peamiselt kolmel põhjusel:

- traali konstruktsiooni puuduste tõttu;
- hüdrometeoroloogiliste faktorite (tuul, lainetus) mõjul;
- meretaseme muutumise tõttu.

Traali kindlas sügavuses püsimise täpsus määratakse olenevalt traali tehnilistest omadustest katsetega ja seda iseloomustatakse keskmise ruuthälbega σ_{T0}. See viga kantakse traali passi ja näidatakse tehnilises kirjelduses.

Hüdrometeoroloogiliste tegurite mõju sügavuses püsimise täpsusele oleneb mere olukorrast ja lainetuse suunast traalimishalsi suhtes, traalisüsteemist, traali laevaga ühendamise meetodist ning laeva tehnilistest andmetest. Vastav keskmine ruuthälve σ_{HM} määratakse vahetult tööde piirkonnas.

Kahest nimetatud põhjusest tingitud summaarne keskmine ruuthälve leitakse valemiga

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{T0}^2 + \sigma_{HM}^2} \ . \tag{13.7}$$

Suurendamaks tõenäosust, mis iseloomustab traali süvise z püsimist ettenähtud traalimissügavuse väärtusel z_0, tuleb suurendada traali süvist suuruse νz võrra, mis võrdub vähemalt σ_z kahekordse väärtusega, st

$$\left.\begin{aligned} \nu z &= 2\sigma_z \\ z &= z_0 + \nu z \end{aligned}\right\}. \tag{13.8}$$

Tunduvalt raskem on arvestada meretaseme kõikumisi. Kui meretase kõigub ja traali süvis on muutumatu, siis näiteks taseme tõusmise puhul traalitakse vastavat piirkonda ettenähtust väiksemal sügavusel.

Tähistame meretaseme kõikumisest põhjustatud parandi νz_f ja meenutame, et seda arvutatakse nullsügavuse n ja hetketaseme f vahena (4.41)

$$\nu z_f = n - f.$$

Loomulik oleks parandada traali süvist νz_f arvel ja tagada sellega traali püsimine ettenähtud sügavusel. Et aga hetketase pidevalt muutub, tuleks pidevalt muuta ka traali süvist. Praegu seda veel ei suudeta ja seetõttu võetakse parandit νz_f arvesse teatud ajavahemiku järel, viies traali uuele sügavusele.

Kui veetase tõuseb, siis vältimaks traalimise sügavuse muutumist ettenähtust väiksemaks, valitakse parand νz_f mitte käesolevast, vaid traali järgmise ümberseadmise hetke tõenäolisest veetasemest lähtudes. Sel juhul arvestatakse peale hetketaseme kõrguse veel ka taseme muutu δz aja jooksul, mis kulub kuni järgmise ümberseadmiseni. Veetaseme alanedes muutu δz traalide sügavusele ei lisata, vaid seda kasutatakse üksnes traali uuele sügavusele viimise aja määramiseks.

Loodetega meredel määratakse lubatav muut δz, lähtudes sügavusvarust traali all antud traalimissügavuse puhul, aga ka tõusu kõrgusest, hetketaseme muutumise kiirusest, laeva ühel halsil liikumise ja traali ümberseadmise ajast.

Kõige lihtsam on traali uuele sügavusele seadmise hetk leida traalimispiirkonna tasemevaatluspostide andmete põhjal koostatud tasemekõikumise päevagraafikute abil. Joonestades tasememuutumise kõvera ja tõmmates graafikule nullsügavuste lugemile vastava joone, leitakse δz lubatava väärtuse alusel traali ümberseadmise hetked.

Traalimisel jälgitakse tegelikku veetaset, tehakse kindlaks muutuse iseloom ja valitud hetkedel muudetakse traali sügavust z, arvutades uue sügavuse järgmiste valemite abil.

– Veetaseme tõusmise perioodil kasutatakse valemit

$$z = z_0 + \nu z - \nu z_f + \delta z, \qquad (13.9)$$

– taseme alanemise perioodil aga

$$z = z_0 + \nu z - \nu z_f. \qquad (13.10)$$

Loodeteta meredel sooritatakse ümberseadmine uuele sügavusele 0,1-meetrise tasememuutuse puhul.

13.4. Oletatavate navigatsiooniohtude otsimine

Oletatavateks navigatsiooniohtudeks nimetatakse mitmesuguseid veealuseid objekte, mille asend või olemasolu ei ole kindel, kuid mida tuleb arvestada võimalike ohtudena laevasõidul antud piirkonnas. Selle rühma moodustavad ohud, mis on kantud kaardile kontrollimata info põhjal.

Siia hulka kuuluvad ebaharilikud sügavused, leetseljakud,[48] madalad, veealused kivid ja kaljud, hukkunud laevad ja pontoonid, hüdrotehniliste ehitiste varemed.

Ebaharilikeks sügavusteks peetakse üldjuhul selliseid, mis on ümbritsevatest sügavustest väiksemad:

- vahemikus 3 kuni 10 m üle 0,9 m;
- vahemikus 10 kuni 20 m üle 1,5 m;
- vahemikus 20 kuni 30 m üle 2,5 m;
- vahemikus 30 kuni 50 m peetakse ebaharilikeks sügavusteks selliseid, mis on tasasel alal ümbritsevatest sügavustest 10% väiksemad, künklikel aladel 20% väiksemad ja tugevalt liigestatud reljeefi korral ümbritsevatest sügavustest 30% väiksemad [ПГС № 4, 1984].

Oletatava navigatsiooniohu otsingule peab eelnema selle ohu kaardile kandmise ajaloo tundmaõppimine. Sel eesmärgil analüüsitakse kõiki kartograafilisi ja kirjeldavaid materjale, mis on olemas oletatava ohupiirkonna kohta, loodimise ja traali-

[48] Leetseljakuks nimetatakse enamasti rannameres esinevat rannaga paralleelset veealust liivavalli.

mise planšette ning arhiivimaterjale. Ohud avastanud laevade vahipäevikute alusel taastatakse nende liikumistee ja hinnatakse koordinaatide määramise ligikaudset täpsust. Selline analüüs võimaldab määrata otsingute piirkonna optimaalsed mõõtmed ja valida vastava uuringumeetodi.

Uuringuala määramisel võetakse lähteandmeteks ohu teatatud koordinaadid ja nende koordinaatide tõenäoline viga. Uuringute keskmeks saab teada antud koordinaatidega punkt, aga otsingupiirkonnaks üldjuhul ruut, mille küljed saadakse valemiga

$$S = 4\sqrt{\sigma^2 + \sigma_0^2}\,, \qquad (13.11)$$

kus σ on oletatava objekti koordinaatide keskmine ruuthälve; σ_0 – kohamäärangu keskmine ruuthälve objekti otsingul (tänapäeval on selle väärtus üldjuhul tühine).

Oletatava objekti koordinaatide keskmise ruuthälbe arvutamine oleneb sellest, kuidas on koordinaadid määratud. Siinkohal on kolm varianti:

1) koordinaadid on määratud mingi tuntud meetodiga ja on olemas andmed navigatsiooniparameetrite mõõtmistäpsuse kohta;
2) objekti koordinaadid on määratud pidevarvutuste[49] abil;
3) säilinud materjalid võimaldavad koordinaate ainult ligikaudselt hinnata.

Esimesel juhul arvutatakse keskmine ruuthälve σ viiendas peatükis kirjeldatud viisil.

Teine ja kolmas võimalus esinevad tänapäeval väga harva ja seetõttu neid siinkohal ei käsitleta. Vajaduse korral võib neid probleeme vaadelda (Laigna, Kala, 1994) jaotistes 14.4; 12.3; 12.4.

Otsingute all mõeldakse hüdrograafilisi töid, mis võimaldavad kindlaks teha, kas vaadeldavas piirkonnas asub oletatav objekt või mitte. Olenevalt otsingupiirkonna suurusest, merepõhja pinnamoest, mere sügavusest, ranna kaugusest ja objekti tõenäolistest mõõtmetest võivad otsingud toimuda loodimise, hüdrograafilise traalimise, tuukriuuringute, pindala lausuurimisega mitmekiireliste hüdroakustiliste seadmete või suuremõõtkavalise plaanilise aerofotomõõdistamise abil. Väiksemõõtmelisi navigatsiooniohte tuleks uurida ülekattega halssidega vastavalt S-44 eritäpsusklassi nõuetele. Esmased madalate uuringud võib teha hõredamate halssidega. Suurematel aladel võib uuringuid teha kombineeritult, st esmalt aerofotomõõdistamise teel ja seejärel täpsustavalt mõne teise meetodiga, mille täpsus valitakse S-44 järgi vastavalt ala sügavusele ja navigatsioonilisele tähtsusele.

[49] Pidevarvutus – ajalooline kohamäärangu meetod, kus laevatee lõigud kantakse järjestikku kaardile kompassiga määratud kursi, logiga määratud kiiruse ja kronomeetriga määratud aja järgi. Vajaduse korral kasutatakse hoovuse, tuule mõju jm parandeid.

14. MEREPÕHJA PINNASE MÕÕDISTAMINE

14.1. Merepõhja pinnaste iseloomustus ja liigitus

14.1.1. Üldmõisted

Merepõhja pinnaseks nimetatakse iga looduslikku materjali, mis moodustab ookeanide ja merede põhja pinnase.

Merepõhja pinnase omadused mõjutavad oluliselt laevasõiduohutust. Andmeid pinnaste kohta kasutatakse navigatsiooni- ja spetsiaalsete merekaartide koostamisel. Peale selle vajatakse neid andmeid hüdrotehniliste ehitiste rajamisel jms majandusülesannete lahendamisel.

Hüdrograafilisi töid, mida tehakse merepõhja pinnase iseloomu ja jaotuse uurimisel, nimetatakse **merepõhja pinnase mõõdistamiseks.**

Tänapäeval käsitatakse pinnasena neid looduslikke materjale, mis moodustavad merepõhja pealmise kihi. Järelikult võivad merepõhja pinnases olla aluspõhjakivimid, kobeda materjali kuhjumised, elusorganismide jäänused vms.

Mitmesuguse koosseisu ja päritoluga tahkete osakeste settimise tagajärjel moodustunud litosfääri ülemist osa nimetatakse meresetteteks ehk merepõhja settekivimiteks.

Settekivimite ladestuses eristatakse mitut kihti: **pärispinnas** (ülemine kiht), vähetihenenud, tihenenud ja tugevasti tihenenud kiht. Seejuures pärispinnase paksus ei ületa 50 m, samas kui kõigi meresetete keskmine paksus ulatub kuni 3 km.

Niisugune pinnasekihtideks jaotamine põhineb tiheduse muutumisel, millega kaasneb helikiiruse märgatav muutus pinnases. See võimaldab üksikute kihtide eraldus-pindu enam-vähem täpselt kindlaks teha akustilise aparatuuri abil.

Pärispinnast tuleb eristada veel teistelgi põhjustel: sel kihil on oma spetsiifilised omadused ja eriline tähtsus meresõidu ja hüdrograafiliste rajatiste jaoks ning seda on võimalik vahetult tundma õppida.

Meresõidu areng ja ookeanipõhja kasvav tähtsus majanduses nõuab loomulikult ka sügavamate settekivimikihtide tundmaõppimist. Seetõttu ei piirdu hüdrograafilised uuringud ainult merepõhja pinnasega. Moodne aparatuur võimaldab määrata süvakihtide liigestust ja isegi ainelist koostist, mis pakub nii teaduslikku kui ka praktilist huvi meregeoloogiale ning -geofüüsikale.

14.1.2. Merepõhja pinnaste iseloomustus

Põhilise osa merepõhja pinnastest moodustavad nüüdisaegsed kobedad või tahked settekivimid. Vanad aluspõhjakivimid väljuvad ookeanipõhja pinnale tunduvalt harvemini, valdavalt järskude nõlvade ja tugevate põhjahoovuste aladel.

Nüüdisaegsed põhjasetted jaotatakse olenevalt nende päritolust nelja rühma: terrigeensed, vulkaanilised, biogeensed ja kemogeensed.

Terrigeensed setted moodustuvad kas abrasiooniprotsessides, mis lagundavad merepõhja või ranna koostisesse kuuluvaid aluspõhjakivimeid, või kannavad neid mandrilt ookeanisse jõed. Loomulikult jäävad suuremad kivimitükid ranna vahetusse lähedusse, aga rannast kaugenedes settivad üha väiksemad osakesed. Terrigeenseid meresetteid leidub valdavalt mandrilava piires, seega on nad madalmeresetted.

Vulkaanilised setted moodustuvad vulkaanipursetel väljapaiskuvatest süvakivimitükkidest. Peenosakesed satuvad esialgu atmosfääri ja langevad siis ookeani, levides väga ulatuslikul alal. Osa vulkaanilisest ainest muutub keemiliste protsesside mõjul, moodustades polügeenseid setteid. Nii näiteks tekib nn punane savi. Tervikuna on aga vulkaaniliste setete osatähtsus ookeanis tühine. Umbes 75% maailmamere põhjast katavad süvameresetted, mille hulgas on peamiselt biogeensed ja kemogeensed setted.

Biogeensed setted koosnevad mitmesuguste mereorganismide skelettidest, rüüdest või karpidest, mis pole settimise ajal lagunenud ega lahustunud.

Olenevalt valdavast organismide tüübist setetes eristatakse globigeriin-, diatomee-, radiolaar- ja pteropoodmuda.

