

Urban Mobile Robotics State of the art -raportti: Vesirobotiikka kaupunki- ympäristössä

Nilofar Mirzai

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Urban Mobile Robotics -hanke, 2026

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Vesirobotiikan teknologiat	1
2.1	Käsitteet ja määritelmät	2
2.2	Mekaaninen rakenne ja hydrodynamiikka	4
2.3	Navigointijärjestelmät	5
2.3.1	Akustinen navigointi	5
2.3.2	Visuaalinen paikannus	13
2.4	Liike- ja tilanennustus	14
2.4.1	Inertiasensorit ja mittausperiaate	14
2.4.2	Muut menetelmät vedenalaisessa navigoinnissa	15
2.5	Tukijärjestelmät	16
2.5.1	Pintapoijut ja syväpoijut	16
2.5.2	Vedenalaiset telakointiasemat	17
3	State of the art miehittämättömässä vesirobotiikassa	18
3.1	Käytetty menetelmä ja arviointikehikko	18
3.2	Kauko-ohjatut vedenalaiset ajoneuvot	19
3.2.1	Subastian ROV	19
3.2.2	Defender ROV	21
3.2.3	BlueROV2	22
3.3	Autonomiset vedenalaiset ajoneuvot	24
3.3.1	REMUS 100	24
3.3.2	Boxfish AUV	26
3.3.3	Hydrus	27
3.4	Veden pinnalla olevat ajoneuvot	28
3.4.1	Saildrone USV	28
3.4.2	Otter USV	29
4	Vedenalaisen robotiikan benchmarkkaus	31
4.1	Alustojen vertailutaulukko	31
4.2	Käyttötapauksiin perustuva benchmarkkaus	33
4.3	Tulokset ja vertailuanalyysi	36
5	Yhteenveto	37
	Lähteet	39

Lyhenteet

- MRU: Motion Reference Unit. Anturi, joka mittaa ja raportoi dynaamisia liikkeitä, erityisesti merenkulun ja ilmailun ympäristöissä.
- INS: Inertia Navigation System. Inertianavigointijärjestelmä, johon kuuluvat esimerkiksi liikesensorit and gyroskoopit.
- ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler
- GNSS: Global Navigation Satellite System
- SV: Sound Velocity sensor. Käytetään äänen nopeuden mittaamiseen vedessä. Tärkeä akustiikkapohjaisten paikannusjärjestelmien tarkkuuden varmistamisessa.
- MEMS: Micro-electro-mechanical systems Inertial Measurement Unit. Pienikokoinen anturiyksikkö, joka mittaa laitteen liikettä, suuntaa ja nopeutta kolmessa ulottuvuudessa.
- UGPS: Underwater Global positioning system. Erityinen paikannusjärjestelmä, joka käyttää akustiikkaa ja transpondereita vedenalaiseen tarkkaan paikannukseen.

1 Johdanto

Tämä raportti käsittelee vedenalaisen robotiikan State of the Art -selvitystä ja käyttökohteiden benchmarkkausta. Raportti on toteutettu osana Urban Mobile Robotics -hanketta (UMR), jonka päätavoitteena on luoda vahva robotiikan innovaatioalusta Helsingin seudulle. Hankkeen erityisenä painopisteenä on tukea pienten ja keskisuurten yritysten sekä startupien kasvua ja kansainvälistymistä.

Tässä raportissa tarkastellaan vedenalaisen robotiikan teknologioita ja esitetään tällä hetkellä käytössä olevien, eri tavoin ohjattavien vedenalaisten robottien tyypit ja saatavilla olevat alustat. Raportin tavoitteena on kartoittaa vedenalaisen robotiikan nykytilanne ja tarkastella eri ratkaisujen eroja ja soveltuvuuksia.

UMR-hanke perustuu vahvaan yhteistyöhön yritysten, tutkimuslaitosten ja Helsingin kaupungin välillä. Tavoitteena on rakentaa elinvoimainen ekosysteemi, joka tukee robotiikan käytännön hyödyntämistä urbaanissa ympäristössä ja luo pohjaa uusille innovaatioille sekä kansainvälisille avauksille.

Urban Mobile Robotics -hankkeen toteuttavat Metropolia Ammattikorkeakoulu ja Forum Virium Helsinki. Hanke on Euroopan unionin osarahoittama.

2 Vesirobotiikan teknologiat

Miehittämättömien vesirobottien käyttö voi olla kustannustehokkaampaa kuin miehitettyjen alusten tai sukeltajien hyödyntäminen tutkimusten toteuttamisessa. Niiden avulla kerätään tutkimusdataa, kuten valokuvia, videomateriaalia, batymetriaa jne., merkittävästi pienemmillä kustannuksilla. Esimerkiksi Saildrone Explorer -pinta-alus pystyy keräämään dataa jopa 12 kuukauden ajan yhtäjaksoisesti ilman miehistöä.

Vesirobotit tarjoavat myös turvallisemman vaihtoehdon ihmisille vaarallisissa olosuhteissa, kuten syvällä meressä tehtävässä näytteenotossa, sotilaallisissa tehtävissä tai myrkyllisissä ympäristöissä. Tällaisia sovelluksia edustavat esimerkiksi REMUS-sarjan AUV-järjestelmät, joita käytetään esimerkiksi miinantorjunnassa. Toisin kuin sukeltajat tai miehitetyt vedenalaiset ajoneuvot, miehittämättömät järjestelmät kykenevät keräämään dataa jatkuvasti, säännöllisesti ja tarkasti myös haastavissa olosuhteissa.

