

TalTech Kuressaare kolledž

## **Meretehnika ja laevaehitus rakendusõppekava**

Õppeaine ECK0530 Laevasüsteemid

Mereseire moodul

**Õppematerjal on loodud KIK projekti RE.4.07.23-0046 „Efektiivne mereseire kestlikus sinimajanduses“ raames**

Ruttar Teär

2025

# Sisukord

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Seire .....                                                               | 3  |
| Allveeuuringud .....                                                      | 4  |
| Hüdrofüüsikalised uuringud .....                                          | 4  |
| Batümeetrilised ja geofüüsikalised uuringud .....                         | 5  |
| Bioloogilised ja ökoloogilised uuringud .....                             | 5  |
| Keemilised ja biogeokeemilised uuringud .....                             | 5  |
| Arheoloogilised ja kultuuripärandi uuringud .....                         | 6  |
| Insenertehnilised ja infrastruktuuriuuringud .....                        | 6  |
| Autonoomsete süsteemide ja robotika uuringud .....                        | 6  |
| Reostuse ja riskikeskkonna uuringud .....                                 | 6  |
| Andurite ehk sensorite roll mereuuringutes .....                          | 7  |
| Füüsikaliste parameetrite sensorid .....                                  | 7  |
| Keemilised sensorid ja vee koostise analüüs .....                         | 8  |
| Bioloogilised ja akustilised sensorid .....                               | 8  |
| Proovivõtjad ja käsitsi kogutav materjal .....                            | 8  |
| Sensorite ja proovivõtjate integratsioon autonoomsetes platvormides ..... | 9  |
| Sonar .....                                                               | 9  |
| Sonari Ajalugu .....                                                      | 9  |
| Aktiivsed ja passiivsed sonarid .....                                     | 10 |
| Sonari võrrandid .....                                                    | 11 |
| Sonarite tüüpe .....                                                      | 12 |
| Allveerobotite tehnoloogia .....                                          | 14 |
| Allveerobotite roll seiretegevustes .....                                 | 14 |
| Allveerobotitega teostatavad seiretüübid .....                            | 14 |
| Tehnoloogia eripärad .....                                                | 16 |

## Seire

**Seire** kujutab endast süstemaatilist ja korduvat andmete kogumise ning tõlgendamise protsessi, mille eesmärk on mõista uuritava süsteemi seisundit ja selle muutumist ajas. Sellise protsessi tõhusus sõltub eeskätt selgelt määratletud eesmärgist, mis raamib kogu seireprogrammi ülesehitust ning juhib otsust selle üle, milliseid parameetreid on vaja mõõta. Täpselt sõnastatud eesmärk tagab, et seire on sihipärane ega muutu juhuslikuks andmekogumiseks, vaid peegeldab uuritava nähtuse olemuslikke omadusi.

Samavõrd oluline on standardiseeritud metoodika, mis võimaldab tagada mõõtmiste võrreldavuse nii ajas kui ka ruumis. Ühtsed mõõteprotokollid, mõõteseadmete kalibreerimine ning proovivõtu tingimuste kontroll on vajalikud selleks, et seireandmed peegeldaksid tegelikke muutusi, mitte metoodika kõikumisi. Standardiseeritud lähenemine loob aluse usaldusväärsele analüüsile, mida kasutatakse nii teadusuuringutes kui ka rakenduslikes seireprogrammides.

Seire essentsiaalseks tunnuseks on ajas korduv mõõtmine. Perioodiline andmekogumine võimaldab tuvastada nii aeglasi kui ka järske muutusi, eristada juhuslikke kõikumisi pikaajalistest trendidest ning hinnata, kas süsteem liigub stabiilsuse või kriitilise muutuse suunas. Korduvatel vaatlustel põhinev ajarida loob alusandmestiku, mille põhjal saab hinnata süsteemi dünaamikat ja vastust erinevatele häiringutele.

Kogutud andmete analüüs ja tõlgendamine moodustab seireprogrammi lõppfaasi, milles tehakse järeldusi süsteemi seisundi ning selle arengu kohta. Statistiliste meetodite, mudelite ja võrdlusbaaside toel hinnatakse nii uuritava objekti hetkeseisu kui ka prognoositakse tulevikuolukorda. Tõlgendatud seireandmed ei ole pelgalt kirjelduslikud, vaid neil on kriitiline roll otsuste tegemisel ning riskide hindamisel.

Seire täidab mitut funktsiooni, mis on olulised nii teadusliku uurimise kui ka praktilise haldamise seisukohalt. Esmalt võimaldab seire hinnata uuritava süsteemi hetkeseisundit, võrreldes mõõtetulemusi normtasemetega või ajalooliste andmetega. Teiseks toetab seire riskide ja ohtude varajast tuvastamist, aidates märgata kõrvalekaldeid enne kriitilise olukorra kujunemist. Kolmandaks loob see aluse trendianalüüsile, mis paljastab pikaajalised suundumused ja süsteemi käitumismustrid. Neljandaks on seireandmed vajalikud juhtimisotsuste tegemisel, pakkudes tõenduspõhist alusinfot poliitiliste, majanduslike, keskkonna- või tehnoloogiaotsuste kujundamiseks.

Akadeemilises kirjanduses eristatakse mitmeid seirevorme, mis erinevad nii eesmärkide kui ka metoodika poolest. Keskkonnaseire on suunatud looduslike protsesside ja parameetrite, nagu vee, õhu, pinnase või eluslooduse seisundi

jälgimisele. Tehniline või tööstuslik seire keskendub insenertehniliste süsteemide, konstruktsioonide või masinate seisundi hindamisele, hõlmates näiteks vibratsiooniseiret või autonoomsete platvormide töökindluse jälgimist. Bioloogiline seire on suunatud populatsioonide ja ökosüsteemide toimimise uurimisele, pakkudes infot liigirikkuse ja ökosüsteemi terviklikkuse kohta. Operatiivne seire on seevastu reaalajas toimuv jälgimisprotsess, mida kasutatakse näiteks navigatsiooni-, ohutus- ja autonoomsete süsteemide hetkeseisundi hindamiseks.