Kemogeensed setted on moodustunud merevees mitmesuguste ainete heljumis ja lahustes toimunud keemiliste protsesside tulemusena. Kõige tuntumad on rauamangaanikonkretsioonide setted, mis katavad suurt osa Vaikse ookeani põhjast, eriti selle kirdeosas, kuid neid leidub mujalgi, sh ka Läänemeres.

Merepõhja pinnase üldiseloomustuse lõpetuseks pöörame tähelepanu meresetete leviku mõningatele seaduspärasustele.

Nimelt on tõestatud põhjapinnase ja kliimatingimuste seos. Veel järjekindlamalt ilmneb setete seotus kaugusega mandrist: kauguse suurenedes vahetuvad terrigeensed setted lubimudadega, viimased aga punaste süvameresavidega.

Sügavuse suurenedes peente osakeste osatähtsus kasvab ja nende koostis muutub.

Tähtis pinnasejaotuse seaduspärasus on seotud pinnamoega. Eelkõige ilmneb pinnavormide mõju pinnase granulomeetrilises koostises: pinnaseosakeste mõõtmed vähenevad sügavuse suurenedes, suurenevad kõrgendikel ja kahanevad nõgudes. Püsivad hoovused või lainetus soodustavad ühes kohas settekivimite kogunemist ja teises kohas nende ärauhtmist. Pinnasejaotus oleneb suuresti põhja kaldest. Setted omakorda mõjutavad reljeefi, kattes aluspõhja endogeensete vormide ebatasasusi, mille tulemusena moodustuvad lamedad või künklikud abüssaaltasandikud, mandrinõlva kaldtasandikud ja jalamid.

14.1.3. Merepõhja pinnaste liigitus omaduste järgi

Eelnev lühike setete iseloomustus põhines valdavalt geneetilisel printsiibil. Meresõitjaid ei huvita aga mitte pinnase päritolu, vaid selle omadused: kõvadus, konsistents, plastsus, sitkus, osakeste mõõtmed, värvus jne.

Merekaartide jaoks on osutunud kõige sobivamaks nn pinnaste dünaamiline liigitus, mis lähtub pinnaseosakeste läbimõõdust, st pinnase mehaanilisest (granulomeetrilisest) koostisest.

Granulomeetrilise koostise järgi jaotatakse pinnased (IHO Manual, 2005, kaldkirjas sulgudes on sümbolid):

- kaljupinnas (*R*): kaljumassiiv või rahnud ∅ > 256 mm;
- jämepurdpinnas: munakad (*ℓG*) ∅ 64...256 mm; veerised (*P*) ∅ 4...64 mm; rähk, kruus (*smG*) ∅ 2...4 mm;
- liivpinnas: jämeliiv (kruusliiv/jämeliiv *cS*) ∅ 0,5...2 mm; keskliiv (*mS*) ∅ 0,25...0,50 mm; peenliivad (peenliiv/tolmne liiv *fS*) ∅ 0,063...0,250 mm;
- mudad (savipinnas) *M* : mudad ∅ 0,002...0,063 mm; savid ∅ < 0,002 mm.

Peeneteralisemaid liike on välitingimustes raske eristada, siiski kui on raske näppusid sellest ainest puhtaks hõõruda, on tegemist saviga, aga kui on kerge, siis on see muda.

Liigituse aluseks on ka pinnaste aineline koostis (jaotus tekke, veekindluse ja tugevuse järgi, mida siinkohal ei vaadelda).

14.2. Merepõhja pinnase mõõdistamise meetodid

Merepõhja pinnase mõõdistamiseks kasutatakse nii otseseid kui ka kaudseid meetodeid.

Otseste meetodite puhul vajatakse mitmesuguseid mehaanilisi abivahendeid, mida nimetatakse pinnaseammutamise seadmeteks.

Vastavate seadmetega võetakse merepõhjast pinnaseproove, et igakülgselt uurida nende omadusi. Proovide võtmine teatud vahemaade järel ei anna aga täielikku pilti pinnaste jaotumisest veekogu põhjas ja seetõttu vajatakse lisaandmeid. Pealegi saab seadmetega proove võtta vaid ülemisest pinnasekihist.

Nimetatud puudused kompenseeritakse teatud määral kaudsete uurimismeetoditega. Need põhinevad pinnase mingite parameetrite ja tehislike või looduslike väljade vastastikusel mõjul.

Merepõhja pinnase mõõdistamise kaudsete meetodite hulka võib lugeda allveefotomõõdistamise, allveetelevisiooni ning akustilised ja geofüüsikalised meetodid.

Merepõhja pinnase mõõdistamisel saadakse teavet pinnaste ja nende leviku kohta. Siinkohal eristatakse üld-, üksikasjalikku (põhjalik) ja detailset mõõdistamist.

Üldmõõdistamine on ette nähtud pinnaste jaotuse üldise iseloomu väljaselgitamiseks maailmameres.

Üksikasjaliku mõõdistamise põhieesmärk on õppida tundma merede ja ookeanide üksikute piirkondade pinnast ja välja selgitada ühesuguse pinnasega alad.

Detailmõõdistamine toimub väikestel akvatooriumidel pinnase igakülgse iseloomustuse saamiseks konkreetsete rakendusülesannete lahendamiseks.

Iga nimetatud pinnasemõõdistamise eesmärki aitab täita tehnoloogiat kujundavate elementide ühtsus. Tehnoloogilise skeemi põhikoostisosad on järgmised:

- mõõdistamise eesmärk (pinnaste määratavad näitajad);
- mõõdistamismeetodid;
- mõõdistamise tehnilised vahendid;
- mõõdistamise üksikasjalikkus;
- koordinaatide määramise meetodid.

Tavaliselt sooritatakse pinnase mõõdistamine koos teiste hüdrograafiliste töödega, seetõttu on koordinaatide määramise meetodid sarnased peatükkides 5.–11. vaadeldud meetoditega.

Kirjeldame lühidalt tehnoloogilise skeemi elemente.

Akvatooriumi süstemaatilisel uurimisel püütakse saada järgmisi põhjapinnast iseloomustavaid näitajaid: kihistumine, pinnase tüüp, värvus, konsistents, aineline koostis, suletised, granulomeetriline koostis, mahumass ja tihedus, looduslik niiskusesisaldus, poorsus, plastsusarv.

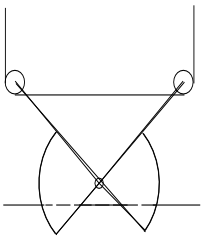
Vastavalt sellele valitakse mõõdistamismeetodid ja tehnilised vahendid.

Detailmõõdistamisel võetakse vahetult pinnaseproove ja uuritakse merepõhja tuukrite ja allveefotografeerimise abil.

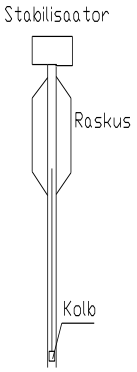
Pinnaseproove saadakse pinnasejaamades, mille võrk planeeritakse seismoakustilise profileerimise tulemuste või eelnevalt olemasolevate andmete alusel.

Pinnasejaamaks nimetatakse geograafilist punkti meres (ookeanis), milles võetakse põhjapinnase proove.

Proovide võtmiseks kasutatakse mitmesuguseid pinnase ammutamise seadmeid (vt ka joon. 14.1 ja 14.2).



Joonis 14.1. Suuremate sügavuste puhul kasutatav **põhjakopp**, mille poolmed lõikuvad põhjapinnasesse 0,4–1,0 m sügavuseni ja tõstmisel sulguvad



Joonis 14.2. Kolb-proovivõttur süvistatakse pinnasesse esmalt raskusjõu mõjul ja täiendav süvistus toimub vaakumi mõjul, mis tekib, kui kolb tõmmatakse trossi abil üles. Puursüdamiku tihenemist ei toimu

Pinnaseproovi võtmisel kuni 5 m sügavuses kasutatakse **käsisondi** või **väikest koppa**.

Proovivõttureid kasutatakse suurematel sügavustel ja nende pikkus võib ulatuda kümnete meetriteni. Kasutusel on peamiselt järgmised liigid:

- kolb-proovivõttur (joon. 14.2);
- löökproovivõttur, mis sarnaneb kolb-proovivõtturiga, kuid on kolvita ja selle puuduseks on pinnaseproovi tihenemine;
- hüdrostaatiline proovivõttur, mis on võrdlemisi keeruka konstruktsiooniga ja millega võib saada kuni 35 m pikkuseid rikkumata struktuuriga proove;
- vibroproovivõtturid;
- keerdproovivõtturid, mida kasutatakse kõvades kivimites ja mis vajavad tööks platvorme.

Pinnase ammutamiseks ulatuslikuma ala ülemisest pinnasekihist kasutatakse **draagi**, mis kujutab endast õhukeste teraslehtedega kaetud jäika metallraami. Selleks (draagimiseks) pukseeritakse parda taha heidetud draagi väikese kiirusega.

Proove saab võtta ka mehitatud või kaugjuhtimisega süvaveeaparatuuri abil, mis on varustatud vastavate manipulaatoritega.

Tuukrid ja akvalangistid, kes töötavad sügavustel kuni 20 või isegi 25 meetrit, võtavad vahetult proove ja pildistavad merepõhja. Proovid võetakse pinnase iseloomu muutumiskohtades pinnasesse löödud torude abil.

Pinnase mõõdistamise kaudsed meetodid

Pinnase helipeegeldusvõime ja helitugevuse hajumine põhjakonarustel oleneb pinnasest. Akustiliste meetodite puhul tuntakse kajaloodiga ühendatud elektronostsillograafi ekraanil erinevad pinnased ära põhjast peegeldunud impulsi kuju järgi, võrreldes seda etalonimpulssidega. Viimased saadakse teadaoleva põhjapinnasega alade uurimisel. Pinnase täpne määramine on siiski raskendatud, sest paljud faktorid (kajaloodi parameetrid, põhja geoloogiline ehitus, merevee tihedus) ei allu täielikult arvestustele või muutuvad pidevalt. Kasutatakse ka suunatud plahvatusi või plahvatusetaolisi impulsse, mille lainete peegeldusi uuritakse seismograafidega.

Seismoakustilist profileerimist (**akustilist geolokatsiooni)** kasutatakse üldmõõdistamisel madalsagedusega kajaloodide (4...7 kHz) ja nn õhukahuritega (20...2000 Hz), see kaasneb pinnaseproovide võtmisega profiilide iseloomulikes kohtades. Näiteks firma Kongsberg on ühendanud kajaloodi põhjapinnase profileerijaga, mille töösagedus on 2,5...6,5 kHz. Seismoakustiline profileerimine sooritatakse harilikult koos loodimisega. Kajagrammilt loetavate tulemuste alusel märgitakse ära iseloomulikud punktid (aluskivimite murrukohad), millest seejärel võetakse pinnaseproove.

Üksikasjaliku mõõdistamise korral kasutatakse seismoakustilise profileerimise tulemusi, mis on saadud üldmõõdistamisel, või nähakse ette uus profiilide süsteem. Põhilised tööd pinnase uurimisel sooritatakse proovide võtmisega.

Seismomeetria põhimõte on ligikaudu sama, kuid siin kasutatakse sügavusse suunatud plahvatusi merepõhjas. Osa plahvatuse energiast peegeldub merepõhja pinnalt, osa aga tungib põhjapinnasesse. Plahvatusesarnast lööklainet võib tekitada ka näiteks elektrohüdraulilise hüdrolokaatoriga. Erineva tihedusega kihtide piiril tekib sekundaarne peegeldumine ja kui energia on küllaldane, siis osa impulsist tungib edasi. Erinevalt seismoakustilisest profileerimisest registreeritakse kõik peegeldunud impulsid seismograafidega vastavalt nende saabumisele, mis võimaldab esitada settekivimite kihistuse. Pinnaste tõeline iseloom leitakse otseste meetoditega.

Pinnasemõõdistamise üksikasjalikkuse määrab pinnasejaamade või seismoakustilise profileerimise halsside vahekaugus, mis omakorda oleneb mõõdistamise eesmärgist, aga ka piirkonna uuritusest, sügavusest ja reljeefi liigestatusest.

Väga tähtis on välja selgitada ühetaolise pinnasega alad. Järelikult on pinnasejaamade võrgu planeerimisel tarvis arvestada põhjareljeefi ja seda kujundavaid tegureid.

Pinnasejaama asukoht planeeritakse nii, et saaks uurida kõiki põhjareljeefi iseloomulikke koostisosi (tasandeid, nõlvu, orge, künkaid). Kindlasti peab tundma pinnase iseloomu kõikide navigatsiooniohtude lähikonnas, aga ka rajatavate vesiehitiste piirkonnas. Ühetaolise pinnase ja reljeefiga aladel võetakse navigatsioonilise otstarbega uuringutel jaamade vahekauguseks kümnekordne mõõdistushalsside vahekaugus, vesiehitiste uuringuil toimitakse aga vastavalt projekti nõuetele.

Pinnaseproovide töötlus uurimislaeval. Pinnaseproovide võtmine uurimislaeval koosneb pinnase kirjeldusest, niiske proovi ja näidiste võtmisest laboratoorseks analüüsiks.