2.1 Käsitteet ja määritelmät

Vesirobotiikassa käytetään usein lyhennettä UUV (Unmanned Underwater Vehicle) ja USV (Unmanned Surface Vehicle). Vesirobottien luokittelu tehdään ohjaustavan ja liikkumisympäristön perusteella yleensä kolmeen pääryhmään: ROV-, AUV- ja USV-järjestelmät. [1], [2], [3]

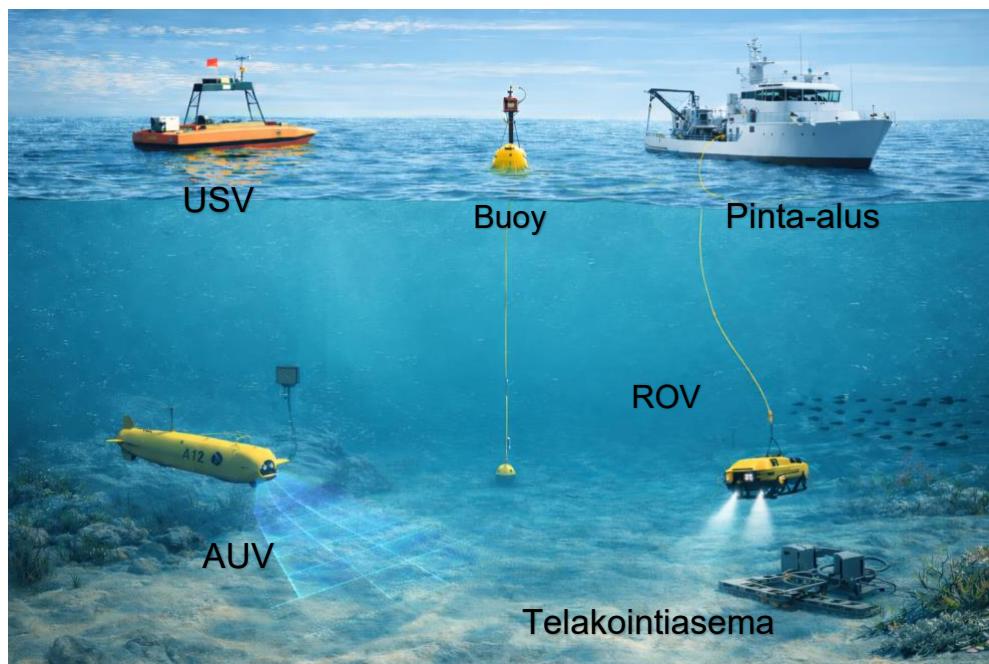
Remotely Operated Vehicle (ROV) -järjestelmä on kaapelilla ohjattava vedenalainen robotti, jota ihminen ohjaa suoraan pintayksiköstä. Sähkö ja data siirtyvät pintayksikön ja robotin välillä ohjauskaapelin pitkin, joka myös rajaa laitteen liikkumista. ROV-järjestelmiä käytetään muun muassa visuaalisessa tarkastuksessa, tutkimus- ja ympäristömittauksissa sekä kunnossapitotehtävissä. [1], [2], [3]

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) -järjestelmä toimii veden alla ilman jatkuvaa kaapeliyhteyttä ja sen toiminta-alue on laajempi, mikä erottaa sen selkeästi ROV-laitteista. AUV:t toimivat pääasiassa ennalta ohjelmoitujen reittien ja mittauskuvioden varassa ilman ihmisen jatkuvaa ohjausta. Näitä ajoneuvoja hyödynnetään tyypillisesti pitkäkestoisissa ja laaja-alaisissa operaatioissa ja käyttökohteita ovat muun muassa merenpohjan kartoitus, putkilinjojen ja kaapelien tarkastus, miinantorjunta sekä ympäristön seuranta ja monitorointi. [1], [2], [3]

AUV kykenee välittämään vain rajallisen määrän telemetriadataa, kuten ajoneuvon tilatietoja ja arvioituja sijaintipäivityksiä, akustisten modeemien avulla. Varsinainen mittausaineisto, kuten videokuvat, korkearesoluutioiset

valokuvat, monikeilainkaikuluotaimella tuotetut kartat sekä muut suuret datamäärät, puretaan tyypillisesti vasta tehtävän päätyttyä. [1], [2], [3]

Data saadaan yleensä silloin, kun AUV nostetaan takaisin tutkimusalukselle tai kun ajoneuvo telakoituu vedenalaiseen lataus- ja tiedonsiirtoasemaan, joka mahdollistaa samanaikaisesti suuremman tiedonsiirtokapasiteetin sekä akkujen lataamisen. [1], [2], [3]



Kuva 1. Vedenalaisten teknologioiden kuvaus (luotu Chatgpt:llä)

Unmanned Surface Vehicle (USV) on miehittämätön alusta, joka toimii veden pinnalla autonomisesti tai kauko-ohjauksella. Pintakäytön ansiosta USV-järjestelmät voivat hyödyntää jatkuvasti GPS-signaaleja ja satelliittiyhteyksiä, mikä yksinkertaistaa navigointia ja mahdollistaa reaaliaikaisen datansiirron. Niitä käytetään monipuolisesti muun muassa hydrografisissa mittauksissa, ympäristön seurannassa sekä meriliikenteen sujuvuuden ja merialueiden puhtauden ylläpidossa. [4]

Pienet katamaraanityyppiset alustat, kuten Heron ja Otter, tarjoavat modulaarisen rakenteen, johon voidaan integroida akustisia antureita,

vedenlaatusensoreita ja kameroita. Toisessa ääripäässä Saildrone Explorer edustaa pitkäkestoista USV-alustaa, joka kykenee vuoden mittaisiin autonomisiin tutkimusmatkoihin valtamerillä. Lisäksi USV-järjestelmät voivat toimia vedenalaisten robottien pintalinkkeinä, tarjoten GPS-pohjaista sijaintitietoa ja tiedonsiirtokanavia. [4]