Mereteaduse ja autonoomsete laevade kontekstis omandab seire erilise praktilise tähenduse. Siin tuginetakse sageli sensorvõrkudele, autonoomsetele mõõteplatvormidele ja integreeritud andmesüsteemidele, mis koguvad infot veekvaliteedi, batümeetriliste ja hüdrodünaamiliste tingimuste, navigatsiooniohtude ning laevade tehnilise seisundi kohta. Samuti on seire keskne komponent autonoomsete laevade situatsiooniteadlikkuse tagamisel, võimaldades süsteemidel tajuda ümbritsevat keskkonda ning langetada ohutuid ja optimeeritud otsuseid. Selline andmekeskond toetab nii teadusuuringuid kui ka operatiivseid tegevusi, luues aluse mereruumide tõhusaks haldamiseks ja autonoomsete platvormide ohutuks tööks.

## Allveeuuringud

Allveeuuringud moodustavad ulatusliku, interdistsiplinaarse teadmiste valdkonna, mille eesmärk on kirjeldada, mõista ja hinnata merealuste protsesside, elupaikade, geoloogiliste struktuuride, tehniliste rajatiste ja autonoomsete süsteemide toimimist. Uuringute ulatus varieerub lokaalsest objektipõhisest seirest kuni ookeaniüleste protsesside modelleerimiseni. Iga uurimisliigi eripära määravad uuritava nähtuse ruumiline ja ajaline dünaamika, kasutatavad mõõtetehnoloogiad ning vajalik andmete eraldusvõime. Järgnevalt antakse süstemaatiline ülevaade olulisematest allvee-uuringute kategooriatest koos neid iseloomustavate meetodiliste ja tehnoloogiliste alustega.

## Hüdrofüüsikalised uuringud

Hüdrofüüsikalised uuringud keskenduvad vee füüsikaliste omaduste ja liikumisprotsesside mõistmisele. Nende keskmes on mere temperatuuri- ja soolsusstruktuur, hoovuste režiim, kihistumise astmed, üles- ja allavoolud, turbulents ning termohaliinsed protsessid, mis kujundavad nii kohalikke kui ka regionaalseid keskkonnatingimusi. Uuringute läbiviimiseks kasutatakse eeskätt kõrge täpsusega mõõteseadmeid, sealhulgas elektrijuhtivust, temperatuuri ja sügavust mõõtvaid CTD-sonde, akustilisel Doppleri meetodil töötavaid hoovusmõõtjaid ning autonoomseid ujuvplatvorme, mis võimaldavad koguda pikaajalisi ajariidu sügavuti kihistunud veesambast. Kaasaegsed autonoomsed gliderid ja AUV-platvormid võimaldavad luua kõrge ruumilise resolutsiooniga

hüdrodünaamilisi kaarte, mis on olulised nii teaduslikus uurimistöös kui ka praktiliste navigatsioonimudelite koostamisel.

### Batümeetrilised ja geofüüsikalised uuringud

Batümeetria ja allvee-geofüüsika tegelevad merepõhja struktuuri ja geoloogiliste protsesside kirjeldamisega. Batümeetrilised uuringud keskenduvad merepõhja reljeefi täpsele määramisele, mis on vajalik nii teaduslikuks analüüsiks kui ka navigatsiooni ja sadamainfrastruktuuri planeerimiseks. Uurimistöö põhivahendeiks on mitme kiirelistel helisonaritel põhinevad süsteemid, mis võimaldavad luua kolmemõõtmelisi põhjakaarte suure ruumilise täpsusega. Geofüüsikalised uuringud ulatuvad sellest veel sügavamale: sub-bottom profiler'id võimaldavad kirjeldada settekihi sisemist kihistust, magnetomeetrilised ja gravimeetrilised mõõtmised tuvastavad geoloogilisi struktuure ning külgskaneerivad sonarid paljastavad pinnaststruktuuri ja objektid, mis võivad jääda visuaalse vaatluse eest varjule. Autonoomsed sõidukid on muutnud selle valdkonna eriti dünaamiliseks, võimaldades täpset kaardistamist ka keerukates ja sügavates merepiirkondades.

### Bioloogilised ja ökoloogilised uuringud

Bioloogilised allvee-uuringud keskenduvad ökosüsteemide struktuurile, organismide ja populatsioonide jaotusele ning elupaikade seisundile. Uuringute meetodika tugineb nii visuaalsele kui ka akustilisele andmekogumisele. ROV- ja AUV-platvormid võimaldavad saada kõrglahutusega videopilte ja fotogrammemeetrilisi mõõtmisi elupaikade detailseks kaardistamiseks. Kaasaegses mereteaduses on üha olulisem roll eDNA-põhistel meetoditel, mis võimaldavad määrata liikide olemasolu vees esineva geneetilise materjali järgi. Akustilised kaamerasüsteemid, näiteks DIDSON ja ARIS, võimaldavad tuvastada organisme ka olukorras, kus nähtavus on piiratud. Samuti kasutatakse akustilist seiret zooplanktoni, kalaparvede ja muude bioloogiliste objektide ruumilise jaotuse hindamiseks. Sellised uuringud annavad sügavuti ulatuva ülevaate ökosüsteemide seisundist ja nende muutumisest ajas.