Pinnase kirjeldus tehakse kohe pärast proovivõtuseadmete laevatekile tõstmist, et proov ei jõuaks atmosfääritingimustes muuta oma iseloomulikku värvust. Kirjelduses peavad olema järgmised andmed:

- puursüdamiku üldine pikkus ja üksikute kihtide pikkused;
- pinnase granulomeetriline tüüp (terade suuruse järgi);
- pinnase värvus;
- konsistents ja orgaaniliste või teiste suletiste olemasolu;
- ligikaudne aineline koostis.

Rahnude, veeriste ja kruusa mõõtmed määratakse joonlaua abil. Värvus määratakse võrdlemisel spetsiaalse skaalaga.

Konsistentsi all mõistetakse pinnase pehmuse astet. Uurimislaeval määratakse see visuaalselt või kombates. Laialivoolav pinnas on vedel; poolvedel valgub laiali, kuid ei voola; pehme pinnas ei valgu laiali, kuid sellesse on kerge sõrme sisse suruda; väga tihe on pinnas, millesse sõrme sisse suruda ei saa; sitke on pinnas, mis jääb sõrmede külge või kleepub tugevasti noa külge.

Suletised on üksikud kivimitükid, mille mõõtmed on tunduvalt suuremad kui pinnase põhikoostisosadel, aga ka pinnases esinevad loomade või taimede jäänused. Suletisteks võivad olla näiteks veerised, killustik, kruus, pimsskivitükid, konkretsioonid, puidujäänused, mereorganismide skeletid.

Pinnase tekstuuri, st ehituse iseärasusi iseloomustatakse peale sõnalise kirjeduse veel jooniste ja fotode abil, näidates sealjuures mõõtkava (nt joonlaud fotol).

Jämedateraliste pinnaste aineline koostis määratakse uurimislaeval visuaalselt. Peeneteraliste sidusate setete koostis tehakse kindlaks preparaatide mikroskoopilisel analüüsil.

Pärast proovide kirjeldamist võetakse laboratoorseks analüüsiks igast kihist üks näidis mahuga vähemalt 0,5 l, pakitakse kilekotti ja kleebitakse peale vastav etikett.

Uurimislaevadel tehtava esmatöötluse andmed kantakse tööplanšettidele. Planšettide mõõtkava peab olema selline, et kaugused jaamade vahel planšetil oleksid vähemalt 2 cm. Planšettidele kantakse pinnasejaamad ja märgitakse põhjapinnaste karakteristikud spetsiaalsete lühenditega (vt alajaotis 14.1) ning samuti nende levikupiirid.

15. JÕEPÕHJA RELJEEFI MÕÕDISTAMINE

15.1. Jõgede morfoloogilised iseärasused

Jõgede hüdrograafilise uurimise eesmärgid on üldjoontes samasugused kui merede uurimisel. Ka siin on kõige töömahukam operatsioon jõepõhja reljeefi mõõdistamine. Vaatamata jõe ja mere mõõdistamise ühesugustele eesmärkidele, tingivad jõgede põhjareljeefi ja hüdroloogilise režiimi iseärasused spetsiifiliste joonte lisandumise nende hüdrograafiliste tööde metoodikasse.

Peatume esmalt jõgede morfoloogilistel iseärasustel. Jõed voolavad mööda suhteliselt kitsaid ja suuremalt osalt loogelisi maapinna alanguid, mida nimetatakse jõeorgudeks. Jõeorgu iseloomustab märgatava kaldega jõesäng ja see, et orud kunagi ei lõiku, vaid suubuvad ühte üldisesse orgu või merre. Jõeoru põiklõike reljeefi põhielemendid on jõesäng, lamm ja põliskaldad (joon. 15.1).

Joonis 15.1. Tasandikujõe põiklõige

Jõesängiks nimetatakse jõeoru ristlõike madalaimat osa, milles jõgi voolab ilma lammi üle ujutamata.

Lammiks nimetatakse jõeoru osa, mis on kaetud jõesetetega ja mida ujutati või ujutatakse suurvee või tulvavee ajal perioodiliselt üle. Lammi laius kõigub mõnekümnest meetrist mõne kilomeetrini ja rohkemgi. Lamm on mõlemalt poolt piiratud põliskallastega.

Põliskaldaks nimetatakse jõeoru osa, mis koosneb vastupidavamatest kivimitest kui jõesetted. Põliskallas on tihti järsk ja kõrge. Sellel on järsakud, astangud ja terrassid.

Et raskusjõu mõjul toimub voolamine igas punktis maapinna suurima kalde suunas, püüab jõevool luua sellist jõesängi pikiprofiili, mille puhul voolu kineetiline energia jääks muutumatuks kogu jõe pikkusel. Seda nimetatakse **tasakaaluprofiiliks**. Jõe veehulk suureneb ühtlaselt suudme poole liikudes ja seepärast kujutab profiil endast nõgusat kõverat, mille kalle on suurim jõe ülemjooksul, aga allavoolu liikudes väheneb.

Vee ebaühtlase juurdevoolu, setete hulga ja jõevoolu kiiruse muutumise ning kivimite ebaühtlase kuluvuse tagajärjel on tasakaaluprofiil jõe eri osades erineva nõgususega ja kujutab endast üldjuhul murdjoont**.** Esineda võivad kärestikud, kosed, joad, põikmadalad, laugmikud (süvasängid).

Põikmadalaks nimetatakse tasandikujõe madalaveelist lõiku. See reljeefivorm moodustub valdavalt jõesängi kalde murdekohtades (kalde vähenemisel) või sängi laienditel, kus jõevoolu kiiruse vähenemine soodustab hõljumi intensiivset settimist. Pidevalt kogunedes moodustavad setted madalaid, mis omakorda ühinedes moodustavad põikmadala häilukujuliste alangutega.

Laugmikuks ehk **süvasängiks** nimetatakse sügavat jõeosa kahe põikmadala vahel.

Joont, mis ühendab piki jõesängi selle kõige sügavamaid osi, nimetatakse **laevateeks (faarvaater)**.

Alates lättest kuni merre suubumiseni muutub jõgi üha laiemaks ja üldiselt ka sügavamaks, täitudes veega lisajõgede, sademete, aga ka lume ja jää sulamise arvel ning maa-alustest allikatest. Seejuures voolukiirus alaneb pidevalt. Voolukiiruse vähenemisel intensiivistub setete teke. Tugev settimine, samuti tõkete esinemine põhjustavad sageli voolusängi hargnemist ja saarte teket.

Hargnemist, mis ulatub põhisängist kaugele, nimetatakse **harujõeks;** hargnemist, mis piirab väikest saart, aga **jõeharuks**.

Koht, kus jõgi suubub merre või järve, on suue.

Hüdrograafias kasutatakse **jõe suudmealade** kohta erinevaid määratlusi. Loodeteta mere puhul mõistetakse jõe suudmeala all sellist merelähedast jõelõiku, milles tasemekõikumine vastab meretaseme kõikumise režiimile. Loodetega mere korral on suudmealaks see jõelõik, kus loodete mõju on märgatav. Üldiselt kehtestatakse suudmeala piir sinna, kus tõus on alla 0,5 m.

Mere kaldaäärset osa, kus ilmneb jõevoolu mõju ja formeerub delta veealune osa, nimetatakse **suudmeala rannikumereks.**

15.2. Mõõdistustööde koosseis

Hüdrograafiliste tööde kompleks jõgede kartografeerimisel koosneb üldjuhul järgmistest osadest:

- mõõdistamise plaaniline põhitamine;
- mõõdistamise topograafilise aluse ettevalmistamine;
- mõõdistamise kõrguslik põhitamine;
- jõepõhja reljeefi mõõdistamine;
- põhjapinnase ja voolukiiruse määramine;
- andmete kogumine jõe kirjelduseks;
- tulemuste töötlus ja jõekaartide originaalide vormistamine.

Jõgede hüdraulika uuringuteks tehakse vajaduse korral ka teisi töid, näiteks jõelammi ristprofiilide mõõdistamist (vt 15.4).

Mõõdistamise plaaniliseks aluseks on riikliku ja kohaliku põhivõrgu punktid, GNSS tugijaamad, samuti mõõdistamisvõrkude punktid.

Erinevalt mõõdistamisest merel kasutatakse jõgede puhul planšettide topograafilise alusena harilikult topograafilisi kaarte. Kui selliseid kaarte pole, valmistatakse topograafiline alus aerofotomõõdistamise abil saadud fotoplaanide või fotoskeemide kujul.

Kõrguslik põhitamine, nagu sätestatud jaotises 4.1, sisaldab lähtetaseme – nullsügavuse määramise ja mõõdetud sügavuste taandamise sellele väärtusele. Jõgede mõõdistamisel on oma spetsiifika ja seda vaadeldakse eraldi jaotises 15.3.

Jõepõhja reljeefi mõõdistamine ja sellega kaasnevad tööd annavad peamise teabe jõgede kartografeerimiseks. Mõõdistamisel uuritakse voolusängi reljeefi, selgitatakse välja veealused ohud, otsitakse sobivaid jõelõike laevateedeks, sadamateks, ankruplatsideks ja kaldale liginemiseks.

Mõõdistamise üksikasjad olenevad jõe navigatsioonilisest tähtsusest, laiusest ja valmistatava kaardi mõõtkavast, samuti põhjareljeefi oodatavast keerukusest, sügavuste iseloomust ja navigatsiooniohutuse tagamise konkreetsetest ülesannetest.

Valdavalt kasutatakse reljeefi detailmõõdistamist, mille abil uuritakse jõe peamist voolusängi, kõiki laevasõiduks kohaseid harujõgesid ja jõeharusid, suudmeala, aga ka lammijärvi, millel on alaline ühendus jõega.

Põhjareljeefi uurimine toimub rekognostseerimisel soovitavalt aeromeetoditega. Olenevalt mõõdistamisülesandest, jõe laiusest, sügavusest, voolukiirusest tehakse lõplik mõõdistamine ühekiireliste kajaloodide ja külgvaatesonaritega või (laevatee) lausuurimisega mitmekiireliste hüdroakustiliste komplekside või kajatraalide abil.

Peavoolusäng ja laevatavad harujõed kaetakse põhi- ja kontrollhalsside võrguga. Loodimise põhihalsid rajatakse risti veevoolu teljega, kontrollhalsid – piki laevateed ja sellega paralleelselt paremal ning vasakul pool laevatee laiuse kaugusel. Kitsastes jõgedes lubatakse rajada siksakpõhihalsid, kontrollhalss aga suurimate sügavuste joonele.

Halssidevahelised kaugused valiti varem sellise arvestusega, et need oleksid tasase reljeefiga laugmikul (süvasängis) mitte üle 20 mm planšeti mõõtkavas, kärestikel jt keerukatel navigatsioonialadel – mitte üle 10 mm. Samasugused halsside vahekaugused valiti sadamate, reidide ja kanalite uurimiseks. Avastatud navigatsiooniohtude detailuurimisel ei tohtinud halsside vahekaugused ületada 5 mm planšeti mõõtkavas. Jäält loodimist soovitati väikeste akvatooriumide mõõdistamisel sadamates ja laevade talvituspaikades. Tänapäeval võiks eeskätt navigatsioonitarbelisel mõõdistusel rakendada merekaartide koostamiseks ettenähtud IHO standardi S44/2008 sätteid eri- või 1.a täpsusklassi kohta.

Laial suudmealal mõõdistati põhjareljeefi sama metoodika abil nagu šelfi madalaveeliste alade puhul. Kohamäärang võib toimuda halssidel polaarkoordinaatide meetodil robot-elektrontahhümeetri abil, kuid põhiline meetod peaks olema kas DGNSS või RTK GNSS, mis kindlustavad peaaegu pideva kohamäärangu.

Loodimiseks kasutatakse mootorpaate, jõgede suudmealade laiadel akvatooriumidel aga hüdrograafialaevu.

Sügavust mõõdetakse spetsiaalsete jõe- või üldiste hüdrograafiliste kajaloodide abil. Samas võib esineda ka juhuseid, kus on vaja kasutada mehaanilist loodi – nöörloodi või latti, näiteks sadamasildade, kaldakindlustuse, suudmeala lainemurdjate ja vairajatiste vahetus läheduses, samuti paisude, tammide ja lüüside piirkonnas, aga ka aladel, kus on vee tugev turbulents, pehme põhjapinnas või vohav veetaimestik.

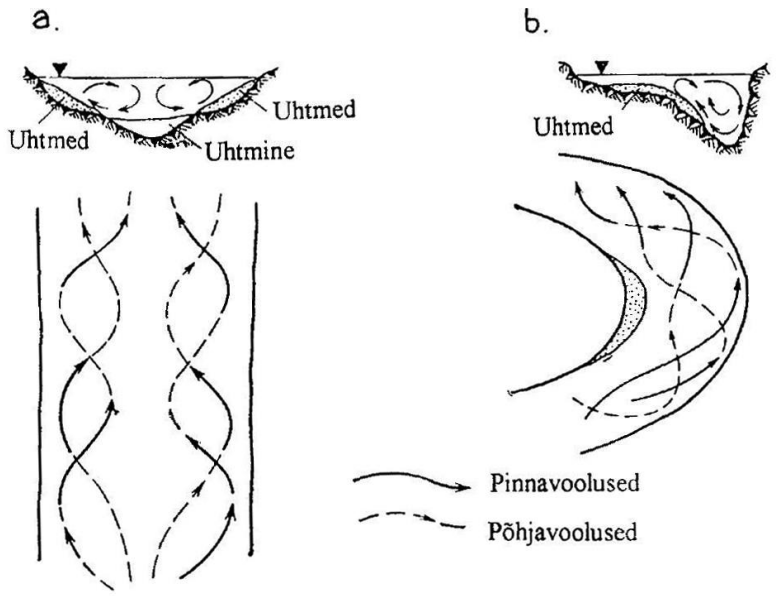
Nöörloodi raskuseks peaks olema ~150 mm läbimõõduga roostevabast terasest ketas, milles on neli sümmeetriliselt asetsevat ava läbimõõduga 25 mm. Ketta kaal peaks olema 3,2 kg. Loodlatti pikkus ei tohiks ületada 6 m, kuid optimaalseks peetakse 4–4,5 m pikkust latti. Ka loodlati otsas peaks olema eespool kirjeldatud mõõtmetega ketas (v.a juhud, kui looditakse kalju- või betoonpinda), aga kergem. Lati ja ketta kaal kokku ei tohi ületada 3,2 kg.