2.2 Mekaaninen rakenne ja hydrodynamiikka

Paine ja syvyys asettavat keskeiset rakenteelliset reunaehdot miehittämättömien vedenalaisten ajoneuvojen (UUV) suunnittelulle. Paineenkestävän rungon on kyettävä vastustamaan ulkoista hydrostaattista painetta ilman nurjahdusta. Tästä syystä UUV-ajoneuvojen rungot toteutetaan tyypillisesti sylinterimäisinä rakenteina, joissa on puolipallomaiset tai torisfääriset päätykannet. Kyseiset muodot minimoivat jännityskeskittymät ja parantavat rakenteen kestävyyttä ulkoisen paineen alaisena. [5]

Ajoneuvon vesitiiviys varmistetaan paineenkestävän kotelorakenteen ja luotettavien tiivistysratkaisujen yhdistelmällä. Päätykannet kiinnitetään tyypillisesti laipparakenteilla ja O-rengastiivisteillä, jotka takaavat tiiviiden myös suurten ulkoisten paineiden alaisena. Sähköiset läpiviennit toteutetaan paineenkestäviksi mitoitetuilla liittimillä, joiden avulla estetään veden pääsy ajoneuvon sisäisiin sähköjärjestelmiin. [6]

UUV-järjestelmien noste suunnitellaan tyypillisesti neutraaliksi tai lievästi positiiviseksi. Tällainen nosteominaisuus mahdollistaa ajoneuvon syvyyden ylläpitämisen pienellä työntövoimalla, mikä parantaa energiatehokkuutta ja pidentää toiminta-aikaa. Optimaalinen noste saavutetaan yhdistämällä suuritiheyksisiä komponentteja matalatiheyksisiin materiaaleihin, kuten syntaktiseen vaahtoon. [7]

UUV-ajoneuvojen rakenteissa käytettävien materiaalien on kestävä meriveden aiheuttamaa korroosiota. Yleisimmin käytettyjä materiaaleja ovat titaaniseokset, alumiiniseokset ja ruostumaton teräs sekä erilaiset muovit ja

kuitulujitetut komposiitit (FRP). Materiaalivalinnat tehdään tyypillisesti sovelluskohtaisesti huomioiden toimintasyvyys, massa, kustannukset ja valmistustekniset rajoitteet. [7]

2.3 Navigointijärjestelmät

Satelliittipohjaiset navigointijärjestelmät eivät toimi veden alla, joten niiden tilalle on kehitetty muita ratkaisuja. Tässä työssä esitellään kaksi keskeistä teknologiaa vedenalaisten navigointijärjestelmien ymmärtämiseksi.

Ensimmäinen on akustinen navigointi, joka perustuu ääniaaltojen käyttöön, ja toinen on visuaalinen navigointi, jossa hyödynnetään kameroita yhdistettynä tekoälyyn ja muihin antureihin.

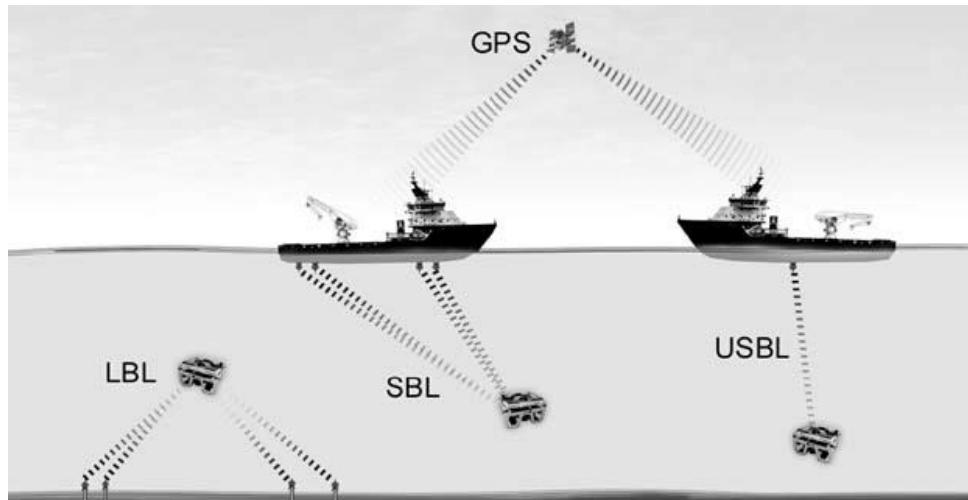
2.3.1 Akustinen navigointi

Akustinen navigointi on vedenalainen teknologia, jossa käytetään ääniaaltoja sijainnin, etäisyyden ja suunnan määrittämiseen veden alla oleville ajoneuvoille ja kohteille. Teknologia perustuu ääneen, koska se mahdollistaa langattoman viestinnän veden alla. Tämä johtuu siitä, että radioaallot, valo ja satelliittisignaalit eivät kulje vedessä jo muutaman metrin syvyydessä. Sen sijaan ääni etenee vedessä noin kolme kertaa nopeammin kuin ilmassa. [8]

Käytännössä akustiset navigointijärjestelmät hyödyntävät hydrofoneja ja toisiotutkavastaimia eli transpondereja. Näitä järjestelmiä hyödynnetään äänen lähettämiseen ja vastaanottamiseen merenpohjan, kohteiden tai ajoneuvojen vastaavan vastaanottimen välillä tarkan sijainnin määrittämiseen. Tätä tekniikkaa käytetään yleisimmin autonomisissa vedenalaisissa ajoneuvoissa (AUV), mutta sitä voidaan hyödyntää myös sukeltajien toimesta. Paikannuksen tarkkuus riippuu esimerkiksi etäisyydestä lähettimeen tai ajoneuvon syvyydestä. [8]

- Akustiset paikannusjärjestelmät

Kaapelittomassa vedenalaisessa ajoneuvossa paikannus ja navigointi perustuvat akustisiin paikannusjärjestelmiin. Tarkemman paikannuksen saavuttamiseksi voidaan hyödyntää akustisia paikannusjärjestelmiä, kuten USBL-, SBL- ja LBL-järjestelmiä. Nämä järjestelmät hyödyntävät akustisia lähettämiä ja vastaanottimia kaikuluotausperiaatteella. Kuvassa 2 näkyy, miten näissä menetelmissä paikannus perustuu pintayksikön tai merenpohjaan sijoitettujen akustisiin vastaajiin. [9]