### Keemilised ja biogeokeemilised uuringud

Keemilise koostise ja biogeokeemiliste protsesside uurimine on keskne mere ökoloogilise toimimise mõistmiseks. Need uuringud käsitlevad hapniku ja süsiniku tsüklit, toitainete kontsentratsioone, reostuskoormust ja nende muutusi. Sageli kombineeritakse in situ-sensoreid (näiteks hapniku, pH, redokspotentsiaali ja nitraadi mõõtjate) ning laboratoorse analüüsi meetodeid, nagu kromatograafia ja massispektromeetria. Kaasaegsed autonoomsed mõõteplatvormid võimaldavad luua keemilisi profiile suure ruumilise ja ajalise tihedusega, mis on vajalik nii ökoloogiliste protsesside modelleerimiseks kui ka reostuse varajaseks avastamiseks.

## Arheoloogilised ja kultuuripärandi uuringud

Allveearheoloogia uurib uppunud laevu, muistisi ja inimtegevusest jäänud struktuure. Selle valdkonna eripäraks on vajadus kombineerida geofüüsikalisi mõõtmisi ja visuaalseid dokumenteerimistehnikaid. Külgskaneeerivad sonarid võimaldavad tuvastada merepõhjal olevaid objekte, magnetomeetrid aitavad leida setete all peituvaid metallkonstruktsioone ning ROV-põhine fotogrammeetria võimaldab luua kolmemõõtmelisi mudeleid kultuuripärandi objektidest. Selline lähenemine tagab, et veealused arheoloogilised leiukohad dokumenteeritakse teaduslikult põhjendatud ja detailse täpsusega.

## Insenertehnilised ja infrastruktuuriuuringud

Tehnilised ja infrastruktuuripõhised uuringud hõlmavad torustike, kaablite, sadamarajatiste, meretuuleparkide ja teiste veealuste konstruktsioonide seisundi hindamist. Uuringud on suunatud nii ohutuse tagamisele kui ka konstruktsioonide eluea prognoosimisele. ROV-põhised inspeksioonid on laialdaselt kasutusel korrosiooni, mehhaaniliste kahjustuste ja konstruktsiooniliste defektide tuvastamiseks. Katoodkaitsesüsteemide monitooring, akustilised defektituvastuse meetodid ning täppispositsioneerimise lahendused (USBL ja LBL) võimaldavad luua tervikliku pildi veealuste rajatiste seisundist ja nende muutumisest.

## Autonoomsete süsteemide ja robotika uuringud

Autonoomsete allveesõidukite arendamine on viimastel aastatel kujunenud üheks kiiremini arenevaks allvee-uuringute suunaks. Uurimused keskenduvad GNSS-vabas keskkonnas toimiva navigatsiooni, sensorite integratsiooni, masinnägemise ja autonoomse otsustusloogika arendamisele. AUV-platvormid võimaldavad nii süvavee kaardistamist, hüdrograafilist seiret kui ka tehniliste objektide ülevaatust. Autonoomse navigatsiooni aluseks on akustilised positsioneerimissüsteemid, inertsimõõteseadmed ja Doppleri kiiruslogid, mida sageli ühendatakse masinõppemeetoditega objektide ja mustrite tuvastamiseks sonaripildil.

## Reostuse ja riskikeskkonna uuringud

Reostuse ja ohtlike ainete leviku uurimine käsitleb nii ajutisi kui ka püsivaid keskkonnariske. Selle valdkonna uuringud on tihedalt seotud nii keemiliste analüüside kui ka akustiliste ja optiliste kaugseiremeetoditega. Fluoromeetrid on olulised naftareostuse avastamisel, keemilised ja biosensorid võimaldavad jälgida toksilisi aineid ning sonaripõhised süsteemid koos tehisintellektiga aitavad tuvastada mereprügi, setetesse akumulunud reostust ja teisi ökoloogilisi ohte.

Sensorid ja proovivõtjad moodustavad mereuuringute ja allvee-seire tehnoloogilise tuumiku, võimaldades koguda andmeid keskkonnaprotsesside, veealuste struktuuride ja bioloogiliste süsteemide kohta. Nende rakendamine ulatub

kvantitatiivsetest hüdrofüüsikalistest mõõtmistest kuni keemilise ja bioloogilise koostise analüüsi ning tehniliste rajatiste seisundi hindamiseni. Sensorite ja proovivõtjate areng on viimastel aastakümnetel kiirenenud, toetudes autonoomsele robotikale, kõrgresolutsioonilisele akustikale, keemilisele mikrosensoornikale ning reaajas andmetötlusele. Käesolev peatükk annab ülevaate sensorite ja proovivõtjate põhiklassidest, nende tööpõhimõtetest ning rakenduslikust kasutusest allvee-uuringutes.

## Andurite ehk sensorite roll mereuuringutes

Sensorid on seadmed, mis mõõdavad keskkonna füüsikalisi, keemilisi või bioloogilisi parameetreid ning teisendavad need digitaalseks või analoogseks signaaliks. Sensorite põhiülesanne on pakkuda objektiivset, standardiseeritud ja reprodutseeritavat teavet uuritava süsteemi seisundi kohta. Mereuuringutes on sensorite kasutamine hädavajalik, sest veealune keskkond ei ole otsese vaatluse jaoks kättesaadav ning muutub ajas kiiresti ja dünaamiliselt.