Üheaegselt loodimisega määratakse ka põhjapinnas ja mõõdetakse voolukiirust. Voolukiiruste jaotust ja näitlikku tsirkulatsiooni vaata joonistel 15.2 ja 15.3. Kui jõe laius on alla 300 m, mõõdetakse voolukiirust ainult laevateel. Laiadel jõgedel mõõdetakse voolukiirust jõe ristlõike kolmes punktis, kusjuures igal vertikaalil tehakse viis mõõtmist (pinnal ning sügavustes 0,2*z*, 0,6*z*, 0,8*z* ja põhjas).

Mõõtmised TVP ühes elavlõikes[50] tuleb teha ühe päeva jooksul, kusjuures elavlõikes mõõdetakse üldjuhul jõgedel laiusega 20...100 m 7 vertikaali, 100...300 m 9 vertikaali, 300...600 m 11 vertikaali.

Joonis 15.2. Voolukiiruste jaotus jõe ristlõikes. Talvise maksimaalkiiruse kaldumine alla ja parema kalda poole on tõenäoliselt põhjustatud vee hõõrdumisest jääkatte vastu ja kiiremast jõevoolust väliskurvis [Климов, 1974]

[50] **Elavlõikeks** nimetatakse voolava vee (vedeliku) ristlõiget, mis igas punktis on risti keskmise voolukiiruse vektoriga.



Joonis 15.3. Jõevoolu näitlik tsirkulatsioon. Tsirkulatsiooni tõttu toimub põhja uhtmine ja setete kandumine jõe kallaste suunas. Jõesängi kurvidel on suurem uhtmine väliskurvi põhjas ja setted kanduvad sisekurvi. Tsirkulatsiooni tõttu saadakse jõevoolu kiiruse mõõtmisel ühe vertikaali teatud sügavusel erinevad tulemused [Климов, 1974]

Voolukiirusi võib mõõta mitmesuguste meetoditega. Mõõtureid saab vette lasta varda abil jäält, sillalt ja paadist ning üle jõe tõmmatud tross-vintsiga. Viimane peaks võimaldama mõõturi liigutamist risti voolusängiga ja vajaduse korral ka vertikaalselt. Tänapäeval kasutatakse valdavalt alljärgnevaid mõõtureid.

- Tiivik- ehk rootormõõturid, mis kinnitatakse varraste külge, millega neid paigutatakse vajalikus kohas ette nähtud sügavusele. Tiiviku pöörete arv ajaühikus mõõdetakse elektrooniliselt. Eestis kasutatakse neist SEBA F1 ja IST1 [Keskkonnaagentuur, 2017].
- Pitot` torul põhinev ja rõhusensoriga varustatud mõõtur, näiteks POEM (*Pressure Operated Electronic Meter*), millel ei ole liikuvaid osi ja mis mõõdab nii voolukiirust kui ka mõõtmishorisondi sügavust. Mõõtur võimaldab andmeid kaablivabalt üle kanda kaldal asuvale salvestile.
- Tänapäevased akustilised Doppler-voolukiiruse profileerijad ADCP (*Acoustic Doppler current profiler*) kasutavad keraamilisi antenne vees heli emiteerimiseks. Need mõõdavad emiteeritud ja põhjast või hõljumist peegeldunud helilainete sageduse vahet ning võivad üheaegselt mõõta voolukiiruse kas ühel vertikaalil või voolusängi põiklõike horisontaalil. Viimasel juhul (külgvaate ADCP) võib mõõtmiskaugus ulatuda mõnesaja meetrini. [PCTMSL, 2011]. Jõgedes on üldjuhul siiski eelistatud kasutada mõõdistamist veesõidukile mon-

teeritud allasuunatud kiirega ADCP abil, kuna horisontaalkiire teel võib esineda tõkkeid.

- Pinnavoolu kiiruse mõõtmise radar (näiteks Geolux) on erinevalt eelmistest kontaktitu mõõtur, mis võimaldab paigaldada sensori lihtsalt ja kiiresti. Mõõtur töötab sagedusel 24,125 või 24,200 GHz, mõõtmiskaugus kuni 50 m ja vajab üldjuhul toitevõimsust 1 W.

15.3. Mõõdistamise kõrguslik põhitamine

Põhimõisted. Jõgede veekihi alumine piir (jõepõhi) on suhteliselt püsiv, ülemine piir aga muutub pidevalt mitmesuguste põhjuste tõttu. Järelikult jõe ühes ja samas punktis erineval ajal mõõdetud sügavus ei pruugi olla ühesugune.

Merel kasutatav üldine metoodika parandite leidmiseks eesmärgiga taandada sügavused määratud nullsügavusele (jaotis 4.2) sobib ka jõgede mõõdistamisel, kuid vaatamata ülesannete sarnasusele nõuab sügavuste nulltasemele taandamine jõe puhul spetsiifilisi võtteid, mis on seotud jõe geomorfoloogiliste ja hüdroloogiliste iseärasustega. Alljärgnevalt peatume neil iseärasustel.

1. Erinevalt mere loodpinnast, mis on häirimata seisundis igas punktis risti loodjoonega, on jõe tasemepind alati kaldu ja seetõttu moodustab tema normaal igal pool loodjoonega mingi muutuva nurga. Jõe tasemepinna kalle on tingitud jõeoru pidevast langusest lähte ja suudme vahel ning muutub lõigust lõiku, erinedes vahel isegi vastaskalda juures.

   Jõesängi kalle i leitakse valemiga

   $$i = \frac{\Delta h}{S} \ , \qquad (15.1)$$

   kus Δh on kahe naaberpunkti kõrguste erinevus; S – nende punktide vahelise jõelõigu pikkus.

   Kallet väljendatakse meetrites kilomeetri kohta ehk promillides (‰). Eesti jõgedest on näiteks Suur-Emajõe kalle promillides 0,04, Piusa jõel 2,24 ning võrdluseks Kaukaasia mägijõel Terekil 4,77.

2. Jõe veetase üldiselt ja jõepinna kalle iseäranis muutuvad aastaajati olulisel määral olenevalt vee hulgast, mis suubub jõkke teda toitvatest allikatest.

3. Veetaseme muutused ei toimu harilikult kogu jõe pikkuses ühel ja samal ajal, vaid olenevad kohalikest iseärasustest ja jõe toitetingimustest.

4. Suudmealadel liituvad jõepinna kõikumistele merepinna kõikumised, mis muudavad jõe tasemerežiimi tunduvalt keerukamaks.

Vaatleme nüüd konkreetseid abinõusid, mida kasutatakse jõgede puhul nullsügavuse määramise põhiülesannete lahendamisel ja sügavuste taandamisel sellele nullsügavusele.

Nullsügavuste määramine. Kartografeerimise tingimuste kohaselt peab nullsügavus paiknema jõe kõige sagedamini korduva taseme ligidal ja vastama looduslikele tingimustele. Jõekaartide kasutamisel navigatsioonis peab nullsügavus kindlustama laevasõidu ohutuse ja olema teatava ajavahemiku vältel püsiv.

Jõgede veetaseme režiim aga ei võimalda alati valida sellist nulltaset, mis vastaks nimetatud nõudmistele, sest mingil määral on need isegi vastukäivad. Seepärast võetakse praktikas nullsügavuseks tase, mis kõige rohkem vastab jõe antud hüdroloogilise režiimi põhinõuetele. Enim kasutatavad on projekteeritud tase, madalate navigatsioonitasemete keskmine ja leppetase.

Projekteeritud tase antakse tehnilis-majanduslike arvutuste alusel, kasutades jõe laevasõidutingimuste parandamise projekte.

Madalate navigatsioonitasemete keskmine arvutatakse kui kõige madalamate suviste tasemete mitmeaastane keskmine. Seda kasutatakse jõgedel, kus kevaditi esineb suurveeperioode.

Leppetase määratakse sellistel juhtudel, kui jõe veetaseme kõikumise kohta ei ole pikaajalisi vaatlusi. Siis võetakse nullsügavuseks kas madalaim vaatlusperioodil fikseeritud tase, madalaim antud aastal fikseeritud tase, tööperioodil madalaim tase või lihtsalt hetkeväärtus, mis on registreeritud ühepäevase nivelleerimisega.

Loodeteta merre või järve suubuva jõe suudmealal võetakse nullsügavuseks paljuaastane keskmine mere (järve) tase. Loodetega merre suubuva jõe suudmealal võetakse nullsügavuseks tasemepinna leppeline pikiprofiil, mille äärmisteks punktideks on mere madalaima astronoomilise taseme absoluutkõrgus ja tase, mis on võetud nullsügavuseks jões tõusuala ülemisel piiril.

Veehoidlatel võetakse nullsügavuseks navigatsiooni madalaima rakendumise tase.

Jõe nullsügavuse määramine algab nullsügavuse lugemite määramisest alalistel tasemevaatluspostidel vastavalt eeltoodud valitud nullsügavuse määramise meetodile. **Alalisteks tasemevaatluspostideks** nimetatakse selliseid jõe veetaseme kõikumise alalise vaatluse punkte, mida iseloomustab

- pikaajaline, ettenähtust mitte lühem vaatlusperiood;
- vaatlusposti nulli usaldusväärselt määratud kõrgus;
- usaldusväärne vaatlusposti ehitus, mis võimaldab posti nulli pikaajaliselt säilitada;
- kindel jõesäng vaatlusposti piirkonnas.

Minimaalne arvestusperiood alalise tasemevaatlusposti nullsügavuse usaldusväärseks määramiseks on püsiva hüdroloogilise režiimiga jõgedel 15...25 aastat.

Harilikult kasutatakse alaliste tasemevaatluspostidena hüdrometeoroloogia-teenistuste jt ametkondade alalisi veemõõduposte. Need asetsevad hüdrograafilisest seisukohast iseloomulikel jõelõikudel:

- allpool suurte lisajõgede suudmeid;
- vahetult enne ja pärast paisutavaid rajatisi;
- sadamate ja keerukate põikmadalike ligiduses;
  - suurte jõgede rahuliku vooluga aladel mitte harvemini kui 150...200 km tagant (suurimad Eesti jõed kuuluvad keskmiste hulka).

Igasse alalisse tasemevaatlusposti paigaldatakse vähemalt kaks kõrgusreeperit: üks – põhireeper – kindlustatakse nii, et oleks tagatud tema pikaajaline säilimine, teine – tööreeper – paigutatakse posti ligidusse, kuid kõrgemale suurvete üleujutuse alast. Posti rõhuandurid (Eestis kasutatakse valdavalt rõhumõõtmisel põhinevaid mareograafe – vt alajaotis 4.3), latid ja vaiad seotakse reeperiga täpse nivelleerimise abil, mida tehakse vähemalt kaks korda aastas ja iga postikahjustuse järel. Kõik tasemevaatluspostide reeperid seotakse riikliku nivelleerimisvõrgu reeperite ja märkidega kahekordse täpse nivelleerimiskäigu abil, mistõttu nende postide nullid saavad riiklikus kõrgussüsteemis absoluutkõrgused.

Alaliste tasemevaatluspostide andurite abil saadud tunni keskmised andmed saadetakse GPRS (*General Packet Radio Service*) mobiilse andmeside võrgu abil andmebaasi. Aeg-ajalt tehakse kontrollmõõtmisi veemõõtelattidelt.

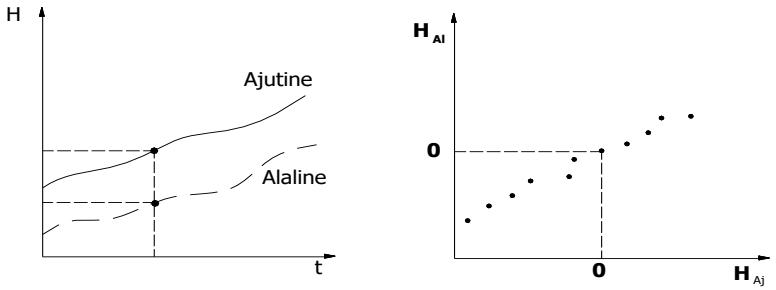
Alalistele tasemevaatluspostidele kehtestatud nullsügavused iseloomustavad taseme kõrgust ainult lühikestel jõelõikudel postide piirkonnas. Seetõttu organiseeritakse hüdroloogiliste ja hüdrograafiliste tööde perioodiks **ajutised tasemevaatluspostid**, mis rajatakse jõelõikudel, kus veetaseme kõikumist mõjutavad kohalikud iseärasused. Sellised postid rajatakse harilikult

- jõe järsu laienemise või kitsenemise kohtadesse;
- suurtest kärestikest, põikmadalatest ja jõesängi hargnemisest kõrgemal ja madalamal;
- jõesuudmes, ajuvete ja paguvete esinemispiirkonnas;
- laevatatavatel jõeharudel;
- enne ja pärast paisusid;
- rahuliku vooluga jõelõikudel mitte harvemini kui 50...60 km järel.