Kuva 2. Tyypilliset AUV:n paikannusratkaisut (Mallios, Ribas ja Ridao 2009) [10]

Ultra-Short Baseline (USBL) -järjestelmässä veden pinnalla sijaitseva yksikkö, kuten pinta-alus tai pintapoiju, vastaanottaa akustisen signaalin UUV-laitteelta, määrittää laitteen sijainnin paikallisessa koordinaatistossa ja satelliittipaikannusjärjestelmä (GNSS) muuntaa tiedot globaaliin koordinaatistoon. UUV-järjestelmän sijainti määritetään signaalin kulkuajan sekä saapumissuunnan perusteella. USBL-järjestelmät ovat suhteellisen helppoja ottaa käyttöön, mutta niiden paikannustarkkuus on rajallinen ja riippuu etäisyydestä ja ympäristöolosuhteista. [9], [10]

Short Baseline (SBL) -järjestelmä toimii periaatteeltaan samankaltaisesti kuin USBL, mutta siinä useat vastaanottimet on sijoitettu laajemmalle etäisyydelle toisistaan, tyypillisesti suurempaan pinta-alueeseen. Tämä mahdollistaa paremman paikannustarkkuuden, mutta edellyttää suurempaa ja vakaampaa alustaa järjestelmän asentamiseksi. [9], [10]

Long Baseline (LBL) -järjestelmässä akustiset lähettimet ja vastaanottimet sijoitetaan ennalta määritettyihin paikkoihin merenpohjaan. UUV-järjestelmä paikantaa itsensä suhteessa näihin vastaajiin, mikä mahdollistaa erittäin tarkan paikannuksen erityisesti pitkäkestoisissa ja toistettavissa mittauksissa. LBL-järjestelmien haittapuolena on niiden käyttöönoton vaatima asennustyö ja ylläpitokustannukset. [9], [10]

Taulukko 1. Akustiset navigoinnit, USBL- ja LBL-tekniikat (Blue Robotics) [11]

Kuva		
Nimi	ROVL Mk II	UGPS
Teknologia	USBL	LBL
Maa	USA	Norja
Valmistaja	Cerulean Sonar	Water Linked
Kantama	300 m	300 m
Taajuus	25 kHz	250 kHz
Käyttösyvyys	300 m	300 m
Paino	335 g	6 kg
Hinta	3 490 \$	8 140 \$

Taulukko esittää kaksi uusinta akustisen navigoinnin teknologiaa. ROVL Mk II on USBL-järjestelmä, jonka on kehittänyt Cerulean Sonar, joka on tarkoitettu asennettavaksi AUV:n päälle. UGPS puolestaan on pintaan, esimerkiksi alukseen, asennettava paikannusjärjestelmä. [11], [12]

- Doppler Velocity Logger (DVL)

Doppler Velocity Logger (DVL) on akustinen anturi, joka mittaa vedenalaisen ajoneuvon nopeutta ja liikesuuntaa suhteessa merenpohjaan. DVL perustuu

Doppler-ilmioon, eli aallon taajuuden muutokseen, joka syntyy lähteen ja havaittajan välisen liikkeen seurauksena. [11]

DVL lähettää ääniaaltoja merenpohjaan ja mittaa takaisin heijastuneiden signaalien taajuusmuutosta. Tyypillisesti DVL-laitteessa on neljä anturia (transducer), jotka lähettävät ääntä neljään eri suuntaan. Näiden mittausten perusteella järjestelmä pystyy määrittämään ajoneuvon nopeuden, etäisyyden merenpohjaan sekä mahdollisiin muihin kohteisiin. [11], [13], [14]

Lisäksi DVL voi laskea ajoneuvon nopeuden kolmessa ulottuvuudessa (eteen/taakse, sivuille ja ylös/alas). DVL:ää käytetään yleisesti AUV- ja ROV-järjestelmissä esimerkiksi paikallaan pysymiseen (position holding) ja reittipisteiden seuraamiseen (waypoint navigating). Seuraavassa taulukossa on vertailtu ja arvioitu lista DVL-laitteita Blue Roboticsin toimesta. Taulukko sisältää DVL-laitteita yksinkertaisemmista ratkaisuista huippuluokan laitteisiin. [11], [13], [14]

Taulukko 2. DVL-laitteiden vertailuanalyysi (Blue Robotics) [11]

Kuva					
DVL	Tracker 650	DVL 333	DVL 1000	Wayfinder	DVL A50
Maa	USA	Norja	Norja	USA	Norja
Valmistaja	Cerulean Sonar	Nortek	Nortek	Teledyne	Water Linked
Kantama	50 m	375 m	75 m	60 m	50 m
Taajuus	675 kHz	333 kHz	1000 kHz	614 kHz	1000 kHz
Nopeus- resoluutio	0.1 mm/s	1 mm/s	0.01 mm/s	0.1 mm/s	0.1 mm/s
Käyttösyvyys	300 m	6000 m	300 m	300 m	200 m
Hinta	2 990 \$	< 10 000 \$	55 000 \$	7 500 \$	7 890 \$
Paino	0.55 kg	7 kg	1.7 kg	0.85 kg	0.17 kg

Laitteen kantama (range) kuvaa, kuinka kauas laite pystyy havaitsemaan merenpohjaa. Käyttösyvyys osoittaa, kuinka syvälle DVL voidaan upottaa. Resoluutio puolestaan viittaa nopeusresoluutioon, eli siihen, kuinka tarkasti nopeuden muutoksen laitteella voidaan havaita tai mitata. [14], [15]

DVL:n toimintataajuus määrittää kompromissin mittauskantaman ja mittaustarkkuuden välillä. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että huippuluokan DVL 1000, jonka taajuus on 1000 kHz ja nopeusresoluutio 0,01 mm/s, toimii suhteellisen lyhyellä, noin 75 metrin kantamalla. Nämä ominaisuudet sopivat hyvin AUV-ajoneuvoille, jotka operoivat lähellä merenpohjaa ja tarvitsevat erittäin tarkkaa navigointia.