Sensorid jagunevad tavaliselt kolme põhikategooriasse: füüsikaliste parameetrite mõõtjateks, keemilisteks sensoriteks ja bioloogilisteks anduriteks. Füüsikaliste sensorite hulka kuuluvad näiteks elektrijuhtivuse, temperatuuri, rõhu, kiiruse, vibratsiooni ja kiirendusandurid. Keemilised sensorid võimaldavad määrata vee koostist, sealhulgas hapniku kontsentratsiooni, pH-taset, redokspotentsiaali ja erinevaid lahustunud toitaineid. Bioloogilised andurid hindavad organismide esinemist, biomassahte või bioloogilisi signaale, mis on seotud elusühikute ainevahetusega. Sensorite rakenduslik potentsiaal on viimastel aastatel laienenud ka masinõppepõhise töötamise ja autonoomse juhtimise kaudu, võimaldades käsitleda suuremahulisi ja keerukaid andmekogumeid reaajas.

## Füüsikaliste parameetrite sensorid

Füüsikalisi sensorite klasse on palju, kuid mereuuringute seisukohalt on kõige olulisemad need, mis mõõdavad vee põhjatõdetavaid omadusi ja liikumisprotsesse. Elektrijuhtivuse, temperatuuri ja sügavuse mõõtmine (CTD) on keskne meetod vee kihistumise, soolsuse ja termohaliinsüsteemi uurimiseks. Akustilisel Doppler-efektil põhinevad hoovuseandurid (ADCP) võimaldavad määrata hoovuste kiirust ja suunda kogu veesamba ulatuses. Rõhuandurid mängivad võtmerolli nii sügavuse määramisel kui ka lainetuse ja veetasemete dünaamika hindamisel.

Lisaks kasutatakse täppisrõhu- ja vibratsioonisensoreid tehniliste konstruktsioonide seireks, inertsimõõteseadmeid (IMU) autonoomsete sõidukite liikumise määramiseks ning optilisi ja akustilisi kaugseiresüsteeme elupaikade ja põhjaobjektide kaardistamiseks. Füüsikalised sensorid on sageli integreeritud suurematesse mõõteplatvormidesse, nagu glider-id, AUV-d ja ankrupoidega varustatud seirepoid, mis võimaldavad ruumiliselt ulatuslikku vaatluste võrgustikku.

## Keemilised sensorid ja vee koostise analüüs

Keemilised sensorid võimaldavad hinnata vee kvaliteeti ja biogeokeemilisi protsesse nii pinnakihi kui ka süvavees. Hapniku kontsentratsiooni mõõtmiseks kasutatakse kas elektrokeemilisi sonde või optilisi (luminofoorsel kustumisel põhinevaid) sensoreid. Nitraadi, fosfaadi ja teiste anioonide määramiseks kasutatakse spektromeetrilisi ja elektrokeemilisi meetodeid, mis sobivad pikaajaliseks autonoomseks seireks. pH-sensorid ja redokspotentsiaali mõõturid võimaldavad jälgida keemilise tasakaalu muutumist, mis võib viidata nii looduslikele protsessidele kui ka antropogeensele koormusele.

Keemiliste sensorite areng on liikunud miniaturiseerimise ja autonoomse töö suunas, mis võimaldab neid paigutada nii väikestele AUV-dele kui ka sensorivõrkudesse, mis tegutsevad pikaajaliselt ilma otsese hoolduseta. Samal ajal kasutatakse endiselt ka klassikalisi proovivõtumeetodeid, kuna laboratoorne analüüs tagab maksimaalse täpsuse eriti keerukate ühendite korral.

## Bioloogilised ja akustilised sensorid

Bioloogiliste protsesside uurimiseks kasutatakse nii optilisi kui ka akustilisi sensoreid. Optilised fluorestsentsisensorid võimaldavad määrata klorofüllü kontsentratsiooni ning hinnata primaarproduktiivsust. Akustilised kaamerad, kõrgsageduslikud sonarid ja hajumist mõõtvad süsteemid võimaldavad jälgida loomastiku ruumilist jaotust ka väheste nähtavuse tingimustes. Uuema põlvkonna bioloogiliste sensorite hulka kuuluvad ka eDNA-põhised süsteemid, mis tuvastavad veeproovides sisalduva geneetilise materjali kaudu erinevate liikide olemasolu.

Bioloogiliste sensorite rakenduslik tähtsus on kasvanud nii ökosüsteemi seire, kalavarude hindamise kui ka autonoomsete süsteemide situatsiooniteadlikkuse tagamisel. Akustilised andurid võimaldavad tuvastada nii suuremaid organisme kui ka väikeseid biomassiosakesi, pakkudes detailset ülevaadet veealuse elustiku dünaamikast.

## Proovivõtjad ja käsitsi kogutav materjal

Kuigi sensorite ja autonoomsete seiresüsteemide roll on märkimisväärselt kasvanud, rekonstrueeritakse paljud protsessid endiselt laboratoorse analüüsi alusel. Selleks kasutatakse spetsiaalseid proovivõtjaid, mis tagavad täpse ja saastumata materjali kogumise. Kõige tavalisemad seadmed on Niskin-pudelid, mis võimaldavad võtta vett kindlast sügavusest; settenõud ja bentilised proovivõtjad, mis koguvad setteproove; ning planktonvõrgud, millega kogutakse elusorganisme kvantitatiivseks hindamiseks.

Proovivõtjate kasutamine nõuab rangemat käsitsemist, sest laboriproovi kvaliteeti mõjutavad proovivõtte sügavus, ajastus, hoidmine ja transport. Seetõttu on need

meetodid sageli kombineeritud sensorandmetega, et luua terviklik ruumiline ja ajaline pilt uuritavast keskkonnast.

## Sensorite ja proovivõtjate integratsioon autonoomsetes platvormides

Tänapäeval ei tööta enamik andureid eraldiseisvalt, vaid on integreeritud keerukatesse autonoomsetesse platvormidesse. AUV-d, gliderid, ROV-id ja mitmefunktsioonilised seirepoid ühendavad füüsikalised, keemilised ja bioloogilised sensorid ühtseks süsteemiks, mis kogub andmeid ruumiliselt suurel ulatusel ja ajaliselt pidevalt. Selline integratsioon võimaldab modelleerida mereprotsesse, jälgida ohtlikke muutusi, toetada navigatsioonisüsteeme ning hinnata tehniliste rajatiste seisundit.