Veetaseme kõikumise vaatlusi ajutistes tasemevaatluspostides tehakse posti piirkonnas toimuvate mõõtmiste ajal või ühepäevase sidumise perioodil – iga tund. Lugemid tehakse 1 cm täpsusega. Kestva vaatlusrea alusel arvutatakse iga alalise tasemevaatlusposti nullsügavuse kõrgus posti nulli suhtes ja absoluutkõrgus. Vaatlusperiood ajutistes tasemevaatluspostides ei ole pikk, järelikult pole võimalik saada nende nullsügavusi seal vahetute mõõtmiste alusel. Nullsügavust ajutisele postile geomeetrilise nivelleerimise abil üle kanda ei ole ka võimalik sel lihtsal põhjusel, et jõe kalle ei ole teada, mistõttu ei ole teada ka taseme langus alalise ja ajutise posti vahel.

Seetõttu tuleb leida meetod nullsügavuse ülekandmiseks ajutisele tasemevaatluspostile.

Nullsügavuste ülekandmine alaliselt tasemevaatluspostilt ajutisele tasemevaatluspostile. Olgu ajutisel postil tehtud mitu vaatlust, mis olid sünkroonsed alla- ja ülesvoolu asuvatel naaberpostidel tehtud vaatlustega. Konstrueerime ajutiste ja alaliste postide tasemekõikumise ühisgraafikud (joon. 15.5) kogu üheaegsete mõõtmiste perioodi kohta.



Joonis 15.5. Vasakpoolne – ühisgraafik, parempoolne – seose graafik, üksikud mõõtmised on tähistatud punktidega. *H* on taseme kõrgus, *t* – aeg

Kasutades tasemekõikumise kõverate iseloomulikke punkte, joonestame vastavalt tasemete seose graafikud, võttes ordinaatideks alalise vaatlusposti tasemekõrguste kõvera iseloomulikud punktid ning abstsissideks – ajutise vaatlusposti tasemekõrguste kõvera vastavad punktid. Kindla seose olemasolul rühmituvad kõik punktid enam-vähem piki sirget. Võib kasutada ka korrelatsioonarvutust.

Leiame graafikult seosejoone sellise punkti abstsissi, mille ordinaat võrdub alalise tasemevaatlusposti nullsügavuse kõrgusega. Võetud lugem vastab nullsügavuse kõrgusele ajutisel tasemevaatluspotil. Seda ülesannet võib lahendada ka analüütiliselt, koostades vastava regressioonivõrrandi (vt. jaotis 4.3 ja arvutusnäide 4.1).

Kui ajutise vaatlusposti nullsügavuste kõrguste vahe, mis on määratud eelkirjeldatud meetoditega ülemise ja alumise alalise vaatlusposti järgi, ei ületa 10 cm, võetakse lõplikuks väärtuseks nende kõrguste aritmeetiline keskmine. Vastasel korral on ajutise posti nullsügavuseks väärtus, mis saadakse usaldusväärsema seosega alalise vaatlusposti graafiku järgi.

Tasemete seose usaldusväärsus oleneb suurte lisajõgede jt hüdroloogilist režiimi muutvate tegurite puudumisest või olemasolust. Väga väikese usaldusväärsusega on seos jõgede suudmealadel, kus veetase oleneb vooluhulga muutustest, loodetest,

lainetusest, aju- ja paguveenähtustest jne. Sellistes piirkondades määratakse tasemed kas lühikese perioodi keskmise taseme leidmise teel või vaatluste võrdlemisel vaikse mere tasemega.

Jõe nullsügavuse pikiprofiili määramine. Ainult alaliste ja ajutiste vaatluspostide abil ei ole võimalik arvestada taseme režiimi kõiki iseärasusi ega õigesti konstrueerida jõe nullsügavusele vastavat pikiprofiili.

Oletame, et jõe nullsügavuste pikiprofiil on väga sarnane hetketaseme pikiprofiiliga. Ilmselt on sarnasus seda suurem, mida vähem erinevad omavahel hetketase ja nullsügavuste tase. **Seega tuleks nullsügavuse määramise mõõtmised teha suvise madalvee ajal.**

Järelikult, kui oleks võimalik fikseerida jõevee mingi hetketase, mis on küllalt lähedane nullsügavuse tasemele, võiks nullsügavusele vastava pikiprofiili leida kas või näiteks taseme ülekandmisega alalistelt vaatluspostidelt ajutistele postidele. Lahendame selle ülesande kahes järgus: esmalt püüame määrata jõe hetkepikiprofiili, seejärel otsime võimalust siduda hetkeprofiili kõrgusi kehtestatud nullsügavusega.

Esimene järk on nn tasemete sidumine, mis seisneb jõe pikiprofiili leidmises vee hetketasemete määramise kaudu kõigis uuritaval jõelõigul paiknevates punktides ning nende punktide järgnevas nivelleerimises.

Sel eesmärgil lüüakse ettenähtud kohtades ja ühel momendil kõigis veetaseme sidumispunktides (**VTSP** – vt joon. 15.6) vaiad kogu tööpiirkonnas ühetasa vee hetketasemega. VTSP paigutatakse pikiprofiili iseloomulikesse kohtadesse, rahuliku voolu puhul aga iga 3...5 km järel. Nende punktide lähedusse paigaldatakse enne tööreeperid, sidudes need magistraalkäiguga või omavahel nivelleerimiskäigu abil.

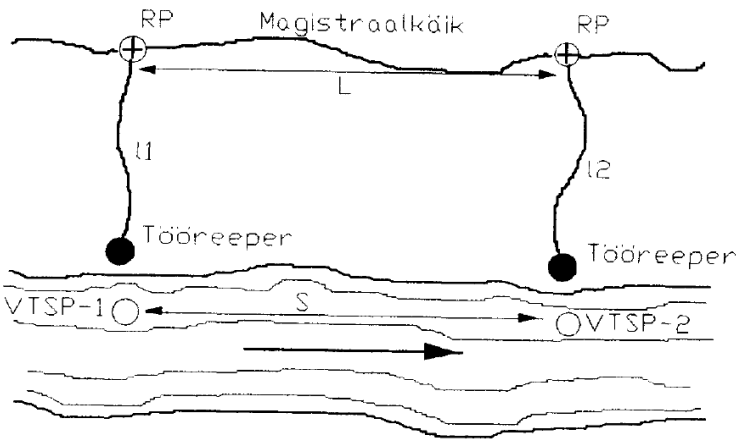
Kõik jõe hetketasemega ühetasa löödud vaiad seotakse oma kõige ligema tööreeperiga (vt joon. 15.6) ja nii saadakse jõe veetaseme hetke-pikiprofiil. VTSP asukohad seotakse RTK GNSSi või DGNSSi abil. Vaiad pikkusega 70 cm süvistatakse põhja vähemalt 40 cm, sügavuses 30 cm või veidi rohkem.

Nivelleerimisel soovitatakse [Глотов, 1972] kasutada tabelis 15.1 toodud täpsusi (Glotovi täpsusklassid on tabelis 15.1 taandatud käesoleval ajal Eestis kasutatavatele täpsusklassidele).

Tabel 15.1. Jõe nivelleerimise täpsusklassid

Jõe kalle cm/km	Magistraallkäigu klass	Ühenduskäigu klass
kuni 5	II	II
> 5–10	II	III
> 10–20	III	III
> 20–50	III	Tehn
> 50	Tehn	Tehn

Sidumist, mille puhul vaiad lüüakse ühel ja samal hetkel veepinnaga tasa, nimetatakse **üheaegseks.** Mõnikord tehakse tasemete sidumist väga pikal lõigul ja pole võimalik rakendada nii paljusid töötajaid, et vaiad löödaks igal pool ühel ja samal ajal. Sel juhul lööb iga töötaja oma vaiad ühe (harvemini kahe-kolme) päeva jooksul ja fikseerib iga vaia puhul täpse aja. Sellist sidumisviisi nimetatakse **ühepäevaseks.** Viimasel juhul lüüakse kindluse mõttes igas veetaseme sidumispunktis (VTSP) kaks vaia teineteisest vähemalt 10 meetri kaugusel, teine neist ~5 cm vee alla ja mõõdetakse joonlauaga selle süvistus millimeetrise täpsusega. Jõe hetketaseme õigeks kujutamiseks tehakse kõigis alalistes ja ajutistes vaatluspostides igatunnilisi vaatlusi ja nivelleerimistulemused taandatakse ühele ajahetkele.



Joonis 15.6. Hetke-pikiprofiili nivelleerimine, kasutades varem rajatud magistraalkäiku põliskallastel ja ühenduskäike tööreeperini. VTSP vaiad (veetaseme sidumispunkt) nivelleeritakse tööreepereilt

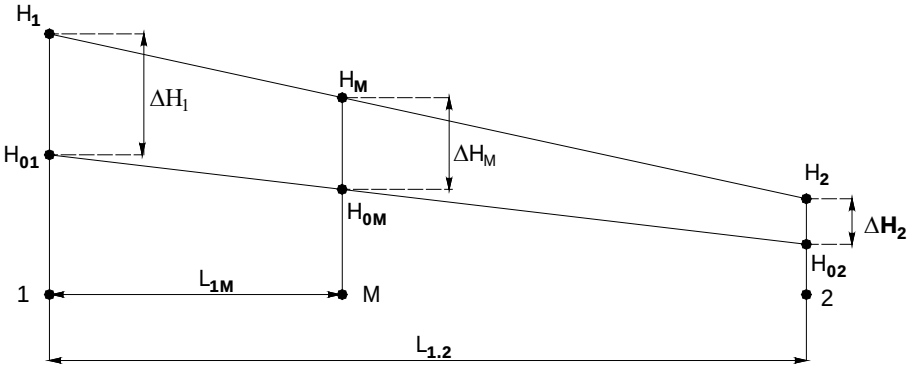
Sel viisil saadud hetketaseme kõrgused vaiade asukohas koos sama hetke tasemekõrgustega kõigis alalistes ja ajutistes tasemevaatluspostides peegeldavad küllaltki tõeselt jõe hetkeprofiili mõõtmislõigul.

Eeldades, et kõigis tasemevaatluspostides olid nullsügavused ühel või teisel viisil määratud (vt eespool), seotakse veetaseme sidumispunktides saadud jõe hetkepikiprofiili kõrgused tasemevaatluspostidevahelises alas nulltasemega.

Oletame, et ühtsel nivelleerimishetkel oli veetase 1. ja 2. tasemevaatluspostis vastavalt H_1 ja H_2 (vt joon. 15.7). Olgu vastavad nullsügavused nendes postides H_{01} ja H_{02}. Nimetame hetketaseme ja nullsügavuse kõrguste vahe sügavuse taanduseks ΔH. Seega, sügavuse taandused tasemevaatluspostides avalduvad valemitega (15.2).

$$\Delta H_1 = H_1 - H_{01}$$
$$\Delta H_2 = H_2 - H_{02} \qquad (15.2)$$

Leiame, millega võrdub taandus nendevahelises suvalises veetaseme sidumispunktis *M*. Tähistame hetketaseme ja nullsügavuse kõrgused selles punktis vastavalt H_M ja H_{0M}. Taseme langus jõe hetkeprofiili lõigul tasemevaatluspostide 1 ja 2 vahel võrdub $H_1 - H_2$, aga lõikudes 1*M* ja *M*2 vastavalt $H_1 - H_M$ ja $H_M - H_2$.



Joonis 15.7. Nulltasemete taandused 1. ja 2. tasemevaatlusposti vahel [Коломийчук, 1975]

Eeldades, et tasemete sidumine tehti ajal, mil tasemed erinesid kindlaksmääratud nullsügavusest vähe (näiteks suvise madalvee ajal), loeme iga vahepunkti veetaseme taanduse võrdeliseks vee hetketaseme langusega vastavas lõigus. Seega võime kirjutada:

$$\frac{\Delta H_1 - \Delta H_M}{\Delta H_1 - \Delta H_2} = \frac{H_1 - H_M}{H_1 - H_2}, \tag{15.3}$$

millest toome välja nullsügavuse taanduse veetaseme sidumispunktis *M*:

$$\Delta H_M = \Delta H_1 - \frac{(H_1 - H_M)(\Delta H_1 - \Delta H_2)}{H_1 - H_2}. \tag{15.4}$$

Järelikult jõe veetaseme kõrguse, mis vastab kindlaksmääratud nullsügavusele, võib suvalises veetaseme sidumispunktis leida valemiga

$$H_{0M} = H_M - \Delta H_M. \tag{15.5}$$

Kõikides tasemete sidumispunktides tehtud nullsügavuse kõrguse H_0 määrmistulemuste alusel koostatakse jõe nullsügavuse pikiprofiil.

Jõe pikiprofiili saab põhimõtteliselt määrata ka aerolaserskaneerimise (ALS) abil, kuid see meetod on võrdlemisi kallis.