Toisaalta DVL 333:n resoluutio on 1 mm/s, mutta sen kantama on huomattavasti pidempi, noin 375 metriä, ja käyttösyvyys noin 6000 metriä. Tämä tekee siitä sopivan syvänmeren tehtäviin ja pitkän matkan navigointiin.

- Kaikuluotaimet ja kuvaavat luotaimet

Kaikuluotaimia käytetään batymetriassa eli veden syvyyden mittaamisessa, sekä merenpohjan kartoittamisessa. Kaikuluotaimet jaetaan kahteen päätyyppiin: yksikeilaisiin (single beam) ja monikeilainkaikuluotaimiin (multibeam).

Yksikeilainen kaikuluotain (SBES) on nimensä mukaisesti yksinkertaisempi järjestelmä. Sitä käytetään esimerkiksi etäisyyden mittaamiseen merenpohjasta, merenpohjan koostumuksen tutkimiseen sekä esteiden havaitsemiseen. Toiminta perustuu siihen, että akustinen anturi lähettää ääniaallon, joka kulkee vedessä ja heijastuu takaisin osuessaan merenpohjaan tai muihin kohteisiin. [13]

Monikeilainkaikuluotain (MBES) lähettää nopeasti useita äänipulsseja useiden antureiden kautta. Se on rakenteeltaan monimutkaisempi kuin yksikeilainen kaikuluotain, koska se vastaanottaa heijastuneet signaalit useilla pienemmillä antureilla samanaikaisesti. Mittaamalla ajan, joka kuluu signaalin palaamiseen,

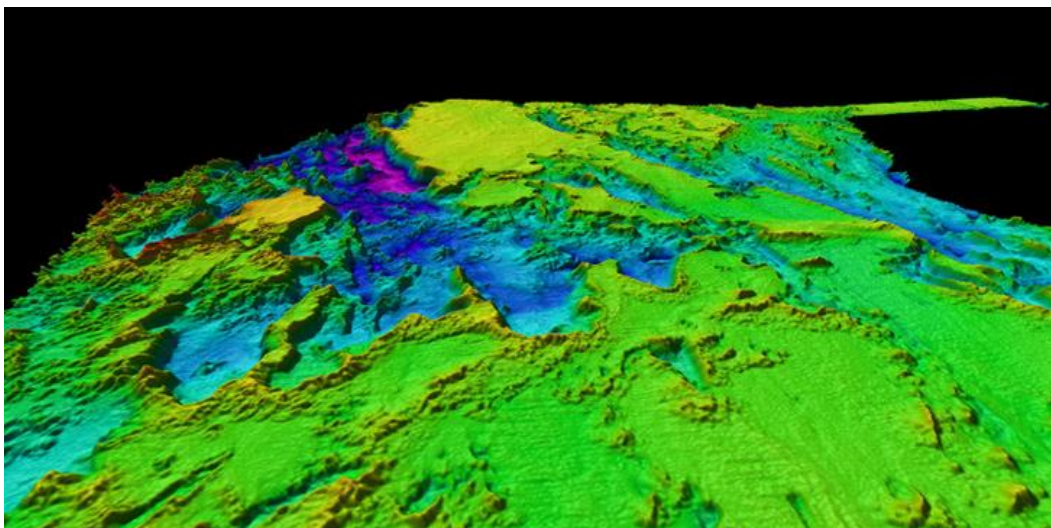
ja tekemällä siihen perustuvia laskelmia, järjestelmä pystyy määrittämään mistä suunnasta mikäkin signaali on tullut. [16]

Taulukko 3. Monikeilainluotaimien vertailuanalyysi (Blue Robotics) [11]

Kuva				
MBES	Surveyor 240-16	MS400U	iWBMS	MB2
Maa	USA	China	Norja	USA
Valmistaja	Cerulean Sonar	Hydro-Tech	Norbit	Teledyne
Kantama	50 m	200 m	275 m	
Taajuus	240 kHz	400 kHz	400 kHz	460 kHz
Paino	0.79 kg	7.5 kg	9.5 kg	11 kg
Käyttösyvyys	100 m	50 m	275 m	100 m

Kaikuluotaimien painojen perusteella Surveyor on selvästi kompaktein vaihtoehto ja samalla myös edullisen ratkaisu. Surveyorin kaltaiset kompaktit järjestelmät on helpompi integroida pienempiin miehittämättömiin alustoihin, kuten Otter USV:hen. Sen taajuuden ja kantaman perusteella se soveltuu kuitenkin vain hyvin mataliin vesiin eikä ammattimaiseen hydrografiseen mittaukseen. [17]

MS400U:n, iWBMS:n ja MB2:n kaltaiset järjestelmät soveltuvat paremmin batymetriisiin mittaustehtäviin, jossa kantama, mittauskaistan leveys ja keilatiheys ovat erittäin tärkeitä. Ne ovat silti riittävän kompakteja asennettaviksi miehittämättömään ajoneuvoon. MS400U:ssa ja iWBMS:ssä on sisäänrakennettu IMU- ja GNSS-moduuli, mikä tarkoittaa, että erillistä INS-järjestelmää ei tarvita. MB2 voidaan toimittaa valitun kokoonpanon mukaan valinnaisella sisäänrakennetulla IMU:lla ja GPS:llä. [18], [19], [20]



Kuva 3. Monikeilainen batymetria, joka on kerätty Windows to the Deep 2019 -retkikunnan ensimmäisellä osuudella Yhdysvaltojen kaakkoisrannikon edustalla (kuva: NOAA Ocean Exploration)