Autonoomsete platvormide eelis seisneb nende suutlikkuses tegutseda ka keerulistes oludes, sealhulgas sügavates ja ohtlikes piirkondades, kuhu inimene või mehitamata laevad ei pääse. Sensorite täpne kalibreerimine, andmete sünkroniseerimine ja masinõppel põhinev analüütika muudavad sellised süsteemid üheks kõige olulisemaks vahendiks kaasaegses mereuuringute infrastruktuuris.

## Sonar

Sonar on teatud tehnoloogiate üldnimetus, milles üldjuhul allveekeskkonnas helilaineid kasutatakse navigatsiooniks, kommunikatsiooniks, veealuste (veepealsete) objektide kauguste ja asukohtade määramiseks ning objektidest kujutiste saamiseks. Sonari mõiste ja nimetus võeti kasutusele akustilise analoogina radari mõistele Frederick Hunti poolt[1]. Sonari ingliskeelne akronüüm tähistab väljendit "SOund Navigation And Ranging" ehk "heli abil navigeerimine ja kauguste määramine". Sonari kõrval on mõnede sonaritüüpide korral kasutusel ka nimetus "hüdrolokaator" (hüdro + lad locatio 'asetus').

## Sonari Ajalugu

Sonarite tehnoloogiate arendamise eelduseks oli helikiiruse määramine vees, mille esimestena mõõtsid täpselt Charles Sturm ja Daniel Colladon 1826. aastal. Nimelt on helikiirus vees (magevees  $\approx 1450$  m/s) üle nelja korra kiirem kui õhus (kuivas õhus  $\approx 343$  m/s). Esimeseks sonariks võib pidada veealuseid "akustilisi majakaid", mis olid Ameerika Ühendriikide tuletornide juures lisahoiatussüsteemina kasutusel laevade navigatsiooni hõlbustamiseks. Algselt oli allveehelide tekitajateks kellad, mille heli oli laevadele halva nähtavuse korral algeliste kuulamiseseadmetega kaugelt kuuldav. Udupasunatega võrreldes oli veealuse kella heli enamasti suurema kuuldeulatusega ja ilmakindlam.

Esimesed helide peegeldumisaja mõõtmisel põhinevad veesügavuse määramised viis läbi prantsuse uurimisrühm Paul Langevini juhtimisel. Aastal 1916 suutis uurimisrühm esimest korda elektrostaatilise muunduri abil tekitada ja salvestada heli peegeldusi merepõhjalt. Aastal 1917 vahetas elektrostaatilise muunduri välja piesoelektriline muundur.

Teise maailmasõja ajal kasutas Saksamaa merevägi oma laevadel (ka allveelaevadel) juba eelnevalt välja arendatud passiivseid sonareid. Süsteemi põhiosa moodustasid võres paiknevad hüdrofonid. Suurbritannia sai sakslaste sonarisüsteemi võimekusest täieliku ülevaate alles 1941, kui õnnestus esimest korda oma valdusse saada allveelaev U-570 (mis nimetati ümber HMS Graph). Allveelaevale mõlemale küljele oli paigutatud hüdrofonide võred, mis koosnesid 24 Rochelle'i soola kristallidel põhineva hüdrofonist. Eelvõimendatud hüdrofonide signaale filtreeriti sageduslikult ja viitliinide abil saavutati juhitud suunatudlikkus. Süsteemi kasutaja telefon-kõrvaklappidesse tulev heli oli seejuures kuuldavas sagedusribas 200 (või 10) Hz kuni 20 kHz.[4] Antud süsteemi võimekus sundis liitlasi oma võimekust passiivsete sonarite alal oluliselt parandama ja esimene passiivse sonari lisandusega aktiivne sonar jõudis USA mereväe kasutusse aastal 1944. Sõja lõpupoolel võttis Kriegsmarine kasutusele akustilised torpeedod.

Pärast teist maailmasõda jätkus sonarite rakendamine taas tsiviilvaldkonnas. Akustiline merepõhja kaardistamine sai 1960. aastatel võimalikuks külgvaatesonarite ja 1970. aastatel lehviksonarite (multi beam echo sounders) arendamisega. Kajaloode hakati laialdaselt kasutama kalanduses kalaparvede lokaliseerimiseks ja vastavaid kajaloode hakati nimetama kalaloodideks. Lisaks arendati merepõhja geoloogilisteks uuringuteks akustilisi profileerijaid, mis võimaldasid uurida merepõhja setteid ja aluspõhja omadusi. Sonarite laialdase kasutamisega hakkasid avalduma ka nende võimalikud kahjud mereloomadele. Madalsageduslike aktiivsonarite mõju mereimetajatele on seejuures uuritud 1990. aastate keskpaigast. Sel perioodil hakati esimest korda suurearvulisi vaalade kaldale kinni jäämisi seostama militaarsonaritega.

## Aktiivsed ja passiivsed sonarid

Sonarite süsteeme, seadmeid ja aparate jagatakse laias laastus kaheks eri tüübiks

Aktiivsed sonarid, genereerivad vähemalt ühe osaga (seda osa nimetatakse tihti projektoriks) eesmärgipäraselt suunatud helisid või heliimpulsse. Tekitatud helid või heliimpulsid levivad keskkonnas sihtmärgini, sellelt peegeldunud heli analüüsitakse. Antud peegelduse ehk kaja võtab vastu sonarisüsteemis näiteks hüdrofon. Analüüsimisel võrreldakse heliimpulsi peegelduste vastuvõtmise ja tekitamise

vahelisi aegu. Teades helikiirust keskkonnas on võimalik määrata kaugust objektideni (sihtmärkideni), millelt heli peegeldus.