Jõe hetketaseme kõrguse määramine põhjareljeefi mõõdistamise ajal. Jõe hetketaseme kõrgust saab mõõdistamise ajal määrata kahel viisil: kas tasemevaatluspostides tehtud veetaseme kõikumise vaatluste alusel või jõe veetaseme kõrguse nivelleerimise teel vahetult mõõdistamispiirkonnas.

Esimese meetodi puhul tehakse tasemevaatlused mõõdistamisperioodil kõigis tööpiirkonnas asuvais alalistes ja ajutistes tasemevaatluspostides. Et iga vaatluspost peegeldab tasememuutuste iseloomu vaid teatud piiratud alas, annab see meetod usaldusväärseid tulemusi ainult siis, kui postidevõrk on hästi välja arendatud.

Harilikult ei ole aga alalisi ja ajutisi vaatlusposte nii palju, et hetketasemete kõrgusi saaks kõigis vahepunktides usaldusväärselt määrata. Tasemekõikumiste õigeks arvestamiseks vahetult tööpiirkonnas võib kasutada VTSP vaiasid, kuid sellisel juhul peavad need olema dubleeritud teise vaiaga 10...15 m kaugusel, kusjuures duubelvai peaks jääma 5 cm vee alla. Mõõtmiste ajal fikseeritakse joonlauaga veetase vaia otsa suhtes.

Hetketaseme kõrguse määramise teine meetod seisneb jõe veetaseme vahetus nivelleerimises. Sel juhul lüüakse tasemete sidumisreeperite (VTSP tööreeperite) läheduses kulgevatel halssidel mõõdistusaluse kaldast eemaldumise hetkel halsi hetketasemevaiad veepinnaga tasaseks. Seejärel seotakse kõik need halsi hetketasemevaiad nivelleerimise abil kõige lähemate tööreeperitega.

Sügavuse taanduse määramine mõõdistamisel. Kõiki mõõdetud sügavusi tuleb parandada hetketaseme kõrguse (taseme kõrgus sügavuse mõõtmise hetkel) ja nullsügavuseks kehtestatud tasemekõrguse vahe arvel. Seda parandit nimetatakse sügavuse taanduseks Δz_i. Olenevalt hetketaseme fikseerimise meetodist arvutatakse sügavuse taandus kas VTSP vaatlusandmete või nivelleerimistulemuste alusel.

Esimesel juhul, st sügavuste jaoks, mis on mõõdetud alaliste või ajutiste vaatluspostide vahetus läheduses kulgevatel halssidel, arvutatakse sügavuse taandus kui hetketaseme ja nullsügavuse lugemite vahe. Kõikide teiste halsside puhul saadakse taandused VTSP vaatlusandmetest.

Teisel juhul, kui mõõdistamine kaasneb hetketasemete nivelleerimisega, saadakse sügavuse taandus kõikides punktides, kus määrati nullsügavus, nimetatud kahe taseme kõrguste vahena.

Taandused nende halsside jaoks, millel hetketaseme ja nullsügavuse kõrgused määrati nivelleerimisega, võib lugeda veatuks. VTSP vahehalsside taandused võivad aga sisaldada vigu, kui üleminek ühelt halsilt teisele võtab erineva aja. Seetõttu on antud juhul sügavuste taanduste määramise kohustuslikuks tingimuseks mõõdistustööde ühtlane edendamine piki jõge.

Mõõdistamistulemuste töötlemine algab vahetult välitööde perioodil ja jätkub baasides. Kõik tööd lõpetatakse aruandeplanšeti (jõekaardi originaali) koostamisega.

15.4. Jõgede hüdraulika uuringud

15.4.1. Üldmõisted

Siinkohal vaadeldakse mõõtmisi uhtmise jälgimiseks sildade, lüüside, paisude, tammide ja teiste hüdrotehniliste rajatiste juures jõe navigatsioonisüsteemide füüsiliste aspektide modelleerimiseks.

Jõgede hüdraulika uuringud kirjeldavad jõevoolu karakteristikuid ja jõgede füüsilist käitumist, sh veetaseme, vooluhulga, voolukiiruse ja setete transpordi prognoose. Nende uuringute põhiosaks on tavalise hüdrograafilise mõõdistamise andmed. Ülejäänud hüdraulika uuringud võivad vajada paisude, liigveelaskmete ning kaitse ja voolutammide kõrguste määramist. Hüdrograafilisi, topograafilisi, fotogrammmeetrilisi ja LIDAR-mõõtmisi vajatakse ka jõelammide hüdraulilisel modelleerimisel, jõevoolu juhtimise kanalite kavandamisel, navigatsiooni modelleerimisel, vee kvaliteedi hindamisel ning loodushoiu mõjude analüüsil.

Jõgede hüdraulika uuringutes on vaja kolme andmekategooriat:

- vooluhulk;
- voolusängi geomeetria;
- setete transpordi mallid.

Tulvavee ohjeldamise projektid koostatakse harilikult nii, et need arvestaksid taseme ja vooluhulga sagedusi, (navigatsioonilised uuringud vaatlevad eeskätt madaltasemeid). Veepinna profiili kõrgused mõõdetakse ka kõrgvee ajal kui abimaterjal tulvalaine kulgemise arvutuseks. Veesügavus ja voolusängi ristlõike profiilid on tähtsad komponendid vooluhulga arvutamiseks või prognoosiks.

Hüdrograafilistest mõõtmistest tuletatud voolusängi geomeetria on vajalik igasugusel hüdraulilisel uuringul. Geomeetria andmed sisaldavad voolusängi ja jõelammi topograafiat, voolusuuna mõõtmist, sildade ja truupide andmeid, informatsiooni voolusängi kareduse kohta. Voolusängi, kallaste ja jõelammi täielikuks kirjeldamiseks vajatakse nii hüdrograafilisi, LIDAR, fotogramm-meetria kui harilikke topograafilisi mõõtmisi. Talvegi profiilid või hüdrograafilised korduvmõõtmised võivad olla vajalikud jõesängi kuju ja jõepõhja liivalainete liikumise analüüsiks.

Voolusängi ristlõigete asukohad määrab hüdraulikaspetsialist ja need kantakse uuritava ala väikesemõõtkavalisele kaardile. Üldjuhul on soovitav rajada ristlõiked VTSP juurde, kuivõrd aga ristlõigete soovitav vahekaugus on väiksem VTSPde vahekaugusest, siis tuleb neid rajada ka VTSPde vahele. Ristlõiked võivad ulatuda põliskallaste (või jõelammi) kõrgveetasemeni. Siinjuures võib LIDAR ja fotogramm-meetria meetodite kasutamine olla raskendatud jõe kallastel ja orgudes rohke taimestiku tõttu ja seepärast on otstarbekas kasutada mõõdistamist elektrontahhümeetri abil. Topograafilisel mõõdistamisel võib enamasti arvestada võimaliku kõrguste veaga ± 6 cm, hüdrograafilisel mõõdistamisel ± 15 cm, fotogramm-meetria kasutamisel isegi ± 60 cm [EM 1110-2-1003, 2002]. Reeperite tihendusvõrk peab

tagama tasemevaatlusposti nulli adekvaatse kõrguse. Reeperite tihedus oleneb jõepinna kaldest. Üldjuhul peab jõepinna kõrguse interpoleerimise täpsus jääma ± 15 cm piiridesse ja TVP mõõtelatid tuleb paigutada intervallidega, mis tagab selle täpsuse.

Ristprofiilid tuleb mõõdistada järgmistes kohtades [EM 1110-2-1003, 2002]:

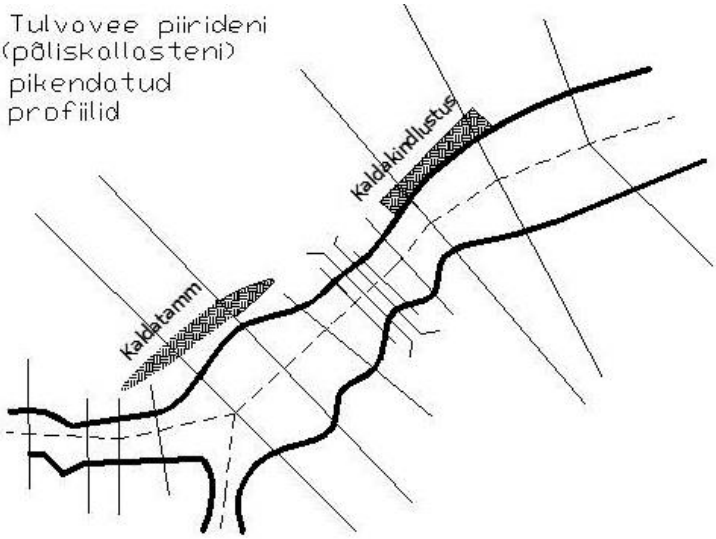
- kõigis jõesängi pikiprofiili tähtsamates murdekohtades;
- kohtades, kus profiili pikkus on minimaalne või maksimaalne;
- kohtades, kus jõesängi karedus muutub järsult;
- jõe käänakutel, kus profiilid tuleb rajada üksteisele ligemal;
- kohtades, kus setete transport muutub suuresti jõe laiuse, sügavuse või kareduse muutumisel, tuleb rajada (mõõdistada) profiilid üksteisele ligemale;
- rajada (mõõdistada) profiilid üksteisele ligemal kohtades, kus nende kuju erineb üksteisest tugevasti;
- tammide otstes;
- vahetult enne ja pärast oluliste lisajõgede suubumist;
- vahetult enne ja pärast silda;
- peale eelnimetatud juhuste rajatakse suurte jõgede ühtlase iseloomuga aladel, kus keskmine veepinna kalle ei ületa 0,00083, ristprofiilid 1800 m järel või harvemini, aga suurte kalletega väikestel jõgedel 400 m järel ja harvemini.

Soovitatavad maksimaalsed ristprofiilide vahekaugused laia jõelammi puhul [EM 1110-2-1003,2002]

- veepinna kalde puhul alla 0,00033 on 900 m;
- veepinna kalde puhul 0,00033 ... 0,00050 on 540 m;
- veepinna kalde puhul > 0,00050 on 360 m.

Ristprofiilidevaheline kaugus ei tohi ületada 75...100-kordset keskmist sügavust või kahekordset ristprofiili pikkust. Ristprofiilid tuleb rajada veevoolu suunaga risti. Profiilide otspunktid peavad asuma kõrgemal kui eeldatav kõrgveetase ja need tuleb koordineerida riiklikus koordinaatide süsteemis. Ristprofiilid ei tohi lõikuda.

Voolukiiruse mõõtmisel vooluhulga määramiseks kasutatakse hüdromeetrilisi labatiivikuid või akustilisi Doppleri efektil põhinevaid voolukiiruse mõõtjaid. Ristprofiil rajatakse võimalikult sirgel, taimestikuvabal ning seisva vee ja vastuvoolu aladeta jõelõigul.



Joonis 15.8. Jõe ristprofiilide paigutus. Pane tähele ristprofiile kummalgi pool silda ja kaldakindlustuse ja kaldatammi otstes ning enne ja pärast lisajõe suubumist

15.4.2. Ristprofiilid vesiehitiste juures

Sildade juurde rajatakse neli ristprofiili. Kaks neist rajatakse silla vahetusse lähedusse, kusjuures allavoolu asetsev ristprofiil peaks jääma silla tugikonstruktsioonist paari meetri kaugusele, aga ülesvoolupoolne ristprofiil veidi kaugemale, enne voolu ahenemise algust sillasammaste vahel. Kaks kaugemat rajatakse nii, et ülesvoolupoolne oleks vastavast silla ligidasest profiilist kaugusel, mis võrdub sillasammaste vahega, aga allavoolupoolne oleks sillast kaugusel, mis võrdub sillasammaste neljakordse vahekaugusega. Andmetele tuleks lisada silla põhimõõtmed, st sillateki, kontraforsside, sillasammaste jms mõõtmed.

Jõgede navigatsiooniprojektides on sageli ette nähtud lüüside ja paisude rajamine. Voolu profiili iseloomustused nende struktuuride vahel vajavad hüdraulilist modelleeringut, mistõttu tuleb nende rajatiste puhul teha tihedamaid ristprofiile, kuna seal võib esineda aktiivne setete kuhjumine.

Jõevoolu juhtimise rajatised (tammid, muulid, paisud), aga ka sadamakaid, kaljupaljandid, joad ja astangud mõjutavad veevoolu iseloomu. Seetõttu tuleb ristlõiked mõõdistada nii nende juures kui ka läheduses.

Kaldavallid hoiavad ära tulvavete tungimise jõelammi. Kui kaldavallid on ebaõnnestunud (st vales kohas või hävinenud), tungib kõrgvesi jõelammi. Kaldavalli kontrolliks tuleb võtta ristprofiilid kaldavallide otstes, samuti kaldavalli pikiprofiil. Viimase võib teha RTK GNSS-meetodiga.

15.4.3. Ristprofiilide mõõdistamise täpsusnõuded

Hüdroloogiliste uuringute puhul ei ole horisontaalne täpsus nii määrav kui navigatsiooniliste mõõtmiste puhul. Ka vertikaalne täpsus ei ole väga oluline, kuid andmetes ei tohi olla süstemaatilisi ja jämedaid vigu.

Kõrge karedusteguriga (*Manning n-value*) aladel on ristlõike kõrguspunktide ebatäpsuse mõju arvutatud veeprofiilide täpsusele tühine. Näiteks kui jõe kalle on 0,00017, siis ristlõike kõrguspunktide keskmine ruuthälve kuni ± 0,6 m mõjutab veepinna profiili täpsust vähem kui 0,03 m. Selline täpsus on kergesti saavutatav enamiku topograafiliste ja hüdrograafiliste mõõtmismeetoditega.