Lisäksi MBES mittaa merenpohjan syvyyttä ja muodostaa sen perusteella yksityiskohtaisen batymetrinen kartan, kuten kuvassa 3 on esitetty. Batymetriset kartat esitetään yleensä väreillä siten, että punainen kuvaa matalaa aluetta ja sininen tai violetti syvempää aluetta. Palautuneet signaalit voivat antaa myös tietoa merenpohjan geologisista ominaisuuksista tai sen pinnalla olevista kohteista, kuten pinnan kovuudesta tai rakenteesta. [16]

Kun ajoneuvolla on käytössään batymetrinen kartta ja sitä hyödynnetään navigointiin, kuvaava luotaimet (imaging sonar) voi olla hyödyllinen liikkumisen tukena. Kuvaaviin luotaimiin kuuluvat muun muassa pyörivät kuvaavat luotaimet (scanning imaging sonar), monikeilaiset kuvaavat luotaimet (multibeam imaging sonar) sekä sivuttaissuuntaiset luotaimet (side scan sonar). Näitä kaikkia voidaan käyttää kohteiden havaitsemiseen sekä vedenalaisen navigoinnin ja esteiden väistön tukena.

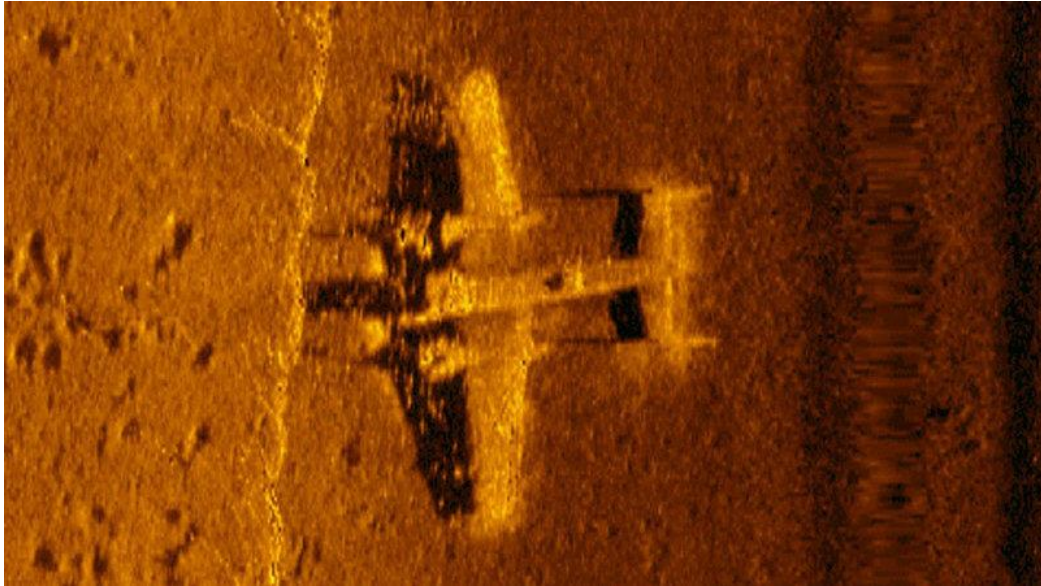
Pyörivä kuvaava luotain muistuttaa toiminnaltaan yksikeilaista kaikuluotainta, mutta siinä käytetään viuhkamaista akustista keilaa ja pyörivää moottoria, joka mahdollistaa 360 asteen havainnoinnin. Tämä tarkoittaa, että laite pystyy mittaamaan ympäristöä kaikkiin suuntiin, mutta vain kapeana ”viipaleena”

kerrallaan. Haittapuolena on, että täydellinen 360 asteen skannaus kestää yleensä noin 5–20 sekuntia. Tämänkaltaisia luotaimia käytetään tyypillisesti kevyisiin vedenalaisiin tarkastus- ja huoltotehtäviin. [13]

Monikeilaisia kuvaavia luotaimia kutsutaan usein myös eteenpäin katsovaksi luotaimeksi (forward looking sonar), koska niiden näkökenttä on yleensä noin 90 astetta ja kantama voi olla jopa 200 metriä. Nämä luotaimet tuottavat kuvia useita kertoja sekunnissa, jolloin syntyy 2D-videon kaltaista kuvaa rakenteista ja merenpohjasta. Tämän ansiosta niitä käytetään paljon tarkastuksiin, etsintä- ja pelastustehtäviin. [13]

Sivuttaissuuntaiset luotaimet (side scan sonar, SSS) asennetaan yleensä miehittämättömiin vedenalaisiin ajoneuvoihin (UUV), mutta harvemmin ROV-laitteisiin. Tämä johtuu siitä, että ne pystyvät kuvaamaan suuria merenpohjan alueita lyhyessä ajassa. Näitä laitteita käytetään tyypillisesti kartoituksessa, etsintä- ja pelastustehtävissä, vedenalaisessa arkeologiassa sekä ympäristön seurannassa. [13]

Erona monikeilainkaikuluotaimen (MBES) on se, että SSS:n kantama on yleensä lyhyempi. Tämän vuoksi sitä käytetään usein UUV-alustoissa, jotka pystyvät pitämään optimaalisen etäisyyden merenpohjaan. Kuvassa 4 on esitetty korkean resoluution sivuttaissuuntaisen luotaimen kuva toisen maailmansodan aikaisesta B-25-lentokoneesta. [21]



Kuva 4. Korkean resoluution sivuttaissuuntaisen luotaimen kuva toisen maailmansodan aikaisesta B-25-lentokoneesta, joka löydettiin vuonna 2017 Papua-Uudessa-Guineassa (kuva: Project Recover, NOAA)

2.3.2 Visuaalinen paikannus

Visual Simultaneous Localization and Mapping (vSLAM) auttaa vedenalaista ajoneuvoa selvittämään sijaintinsa ja kartoittamaan ympäristöään samaan aikaan, kun GPS ei ole käytettävissä. Menetelmä yhdistää kameran kuvat sekä IMU:n ja syvyysanturin tuottaman datan.