Passiivsed sonarid registreerivad kõiki ümbritsevaid helisid, kuid on võimaldavad määrata ka näiteks suunatundlike hüdrofonide või hüdrofonide võrede abil suunda heliallikateni.

## Sonari võrrandid

Sonari võrrand on võrrand, mis aitab hinnata sonari võimekust tema erinevate ülesannete täitmiseks. ISO 18405 definitsiooni järgi seob sonari võrrand sonari signaali liiasuse  $\Delta LSE$  sonari signaali-müra suhte RSN ja tuvastuslävega  $\Delta LDT$ . Sonari võrrandid olid kasutusel juba teise maailmasõja ajal[5]. Sonari võrrandeid saab peamiselt kasutada statistiliselt statsionaarsete helisignaalide korral.

Sonari võrrandeid saab kasutada näiteks:

Olemasoleva sonarisüsteemi võimekuse määramiseks. Teades mingi keskkonna edastamise kadusi saab hinnata sonari tuvastuskaugust selles keskkonnas.

Teades nõutavat tuvastuskaugust saab uusi sonareid projekteerida piisava tundlikkusega, et nõutud kauguselt sihtmärgi tuvastamine oleks võimalik.

Passiivse sonari võrrand

Passiivse sonari võrrandit kasutatakse passiivsete sonarite korral. Passiivse sonari võrrand seob sonari signaali-müra suhet RSN, allikataset LS, levikadu NPL, sonari mürataset LN ja sonari töötluse võimendust  $\Delta LPG$ . Passiivse sonari võrrandi võib kirja panna kujul:

$$10 \log_{10} R_{SN} = L_S - N_{PL} - L_N + \Delta L_{PG},$$

kus

LS – allikatase, mis kirjeldab heliallika poolt keskkonda kiiratava helirõhu ruutkeskmist taset;

NPL – levikadu, mis kirjeldab heliallikast kiirgava heli helirõhutaseme vähenemist keskkonnas;

LN – sonari müratase, mis kirjeldab sonari tundlikkust ning akustiliste ja mitteakustiliste mürade suurust;

$\Delta LPG$  – sonari töötluse võimendus, mis kirjeldab kasutatud signaalitöötluse panust tuvastuse parendamisel.

Aktiivse sonari võrrand

Sonari võrrand aktiivse sonari jaoks seob sonari signaali-müra suhet RSN, projektori allikataset LS, levikadu sonari projektori ja sihtmärgi vahel  $NPL_{Tx}$ ,

samaväärse sihtmärgi tugevust  $NTS_{eq}$ , levikadu sihtmärgi ja sonari vastuvõtja vahel  $NPL_{Rx}$ , sonari mürataset  $LN$  ja sonari töötuse võimendust  $\Delta LPG$  läbi lähenduse

$$10 \log_{10} R_{SN} \approx L_S - N_{PL,Tx} + N_{TS,eq} - N_{PL,Rx} - L_N + \Delta L_{PG},$$

kus

$L_S$  – projektori allikatase, mis kirjeldab sonari projektori poolt keskkonda kiiratava helirõhu ruutkeskmist taset;

$N_{PL,Tx}$  – levikadu sonari projektori ja sihtmärgi vahel, mis kirjeldab palju projektori ja sihtmärgi vahepeal olevas keskkonnas levides projektori kiiratud helirõhutase väheneb;

$NTS_{eq}$  – samaväärse sihtmärgi tugevus, mis kirjeldab, kui palju sihtmärk temani jõudnud heli tagasi peegeldab;

$N_{PL,Rx}$  – levikadu sihtmärgi ja sonari vastuvõtja vahel;

$LN$  – sonari mürataset, mis kirjeldab sonari tundlikkust ning akustiliste ja mitteakustiliste mürade suurust;

$\Delta LPG$  – sonari töötuse võimendus, mis kirjeldab kasutatud andmetöötuse panust tuvastuse parendamisel.

## Sonarite tüüpe

Sonareid saab liigendada nende funktsiooni, kiirte geomeetria ja kasutusotstarbe järgi. Olulisemad kategooriad hõlmavad külgskaneeerivat sonarit, mitmekiirelist helisonarit, sub-bottom profiler'eid, eesvaatavaid navigatsioonisonareid ning akustilisi kaameraid.

## Külgskaneeeriv sonar

Külgskaneeeriv sonar (side-scan sonar) on mõeldud merepõhja tasapinnaliseks kujutamiseks ja objektide akustiliseks "pildistamiseks". Seade kiirgab mõlemale küljele suunatud lehvikukujulisi helikiiri, mis valgustavad merepõhja suurt ulatust. Peegeldunud signaalist saadakse skaneeritud ribadena mustvalge või värviline akustiline pilt, mis toob esile pinnareljeefi, tekstiuri ja objektid. Külgskaneeeriv sonar sobib vrakkide, settekörgendike, mereprügi, ehituslike struktuuride ja geoloogiliste vormide tuvastamiseks. Seda kasutatakse laialdaselt hüdrograafias, arheoloogias ja riskianalüüsis, sest selle võime "näha" läbi häguse vee on oluliselt parem kui optilistel meetoditel.