Kaldavallid, maanteede ja raudteede tammid ning teised sarnased suurvett reguleerivad muldehitised tuleks profileerida 15 cm täpsusega. Seda võiks teha RTK GNSS-meetodil.

Üleujutuspiiride kaardistamise täpsus ei olene veepinna profiili mõõdistamise täpsusest. Antud juhul on nõutav kõrguslik täpsus 3...6 cm, mis pole saavutatav fotogramm-meetria meetoditega ja tekitab probleeme ka RTK GNSSi puhul.

Üleliigsed või analüüsimata topograafilise mõõdistamise spetsifikaadid suurendavad oluliselt mõõdistamise kulutusi, kuna need olenevad eksponentselt vertikaalse täpsuse nõuetest.

± 0,6 m suurune kõrguspunktide keskmine ruuthälve on LIDAR-meetodiga tänapäeval saavutatav, mistõttu maapealseid tugipunkte pole vaja rajada. See vähendab suuresti tööde maksumust. Kõrgpuistu või tiheda ja kõrge rohukattega aladel on siiski soovitav määrata kontrollpunkte näiteks elektrontahhümeetri või RTK GNSSi abil või siis mõlema kombinatsiooniga, mõõtes RTK GNSSi abil baaspunktide kõrgused lagendikel ja laiendades seda süsteemi elektrontahhümeetri abil.

KASUTATUD KIRJANDUS

G. Allen. What Is Beamforming.

I. Arro. Sonartehnika. TTÜ, 1998.

P. J. Barclay. Interferometric Synthetic Aperture Sonar Design and Performance. A thesis for the degree of Dr.Ph. University of Cantenbury. New Zeeland, 2006.

C. W. Brennan. Multibeam Calibration: The Patch Test. R2Sonic LLC, 2009.

L. N. Brisson, D. A. Wolfe, M. Staley. Interferometric Swath Bathymetry for Large Scale Shallow Water Hydrographic Surveys. Canadian Hydrographic Conference, 2014.

P. Byham. Qualifying Interferometric Swath Bathymetry Data for Charting. 2010.

D. W. Caress, et al. High-Resolution Multibeam Sidescan, and Subbottom Surveys Using the MBARI AUV D. Allan B. Monterey BAR Institute, 2008.

C. D. De Jong, G. Lachapelle, S. Skone, I. A. Elema. Hydrography. Holland, Delft University Press, 2010.

Eesti Mereinstituut. Saaremaa süvasadama võimalike asukohtade hüdrodünaamilised ja geoloogilised uuringud. Teaduslik-tehniline aruanne. Tallinn, 2000.

Eesti Vabariigi keskkonnaministri määrus nr.64. Geodeetiline süsteem, 2011.

J. Engelbrecht, T. Soomere. Kui meri märatseb – mõrvarlained.//Horisont, (2006), 1.

J. Elken. Geofüüsikalise hüdrodünaamika konspektid. http://msi.ttu.ee/~elken/GFHdist.htm.

A. Ellmann, T. Oja. Füüsikalise geodeesia ja gravimeetria alused. Tallinn, TTÜ, 2008.

EVA, REGIO. Eesti merekaartide koostamise ja kirjastamise eeskiri. Tartu, Tallinn, 1996.

E V Maa-amet. I, II ja III klassi nivelleerimise eeskiri. 1994.

EM 1110-2-1003. River Engineering Hydraulic and Channel Stabilization Surveys. USA, 2002.

C. Gostnell. Efficacy of an interferometric sonar for hydrographic surveying. NOAA, 2005.

M. S. Griffin. Plans for future. 2016

R. E. Hansen. Introduction to Synthetic Aperture Sonar. www.intechopen com, 2011.

B. Hoffmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins. Global Positioning System. Theory and Practice. New York, Springer-Verlag, 1994.

A. Hopkins. Recommended operating guidelines for swath bathymetry. www.searchmesh.net , 2007

How fast does water enter the Pukaki Canal. https://www.niwa.co.nz/publications/isu/instrument-systems-update-,,,

IHO. Manual on Hydrography. Monaco, 2005 (Corrections to February 2011).

IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication N° 44. 2008.

Ingham A. E, Abbott V. J. Hydrography for the Surveyor and Engineer. UK Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1992.

Intergovernmental Oceanographic Commission UNESCO. Manual on Sea Level Measurement and Interpretation. Volume IV: Update to 2006.

T. Jagomägi. Geoinfosüsteemid praktikule. Tartu, Regio, 1999.

H. Jürgenson. GPS mõõtmismeetod — lihtne või keeruline? //Geodeet (2006) 33(57).

H. Jürgenson. Mudelist Est-Geoid 2003//Geodeet (2010), 40(64).

Ü. Kaasik. Matemaatika leksikon. Eesti Entsüklopeediakirjastus, Tallinn, 1992.

V. Kala. Geodeetiliste mõõtmiste andmetöötluse teooria alused. TTÜ, 2009.

V. Kala. Kaartide projektsioonid ja koostamine. TTÜ, 2013.

V. Kala, A. Ellmann, S. Märdla. Kõrgem geodeesia. Polügonomeetria ja kõrgtäpne nivelleerimine. TTÜ, 2015.

V. Kala, G. Kotsulim. Vesiehitised. Ehitusuuringute alused. TTÜ, 2010.

T. Kall. Satelliitgeodeesia. Loengukonspekt. Tartu, 2001.

K. Kollo, A. Ellmann. Satelliitgeodeetilise asukohamäärangu loengukonspekt. Tallinn, TTÜ, 2008.

G. Kotsulim. Uuringud sadamaehitiste rajamisel. Magistritöö. TTÜ. 2005.

Keskkonnaagentuur. http://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/mootetehnika/hudroloogiliste-vaatluste-mootetehnika/

P. Krusberg. Eesti digitaalne kõrgusmudel.// Geodeet (1998) 15(39).

T. Kõuts, U. Raudsepp. Meretase Väinameres 1976-92. Tallinn, EMHI, 1994.

K. Laigna. Ohutu laevasõidu meteoroloogilised ja okeanograafilised elemendid. Eesti Merehariduskeskus, Tallinn, 1999.

K. Laigna, V. Kala. Hüdrograafia. Eesti Merehariduskeskus. Tallinn, 1994.

K. Laigna, V. Kala. Hüdrograafia. Eesti Mereakadeemia. Tallinn, 2001.

U. Laur jt. Inglise-eesti meresõnaraamat. Veeteede Amet, Tallinn, 2008.

A. Liibusk. GPS mõõdistus reaalajas.// Geodeet (2003)27(51).

A. Liibusk, K. Türk, H. Jürgenson. GIS GPSi võimalusi.// Geodeet (2007) 35(59).

Maa-amet. Kõrgusvõrgu rekonstrueerimise ja nivelleerimise juhend. 2006.

Meriväylätutkimusten yleisohjeet. Tie-ja vesirakennushallitus, Helsinki, 1986.

NIST (US National Institute of Standards and Technology) web site. 2005. http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/index.html

http://www.bathyswath.com/bathymetric-systems-comparison, 2015.

http://msd.com.ua/elektrogidravlicheskij-effekt-i-ego-primenenie-v-promyshlennosti/e..., 2015.

http://www.ut.ee/BGMM/yldine_geoloogia/koikuvad.html, 2016.

https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_Identification_System, 2016.

http://www.coastlinesurveys.co.uk/

http://research.omicsgroup.org/index.php/Multibeam_echosounder.html

http://users.ece.utexas.edu/~bevans/courses/ee382c/lectures/12_pn/allen/Beamforming/ 2016.

K. Olev. Inglise-eesti-vene meresõnastik. Tallinn, Valgus, 1981.

D. Parker, D. A. Mallace. Direct Comparison of the Motion Sensors' Performance from the 2005 Common Dataset. Shallow Survey 2005. 4th international conference high resolution surveys in shallow water. The United Kingdom. Hydrographic Office.

PCTMSL (Permanent Committee on Tides and Mean Sea Level). Australian Tides Manual. Special Publication №9, 2011.

T. Plank. Füüsikalised üld- ja elektrimõõtmised. Loengukonspekt. Tartu, 2001.

O. van Poelje. Coastal Navigation by Station pointer & the Snellius resection. // Journal of the Oughtred Society (2013) 1 (22).

H. Potter, I. Treikelder. Geodeesia ja kartograafia läbi aegade. TEA Kirjastus, 2011.

M. Poutanen. GPS-paikanmääritys. Helsinki, URSA, 1999.

A. Reihan, E. Loigu. Vooluhulga mõõtmise juhend. TTÜ, Tallinn, 2012.

Ritchie S. et al. As it Was. GITC bv, Lemmer, The Netherlands, 2003.

RSS-2-300 W Surface Flow Velocity Radar. http://www.geolux-radars.com/portfolio-items/rss-2-300-w-flow-se...

A. Rüdja, J. Sander. Globaalne asukohamääramine. Tallinn, SA Innove, 2013.

SeaBeam Instruments. Multibeam sonar. Theory of Operation. L-3 Communications SeaBeam Instruments, 2000.

A. Sărăcin, A. Calin. Bathymetric measurements – principles and utility.// International Journal of Energy and Environment (2014) 8.

W. H. F. Smith, D. T. Sandwell. Conventional Bathymetry, Bathymetry from Space, and Geodetic Altimetry.//Oceanography No. 1/2004.

J. P. Snyder. Map Projections - A Working Manual. Washington, 1987.

J-M. Zogg. GPS. Essentials of Satellite Navigation. Compendium. 2008.

TEA entsüklopeedia, 2. kd. Tallinn, 2009.

W. Torge, J. Müller. Geodesy. Berlin, de Gruyter GmbH, 2012.

A. Torim. Riiklikud kõrgussüsteemid.// Geodeet (2013) 43.

O.S. Torstein. Seafloor Depth Estimation by means of Interferometric Synthetic Aperture Sonar. A dissertation for the degree of Ph Dr. University of Tromsø, 2010.

A. Tšebotarjov. Geodeesia I. Tallinn, ERK, 1959.

B. Tšerkašeninov. Väikelaevade juhtimine. Tallinn, Valgus, 1977.

TTÜ Eesti Mereinstituut. Saaremaa süvasadama võimalike asukohtade hüdrodünaamilised ja geoloogilised uuringud. Teaduslik-tehniline aruanne (käsikiri). Tallinn, 2000.

USGS. https://water.usgs.gov/edu/streamflow2.html, 2017

K. Vahter. Aerolasermõõdistamine (käsikiri). Eesti Veeteede Amet. Tallinn, 2005.

K. Vahter. Mõõdistamine paljukanalilise kajaloodiga Hobulaiu juures. Diplomitöö (käsikiri). Eesti Mereakadeemia. Tallinn, 2001.

E. Vahtmäe, T. Kutser. Kaugseire Eestis. Artiklikogumik. Keskkonnaministeeriumi Info- ja Tehnokeskus. Tallinn, 2008.

Veeteede Amet. Inglise-eesti meresõnaraamat. Tallinn, 2008.

Veeteede Amet, autorite kollektiiv: A. Heinsaar, M. Hunt, H-E. Kuusk, S. Keevallik, T. Kõuts, J. Lutt, L. Mõtlik, V. Mäss, E. Oja, U. Raudsepp, R. Sepp, L. Sipelgas, T. Soomere, M. Väling. Eesti Lootsiraamat, Tallinn, 2003.

P. Väling. Meremõõdistustehnika Eesti Veeteede Ametis. Eesti Veeteede Amet, Tallinn, 2005

WHSC Bathymetry systems. http://woodshole.er.usgs.gov/operations/sfmapping/swath.htm, 2014.

А. Белобров. Гидрография моря. Москва, Транспорт, 1964.

Г. Глотов. Курс инженерной геодезии. Москва, Недра, 1972.

О. Климов. Основы инженерных изысканий. Москва, Недра, 1974.

Н. Коломийчук. Гидрография. МО СССР, ГУНиО, 1975.

ПГС №35. УНГС ВМФ, 1956. Приведение глубин к уровню.

ПГС №37. МО СССР, ГУНиО, 1989. Развитие аналитических сетей.

ПГС №5. МО СССР, ГУНиО, 1989. Составление и издание морских карт и карт внутренних водных путей.

ПГС №4. МО СССР, ГУНиО, 1984. Съемка рельефа дна.

Г. Файн. Навигацня, лоция и мореходная астрономия. Москва, Транспорт, 1989.