Visual Odometry (VO) arvioi ajoneuvon liikettä vertaamalla peräkkäisiä kuvia ja seuraamalla niissä näkyvien piirteiden muutoksia. Optical flow -menetelmä täydentää tätä analysoimalla pikselien tai tekstuurien liikettä kuvasta toiseen silloin, kun yksittäisiä piirteitä on vaikea havaita. Koska näihin menetelmiin kertyy ajan myötä virheitä (drift), vSLAM käyttää loop closure -havaintoa tunnistaakseen tilanteet, joissa ajoneuvo palaa aiemmin nähtyyn paikkaan, ja korjaa karttaa sekä sijaintiestimaattia. Tämän ansiosta vSLAM pystyy ylläpitämään tarkempaa ja pitkäkestoisempaa navigointia näkyvyyden sen salliessa ja laskemaan sekä ajoneuvon tarkan liikeradan että kartan sen ympäröivästä ympäristöstä. [22]

Vedenalaisen kuvantamisen laatu heikkenee, koska valo käyttäytyy vedessä eri tavalla kuin ilmassa. Eri aallonpituudet vaimenevat vedessä eri nopeuksilla. Sinivihreä valo kulkee pisimmälle, kun taas punainen ja oranssi valo häviävät jo muutaman metrin syvyydessä. Siksi vedenalaiset kuvat näyttävät usein sinisiltä tai vihertäviltä. [22]

Lisäksi vedessä olevat orgaaniset aineet ja pienet partikkelit aiheuttavat kohinaa ja valon takaisinsirontaa. Tämä heikentää kuvan kontrastia ja peittää yksityiskohtia. Näistä syistä vedenalaisessa konenäössä ja navigoinnissa tarvitaan erityisiä kuvankäsittely- ja korjausmenetelmiä, jotta järjestelmät toimivat luotettavasti. [18]

Menetelmä toimii kuitenkin hyvin kirkkaissa ja selkeissä vesissä, mutta sameissa pohjoisissa olosuhteissa sen käyttö on rajoittunutta. Tästä syystä useimmat merenpohjan kartoitustehtävät perustuvat yhä akustisiin menetelmiin, kuten sivuttaissuuntaiset luotaimiin, monikeilainkaikuluotaimiin ja eteenpäin katsoviin luotaimiin.

2.4 Liike- ja tilanennustus

Kuten aikaisemmin viitattiin, vedenalaisissa robottijärjestelmissä GNSS-pohjainen paikannus ei ole käytettävissä. Tästä syystä ajoneuvon sijainnin, nopeuden ja orientaation arviointi perustuu ensisijaisesti inertiasensoreihin, nopeusmittauksiin sekä näiden mittausten yhdistämiseen anturifuusion avulla.

2.4.1 Inertiasensorit ja mittausperiaate

Inertial Measurement Unit (IMU) on keskeinen komponentti lähes kaikissa UUV-järjestelmissä. IMU koostuu tyypillisesti kolmiakselisista kiihtyvyyssantureista ja gyroskoopeista sekä usein magnetometristä.

Kiihtyvyyssanturit mittaavat ajoneuvoon kohdistuva ominaiskiihtyvyyttä.

Gyroskoopit mittavat kulmanopeuksen, jonka avulla ajoneuvon asennon

muutoksia voidaan integroida ajassa. Magneettometri tarjoaa absoluuttisen viitteen suuntakulmalle, mutta sen käyttökelpoisuutta heikentävät usein magneettiset häiriöt esimerkiksi metallirakenteiden läheisyydessä. [23]

Pelkkä IMU ei kuitenkaan tuota suoraan sijaintitietoa. Sen mittaukset integroidaan ensin nopeudeksi ja edelleen paikaksi, mikä johtaa väistämättä virheiden kasautumiseen.

2.4.2 Muut menetelmät vedenalaisessa navigoinnissa

- Dead reckoning

IMU-pohjainen paikannus veden alla perustuu usein dead reckoning -menetelmään. Dead reckoning -menetelmässä ajoneuvon nykyinen sijainti ennustetaan aiemmin tunnetun sijainnin perusteella integroimalla nopeus-, suunta- ja aikamittauksia. Menetelmän heikkoutena on virheiden kumuloituminen, mikä aiheuttaa paikannusvirheen kasvua ajan myötä. [24]

- Anturifuusio

Kun INS yhdistetään DVL:n kanssa, saadaan DVL-avusteinen dead reckoning, joka vähentää merkittävästi paikannusvirheen kertymistä. Tällainen ratkaisu on vakiintunut erityisesti suuremmissa ja kalliimmissa UUV-järjestelmissä.

Pienemmissä ja kustannustehokkaammassa ajoneuvoissa käytetään usein MEMS-pohjaisia IMU-antureita, joiden suurempi kohinatasa asettaa lisävaatimuksia liike-ennustuksen algoritmeille ja anturifuusiolle. [25]

- Kalman Filter

Kalman-suodatin (Kalman Filter, KF) on keskeinen menetelmä liike-ennustuksen ja tilanennustuksen parantamisessa. Se yhdistää ennustemallin ja useiden antureiden mittaukset minimoiden mittauskohinan ja mallivirheiden vaikutuksen. Kalman-suodattimen avulla järjestelmä arvioi myös mittausten

luotettavuutta ottamalla huomioon anturien kohinat ja järjestelmän dynamiikkamallin. [26]