### Mitmekiireline helisonar (Multibeam Echo Sounder)

Mitmekiireline sonar (MBES) on tänapäevase batümeetrilise kaardistuse standard. Seade saadab merepõhja suunas välja suure hulga kitsaid helikiiri, mis katavad laia sektorit laeva või AUV/ROV trajektoori all. Peegeldunud signaalid teisendatakse kolmemõõtmeliseks mudeliks, mis võimaldab luua äärmiselt täpseid ja kõrge resolutsiooniga batümeetrilisi kaarte. MBES-i olulised omadused hõlmavad suurt katvust, täpset sügavusmõõdistust ning võimet tuvastada väiksemaid pinnarekonstruktsioone. Seda kasutatakse navigatsioonikaartide ajakohastamisel, sadamate süvendamistööde hindamisel, merepõhja muutuste jälgimisel ning insenertehniliste projektide kavandamisel.

### Sub-bottom profiler (SBP)

Sub-bottom profiler on mõeldud merepõhja all olevate setete ja aluspõhja kihistuse uurimiseks. Erinevalt klassikalistest batümeetrilistest sonaritest kasutab SBP madalamaid sagedusi, mis suudavad tungida sügavale setete sisse. Peegeldunud signaal avaneb kihilise struktuurina, mis näitab settekihi paksust, kihistumist ja geoloogilisi jooni. See tehnoloogia on kriitilise tähtsusega geoloogias, arheoloogias, torustike planeerimisel ja merepõhja stabiilsuse hindamisel. SBP võimaldab tuvastada ka mattunud objekte, mis ei ole pinnalt nähtavad.

### Eesvaatavad sonarid (Forward-Looking Sonar, FLS)

Eesvaatavad sonarid on navigatsiooniliste rakenduste jaoks mõeldud süsteemid, mis loovad reaajas pildi robotit ümbritsevast ruumist. Nende abil saab avastada takistusi, sein- või kaljuserva lähenemist ning navigatsiooniriske piirkondades, kus nähtavus on piiratud või kus GPS-signaal puudub. FLS-süsteemid on olulised autonoomsete allveerobotite ja väikeste ROV-de navigeerimisel. Need moodustavad autonoomsete platvormide situatsiooniteadlikkuse keskse osa.

### Akustilised kaamerad

Akustilised kaamerad, nagu DIDSON ja ARIS, kasutavad väga kõrgeid helisagedusi, mis loovad visuaalile sarnase akustilise kujutise. Need seadmed võimaldavad näha elusorganisme, konstruktsioonide detaile ja väikeseid objekte ka nullnähtavusega tingimustes.

Akustilised kaamerad on eriti kasulikud:

- kalavarude ja loomade käitumise jälgimisel,
- konstruktsioonide inspeksioonil,
- teaduslikes elupaikade uuringutes.

Nende pildikvaliteet sõltub sagedusest: suurem sagedus annab parema eraldusvõime, kuid väiksema tööulatuse.

## Allveerobotite tehnoloogia

Allveerobotite tehnoloogia kujunemine ulatub enam kui kuue aastakümne taha. Esimesed kaugjuhitavad allveeseadmed töötati välja 1950.–1960. aastatel külma sõja perioodil, mil neid kasutati süvavee otsingu- ja päästeoperatsioonides. 1970. aastatel algas autonoomsete allveesõidukite arendamine teadusasutustes, mis pani aluse kaasaegsele AUV-tehnoloogiale. Järgnevatel aastakümnetel viis sonarite, akustilise navigatsiooni, arvutisüsteemide ja energiatihedate akude areng AUV-de ja ROV-de võimekuse märgatava kasvuni, muutes need keskseks töövahendiks hüdrograafias, süvamereteaduses ja insenertehnilistes rakendustes. Allveerobotite tehnoloogiline areng on toonud kaasa hüppelise kasvu mereandmete ruumilises ja ajalises resolutsioonis, sensorite mitmekesisuses ning autonoomsete töörežiimide võimekuses. Käesolev peatükk käsitleb allveerobotite kasutust mereuuringute seiretegevustes, kirjeldab tehnoloogia ajaloolist arengut, olulisemaid saavutusi ning toob välja eripärad, eelised ja piirangud.

### Allveerobotite roll seiretegevustes

Allveerobotite kasutamine seires põhineb eelkõige nende võimel kanda mitmekesist sensoriparki ning tegutseda keskkondades, kus otsene inimosalus on kas ohtlik, kulukas või võimatu. Seiretegevused hõlmavad nii füüsikaliste, keemiliste ja bioloogiliste parameetrite kogumist kui ka geofüüsikaliste struktuuride, tehniliste rajatiste ja mereelustiku visuaalset või akustilist dokumenteerimist.

Autonoomsed allveesõidukid (AUV-d) suudavad läbida ettemääratud trajektoore, kogudes andmeid kogu teekonna vältel ning koondades need terviklikuks ruumiliseks mudeliks. Kaugjuhitavad allveesõidukid (ROV-id) pakuvad seevastu täpset kontrolli ja reaajas tagasisidet, mis on vajalik konstruktsioonide inspekteerimisel, proovivõtul ja delikaatsete tööoperatsioonide teostamisel. Mõlemad tehnoloogiad moodustavad täna kriitilise osa globaalsest mereuuringute infrastruktuurist.

### Allveerobotitega teostatavad seiretüübid

#### Füüsikaline ja hüdroloogiline seire

AUV-d võimaldavad mõõta temperatuuri, soolsust, rõhku, hoovuste kiirust, turbulentsi ning kihistumise struktuuri. Nende autonoomne liikumisvõime teeb võimalikuks kolmemõõtmelise hüdrofüüsikalise kaardi loomise, mida traditsioonilised CTD-profiilid ei suuda pakkuda.

### Batümeetria ja geofüüsikaline kaardistamine

Allveerobotid on saanud standardseks vahendiks batümeetriliste uuringute teostamisel, eriti süvameres. Mitmekiireliste helisonarite, sub-bottom profiler'ite ja magnetomeetrite kasutamine võimaldab luua kõrge resolutsiooniga mudelid merepõhja topograafiast ja geoloogilisest ülesehitusest.