AINEREGISTER

abrasioon
  keemiline 34
  mehaaniline 33
  termo- 34
absoluutne mõõtmishälve 115
abüssaalne 39, 220
aerolasersondeerimine (ALS) 52, 271
AIS 45
aktseleromeeter 178
akustiline geolokatsioon 287
algmeridiaan 55
algtundmatu 129
almukantaraat 59
AMS 227, 238
Amsterdami null 67
Apertuur 157
ARC/INFO 242
aruandeplanšetid 227
astenosfäär 22
astronoomilised koordinaadid
  astronoomiline laius 56
  astronoomiline pikkus 56
AUV 159
Baltimaade normaalkõrguste süsteem (BKN-77) 67
beamformer 149
Beidou 125
bilineaarne interpolatsioon 244
bit 128
bluetooth 128
boor 87
C/A (*Coarse Acquisition*) kood 125
Coppensi valem 183
deflatsioon 33
Delaunay kriteerium 243
Del Grosso valem 183
delta 28
detsibell 145
DGNSS 108, 126
different 181
diskreetimine 158
DOP 125
ECDIS 43
efemeriidid 108
EGNOS 127
eksaratsioon 33
eksogeensed jõud 32
  biogeensed 35
  gravitatsioonilised 35
  hüdrogeensed 33
elavlõige 292
ellipsoidilised koordinaadid 56
ellipsoidid
  WGS-84 54
  GRS-80 54
endogeensed jõud 32
epohh 129
erimõõtkava 58
erosioonibaas 25
esinduslik sügavuspunkt 241
EST GEOID 2011 104
estuaar 24
EUREF EST 97 104
eustaatiline tasemekõikumine 32
faarvaater 290
faasipseudokaugused 125
fotomeetriline meetod 270
GALILEO 108
geodeetilised koordinaadid 54, 56
geodeetiline kõrgus 69
geodeetiline laius 56
geodeetiline pikkus 56
geograafiline laius 55
geograafiline pikkus 55
geoid 55
geoidi kõrgus 104
geomorfoloogia 28
GeoNET 127
georiftogeen 33
geotektuurid 29
geotsentrilised ristkoordinaadid 56
GIS 247

GLONASS 108
GNSS 43, 108
GNSS kommertssüsteemid 126
GNSS tugujaam 108, 127
GPRS 128
granulomeetriline koostis 284
Greenwichi algmeridiaan 55
HadNET 127
halokliin 171
harmoonilised konstandid 88
harujõgi 290
helikiiruse gradient 186
helikiiruse mõõtesond 185
histogrammide meetod 216
hüdrofon 148
hüdrogeensed protsessid 33
hüdrograafialaev 19
hüdrograafiline traal
  hüdroakustiline – 273
  mehaaniline jäik – 273
  mehaaniline paind – 274
  mehaaniline pooljäik – 274
hüdrosfäär 20
IHO 16
IHO standard №44 208
IMO 45
inertsiaalne mõõtmismoodul (IMU)
  ehk inertsiaalsensor 130, 178
interferomeetrilised süsteemid 155
isobaat 43
isogoon 112
isostaatiline 21
jalam 30
juga 27
jõeharu 290
jõe nullsügavused
  leppetase 295
  madalate navigatsioonitasemete
  keskmine 295
  projekteeritud tase 295
jõe looklevustegur 27
jõestik 25
jõe suudmeala 290
jõesäng 289
jõesängi karedustegur 305
jõe tasemevaatluspostid 295
jõgi 24
jõgikond 25
järved 21
kaardikoordinaadid 136
kaardiprojektsioonid
  asimuudiline 58
  asimuudiline konformne 59
  ekvidistantne 57
  ekvivalentne 57
  Gaussi-Krügeri põiksilindriline
  konformne 59
  gnoomoniline 59
  kald- 57
  konformne 57
  konventsionaalne 57
  kooniline 57
  Mercatori põiksilindriline
  konformne 59
  Mercatori püstsilindriline
  konformne 58
  polaar- 57
  põik- 57
  silindriline 57
  stereograafiline 59
kaardiühik 229
kajagramm 145
kajatraalid 51, 161
kalibreerimine 180,200
kallas 21, 24, 38
kardinaalsed märgid 65
kaugusvahede isojoon 113
keskmine ruuthälve (KRH) 115
keskväärtus 115
kiire jälgpind 147
kiiremoodustajad süsteemid 149
kiirstaatiline GNSS 130
kilomeetrivõrk 276
kliirens 207
kohamäärangu meetodid
  astronoomilised 109
  hüdroakustilised 109
  raadionavigatsioonisüsteemidega

(RNS Decca, Omega, Alfa, Loran C, Tšaika, Trisponder, Syledis, Artemis) 108
nurgaline otselõige 119
polaarmeetod 121
satelliitgeodeesia 108, 124
vahetu vaatlus 107, 119
koherentne 150
konsistents 288
koodipseudokaugused 125
koostenihe 200
korrelatsioonikordaja 116
kosk 27
kreen 181
Kremer, Gerhard 13
kriging 245
Kroonlinna veemõõdulati null 67
kuup–ahendamine 244
kuupsplain 98
kvaasigeoid 69
kvadrant 16
kvadratuurlooded 85
kõrge kõrgvesi HHW 86
kõrge madalvesi HLV 86
kõrgpääsfilter 178
kõrgusanomaalia 68
kärestik 27
külgliistak 152, 167
küngas 28
lamm 26, 289
lateraalsed märgid 65
laugmik 290
lausmõõdistamine 209
league 13
lehvikkajalood 51
leetseljak 280
leppetase 295
limaan 24
lisajõgi 25
lohk 28
loksodroom 58
loode amplituud 86
loodelaine hilistumine 88
loodelaine komponendid 88
loodete tüübid
ebakorrapärane 89
korrapärane 89
pooleööpäevane 89
ööpäevane 89
loode tõus 86
loode ulatus 86
loode taandamiskordaja 88
loodjoon 56
lõike baasjoon 123
maailmatelg 85
maakoore tektooniline liikumine 81
madal kõrgvesi LHW 86
madal madalvesi LLW 86
madalpääsfilter 178
majakas
programm- 65
vastaja- 65
mandrilaamad 21
mandrilava 36
MBES 51,142, 149
MBSS 142
meander 25
mere nulltaseme liigid
keskmine tase 70
madalaim astronoomiline tase 70, 91
madalaim teoreetiline tase MTT 70
süsüügialoodete madalvee keskmine tase 70
süsüügialoodete madalvee madalaim tase 70
kõigi madalvete keskmine tase 70
mere regressioon 32
mere transgressioon 32
Mercator, Gerardus 13
meridionaalosa 58, 229
moho 22
morfograafia 30
morfomeetria 31
morfoskulptuurid 29
morfostruktuurid 29
MTS 151
muundurantenn 131
mõõdetud väärtus 115

mõõdistamine
  detailne 285
  diskreetne- 209
  laus- 209
  üld- 284
  üksikasjalik 285
mõõn 86
mõõtemääramatus 113
mõõtmishälbed
  absoluutsed 115
  juhuslikud 114
  jämedad 113
  süstemaatilised 114
mõõtmissessioon 129
mäe
  ahelik 28
  hari 30
  jalam 30
  tipp 30
mägi 30
navigatsioonioht 211
navigatsiooniparameeter 109
navigatsioonisõnum 125
NAVSTAR GPS 124
nivoopind 68
normaalkõrgus 68
normaaltase 77
nullisobaat 24
nulltase, nullnivoo 68, 143
nõgu 28
nõlv 30
nõlva kalle 30
olulisuse nivoo 266
ookeanisüvik 38
org 28
  kanjon- 26
  kuristik- 26
  lamm- 26
  lõhang- 26
  mold- 26
  sälk- 26
  säng- 26
orogeenne vöönd 33
ortodroom 58
ortomeetriline kõrgus 68
ortodroomiline ordinaat 135
ortodroomiline parand 134
OTF (*On the Fly*) 127
paak 65
pank 258
parand 115
Patch test 200
PDBS 155
PDOP kordaja 125
peajõed 25
pealiistak 149, 167
peamõõtkava 58
peaparalleel 227
periplus 10
pidevarvutus 281
piesoelektriline muundurantenn 143
ping 163
pinnase ammutamise seadmed
  draag 286
  käsisond 286
  põhjakopp 285
  väike kopp 286
  proovivõtturid 286
pinnasejaam 285
pinnavormide suurusrühmad
  planetaarsed vormid 29
  megareljeef 29
  makroreljeef 29
  mesoreljeef 30
  mikroreljeef 30
  nanoreljeef 30
pinnavormide tekkerühmad
  akvaglatsiaalsed 29
  antropogeensed 29, 35
  biogeensed 29, 35
  eluviaalsed 29
  eoolsed 29
  fluviaalsed 29
  fütogeensed 29
  geoloogilised 29
  glatsiaalsed 29
  glatsiofluviaalsed 29
  gravitatsioonilised 29, 35
  karstilised 29
  kosmogeensed 29

krüogeensed 29
kuhje- 29
kulutus- 29
kulutus-kuhje- 29
limnoglatsiaalsed 29
mariinsed 29
organogeensed 29
skulptuursed 29
zoogeensed 29
plaaniline alusvõrk 277
portolaan 10
PPP 126
projektlaev 53, 273
protraktor 15
psu 22
põhjakalde gradient 188
põhjakihtide profileerija 153
põhjareljeefi võrdluse planšett 237
põikmadal 290
põliskallas 289
pärispinnas 282
püsitase 77
püsitooder 65
rannajoon 39
rand 39
randla 39
rannik 39
rannanõlv 37, 39
ranna tugipunktid
kilp 62
post 62
prisma 62
püramiid 62, 63
signaal 62, 63
tähis 62
rannavöönd 39
rannik
astang- 42
dalmaatsia 41
delta- 41
fjord- 41
korall- 41
kulutus-kuhje 40
käänuline (looklev) 41
laguun- 41
laheline 41
liiva- 39,42
limaan- 41
mangroov- 42
murrutus 39
pank- 39, 42
riias- 41
skäär- 41
saareline 41
sääreline 41
sirge 41
õgvendunud 41
rastermudel 242
referentsellipsoid 55
reljeefi struktuurijooned
–lokaalsed 257
–regionaalsed 257
piirjooned 256
telgjooned 256
regressioonivõrrandite meetod 216
riftiorg 39
RTCM 127
RTK GNSS 108, 127
ruhiorg 258
saarkaar 38
sageduse andur 178
satelliidi lukustus 129
satelliitaltimeetria 142
SAS 158
SBES 141
Seastar 126
Secchi ketas 272
Secchi sügavus 272
seegamine 150, 278
seismoakustiline profileerimine 287
seismomeetria 287
sekstant 16
seljak 28
setted
biogeensed 283
aleuriitsed 37
kemogeensed 283
peliitsed 37
terrigeensed 283
vulkaanilised 283

sferoid 54
sferoidilised koordinaadid 56
sfäärilised koordinaadid 56
sfääriline laius 56
sfääriline pikkus 56
sima 22
skanner 271
Snelliuse valem 192
SNR 159
SOLAS 45
sonar 142
sonari võrrand 145
soot 27
splain 245
staatiline GNSS 129
stadiomeetriline samajoon 112
standardhälve 115
Starfire 126
station pointer 15
statistilised jaotused
  normaaljaotus 114
  t ehk Studenti jaotus 114
  χ^2-jaotus 114
stereofotogrammmeetriline meetod 270
stereopaar 270
suletis 288
suudmeala rannikumeri 290
swath echo sounders 51, 149
sweep systems 51, 149
süstemaatiline jääkhälve 118
süsüügialooded 70
süvasäng 290
šelf 36
taevaekvaator 85
taevakeha kääne (deklinatsioon) 85
talveg 256
tareerimine 180
tareerimiskilp 182
tasakaaluprofiil 289
tasemevaatluspostid
  ajutised 72, 296
  alalised 71, 295
  täiendavad 71
terrestriline 142
TIN–mudel 243
tegelik (mere) tase 76
tekstuur 288
tektooniline liikumine 32
telluroid 68
termokliin 171
TKM 208
towfish 162
TPM 208
traalimishalss 275
traalimisplanšett 275
traalimisriba 275
traalimissügavus 275
transducer 131
transformne murrang 33, 258
transponder 131
trendipind 245
tsüklivääratus 129
tulepoi 65
TUV (*Towed Underwater Vehicle*) 163
tõeline väärtus 113
tõusutegur 92
tõenäoseim väärtus 115
tööplanšetid
  halsside- 226
  sügavuste- 226
vabadusastmete arv 117
vahemikhinnang 116
valgala 25
GNSS vastuvõtja lukustus 129
veebilansi muutus 80
veehoidlad 24
veetaseme eustaatiline kõikumine 32
vektorkaart 246
vesikond 25
voolukiiruse mõõtur 293
VTS 44
VTSP 298
vürst Albert I 16
ääremere häil 38
üheaegne sidumine 299
ühepäevane sidumine 299
WAAS 127
Wilsoni valem 183

Vello Kala (23.09.1935 Tallinn) on lõpetanud 1974. aastal Moskva Geodeesia, Kartograafia ja Aerofoto Inseneride Instituudi (tänapäeval Moskva Riiklik Geodeesia ja Kartograafia Ülikool). 1974–1993 oli ta nii Ehituse Projekteerimise ja Tehnoloogia Instituudi peageodeet kui ka Ehitusministeeriumi peageodeet, seejärel töötas lektorina Eesti Mereakadeemias. 1997 kaitses ta MSc teadusliku kraadi Tallinna Tehnikaülikoolis. Samast aastast alates on ta olnud õppejõud Tallinna Tehnikaülikoolis ja Eesti Mereakadeemias. Vello Kala on õpetanud hüdrograafia aluseid, hüdrograafia praktikat, vesiehitiste ehitusuuringute aluseid, kõrgemat geodeesiat, kartograafiat, ehitusgeodeesiat, mõõtmiste andmetöötluse teooriat. Ta on ligi 50 publikatsiooni autor ja kaasautor ning esinenud ettekannetega rahvusvahelistel teaduskonverentsidel.