### Bioloogiline ja ökoloogiline seire

ROV-id ja AUV-d võimaldavad dokumenteerida elupaiku, jälgida liikide esinemist ja hinnata ökosüsteemi struktuuri. Kõrgsageduslikud akustilised kaamerad, fluoromeetrid, planktoniseire moodulid ja eDNA proovivõtjad on muutnud võimalikuks sellise detailiulatuse, mida pinnalt teostatav seire ei suuda pakkuda.

### Keemiline seire ja vee kvaliteedi hindamine

Allveerobotitele paigaldatud keemilised sensorid koguvad andmeid hapniku, pH, toitainete, metallide ja orgaaniliste ühendite kohta. Lisaks võimaldavad robotid viia läbi suunatud proovivõtte, mis on kriitiline reostuskollete lokaliseerimisel ja ohtlike ainete leviku hindamisel.

### Infrastruktuuri ja tehniliste rajatiste seire

ROV-id on asendamatud veealuste torustike, kaablite, kai- ja sadamarajatiste, meretuuleparkide alustalade ning nafta- ja gaasirajatiste visuaalsel ja akustilisel kontrollimisel. Nende abil tuvastatakse pragusid, korrosiooni, mehaanilisi deformatsioone ja konstruktsiooni terviklikkuse häireid.

### Ajalooline areng ja silmapaistvaimad saavutused

Allveerobotite arenduse algus ulatub 1950.–1960. aastatesse, mil hakati looma esimesi kaugjuhitavaid seadmeid militaarsetel eesmärkidel. 1980. aastatel toimus tehnoloogia oluline läbimurre, kui ROV-id osalesid mitmel rahvusvaheliselt tähelepanuväärsel missioonil. Näiteks kasutati ROV-süsteeme Titanic'ü vraki avastamisel, mis tõestas kõrgtehnoloogiliste robotplatvormide võimekust töötada sügavustes üle 3500 meetri.

aastatel alustati laiema ulatusega AUV-de arendamisega, mis viis selleni, et süstemaatilised autonoomsed uuringud muutusid võimalikuks ka ekstreemsetes ilmaoludes. Viimase kümnendi jooksul on AUV-d saavutanud mitmeid märkimisväärseid tulemusi, sealhulgas maailma ookeani süvakihtide temperatuuri ja soolsuse mustrite detailkaardid, suurte geoloogiliste lõhede dokumenteerimine ning mitme tuhande kilomeetri pikkuste trajektooride läbimine ilma inimsekkumiseta.

Eriti silmapaistvad on HUGIN-klassiga autonoomsed robotid, REMUS-seeria platvormid ja Bluefin AUV-d, mida on kasutatud nii teaduslikes süvameremissioonides kui ka riiklike merejärelevalve programmides. Samuti on ROV-id teostanud keerukaid töid, nagu naftaplatvormide aluste korrosioonikahjustuste dokumenteerimine ja täppisoperaatorina kasutamine süvavee inspeksioonides.

## Tehnoloogia eripärad

Allveerobotite tehnoloogia eripäraks on vajadus toimida keskkonnas, kus puudub elektromagnetiline navigatsioon, nägemistingimused on piiratud ning rõhk suureneb iga kümne meetri järel märgatavalt. Seetõttu tuginevad robotid akustilisele positsioneerimisele, inertsimõõtesüsteemidele ja Doppleri kiiruslogidele. Teine oluline eripära on energiatarve ja autonoomsuse piiratus: AUV-d sõltuvad energiatihedatest akumoodulitest ning nende missiooni kestus sõltub otseselt koormuse juhtimisest ja sensorkomplekti energiatarbimisest.

Kolmas eripära tuleneb veeakustika füüsikast: sonarite tööulatust ja eraldusvõimet mõjutavad vee temperatuur, soolsus, sügavus ja kihistumine. See nõuab pidevat keskkonnaparameetrite kompenseerimist andmetöötluses.

Allveerobotite eelised seiretegevuses

Allveerobotite kasutamise peamisteks eelistest on:

- Ligipääs kättesaamatutele piirkondadele: süvameri, jääväljade alune tsoon, ohtlikud või reostunud piirkonnad.
- Kõrge ruumiline ja ajaline resolutsioon, mis võimaldab täpseid mõõdistusi.
- Sensorite lai valik ja multifunktsionaalsus, sh akustilised, optilised, keemilised ja bioloogilised andurid.
- Autonoomsus, mis vähendab laevade, meeskonna ja logistikaga seotud kulusid.
- Võime teostada keerukaid operatsioone, nagu proovivõtt, manipuleerimine, konstruktsioonide inspekteerimine.
- Pikaajaline töörežiim, mis võimaldab läbida suuri vahemaid ja luua detailseid keskkonnamudeleid.

Kuigi allveerobotid pakuvad märkimisväärsed eeliseid, tuleb arvestada ka piirangutega:

- Energiasõltuvus, mis piirab AUV-de missiooni kestust.
- Navigatsiooni ebakindlus GNSS puudumisel, mis nõuab keerukaid akustilisi ja inertseid lahendusi.
- Kõrge tehniline maksumus, mis muudab süsteemid kättesaadavaks peamiselt institutsionaalsetele kasutajatele.
- Akustilise signaali nõrgenemine ja häired, mis võivad piirata sonarite tööulatust ja täpsust.

- Piiratud manipuleerimisvõime autonoomsetel platvormidel võrreldes ROV-operaatoriga.
- Keskkonnatingimuste mõju – tugevad hoovused, muda ja heljum võivad andmekvaliteeti oluliselt vähendada.