2.5 Tukijärjestelmät

2.5.1 Pintapoijut ja syväpoijut

Pintapoiju on meriveden pinnalla kelluva rakenne, joka toimii alustana ilmakehän ja meren pintakerroksen mittalaitteille. Pintapoijuihin integroidaan tyypillisesti energian tuotanto- ja varastointijärjestelmiä, datankeruulaitteistoja, viestintäyhteyksiä sekä GNSS-paikannus. Pintapoijut välittävät kerättyä mittaustietoa säännöllisin aikavälein, usein muutaman minuutin välein, kun taas esimerkiksi aallonmittausdata raportoidaan tyypillisesti harvemmin. [27], [28], [29]

Syväpoijut eli upotetut poijut sijaitsevat merenpinnan alapuolella ja on kiinnitetty ankkuriin köysi- tai kaapelikiinnityksellä ennalta määrättyyn syvyyteen. Ne tarjoavat alustan vedenalaisten ympäristöparametrien mittaamiseen ja niitä käytetään muun muassa meri- ja ilmastotutkimuksessa, sotilaallisessa valvonnassa, tsunamien havainnoinnissa sekä vedenalaisten laitteiden ja infrastruktuurin seurannassa. Syväpoijujen keräämä data voidaan siirtää pintayksikön kautta radio- tai satelliittiyhteydellä tai vaihtoehtoisesti poiju voi nousta ajoittain pintaan tiedonsiirtoa varten. Esimerkkinä tästä ovat Argo-poijut, jotka toimivat nousu-laskuperiaatteella. [27], [28], [29]

Sekä pinta- että syväpoijujärjestelmiin voidaan liittää nousukaapeli (mooring riser), jota vaijeria pitkin liikkuva profilointilaitte (wire-following profiler) voi liikkua ylös ja alas. Tällainen ratkaisu mahdollistaa ympäristöparametrien mittaamisen useilla eri syvyyksillä yhdestä kiinteästä mittauspisteestä. Mikäli nousukaapeli on induktiivinen, voidaan mittalaitteen keräämä data siirtää kaapelia pitkin pintapoijun tiedonkeruujärjestelmään ilman erillisiä liittimiä. [27], [28], [29]

2.5.2 Vedenalaiset telakointiasemat

Kaapeliyhteydellä toimivat UUV-järjestelmät ovat yleisiä erityisesti ROV-käytössä, sillä ne tarjoavat jatkuvan sähkönsyötön ja tietoliikenteen. Perinteiset telakointi- ja latausmenetelmät sisältävät akunvaihdon, jossa ajoneuvo täytyy nostaa pintaan ja akku irrottaa ja ladata aluksella. [30]

Vedenalaiset telakointiasemat tarjoavat kiinteään tai merenpohjaan asennetun alustan, johon ajoneuvo voi laskeutua, siirtää dataa ja ladata akkujaan ilman tarvetta nousta pintaan. Kun vedenalainen robotiikka kehittyy kohti yhä autonomisempia ratkaisuja, tehokas ja luotettava vedenalainen lataus on tärkeä ratkaisu. Tällä tavalla vähennetään riippuvuutta tukialuksista ja käyttökustannuksia, ja laajennetaan operatiivista toimintakyvykkyyttä. [30]

Vedenalaiset wet-mate-sähköliittimet ovat yleisin ja pitkään käytössä ollut liitännätarjous, jossa virta siirretään fyysisen kontaktin kautta. Vaikka ne ovat luotettavia, ne vaativat erittäin tarkkaa kohdistusta, altistuvat korroosiolle ja edellyttävät jatkuvaa huoltoa, mikä rajoittaa niiden sopivuutta pitkäaikaiseen autonomiseen käyttöön. [31], [32]

Uusimman kirjallisuuden perusteella (Zhang et al., 2025) vedenalaiset langattomat latausteknologiat voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: kaukokenttämenetelmiin ja lähikenttämenetelmiin. Kaukokenttämenetelmiin kuuluvat radioaallot (RF), jotka eivät sovellu lataukseen, koska meriveden korkea johtavuus vaimentaa radiosignaali; optiset järjestelmät (laser/LED), jotka soveltuvat datansiirtoon mutta eivät pysty tuottamaan riittävää lataustehoa; sekä ultraääni- ja akustiset menetelmät, jotka kykenevät siirtämään vain pieniä energiamääriä eivätkä siten täytä käytännön UUV-latauksen vaatimuksia. [31], [32]

Lähikenttämenetelmiä ovat kapasitiivinen langaton tehonsiirto (CWPT) ja induktiivinen langaton tehonsiirto (IWPT). Vaikka CWPT voi saavuttaa kohtuullisen hyötysuhteen laboratorio-olosuhteissa, sen suorituskyky heikkenee voimakkaasti merivedessä suolapitoisuuden ja ionijohtavuuden vuoksi. Sen

sijaan IWPT on noussut lupaavimmaksi vedenalaisen latauksen teknologiaksi, sillä magneettikenttään perustuva tehonsiirto on huomattavasti vähemmän herkkä meriveden johtavuudelle. Tutkimusten mukaan IWPT:llä on saavutettu korkeimmat vedenalaiset tehonsiirtotasot, hyötysuhteen ollessa 88–91 % ja tehotasojen noin 1 kW todellisissa AUV-telakointikokeissa. [32]

IWPT-teknologiaa on jo testattu onnistuneesti useiden autonomisten vedenalaisten robottien latauksissa:

- Bluefin AUV: noin 416 W latausteho
- eFolaga AUV: noin 500 W latausteho
- Tri-TON 2 AUV: noin 188 W latausteho, testattu oikeissa meriolosuhteissa

Lisäksi markkinoille on tullut myös valmiita kaupallisia ratkaisuja, kuten Blue Logic Subsea Docking Station (SDS), joka pystyy tarjoamaan jopa 2 kW langatonta latausta. [32]

3 State of the art miehittämättömässä vesirobotiikassa

3.1 Käytetty menetelmä ja arviointikehikko

Tämän osion tarkoituksena on esitellä sekä kaupalliset että tutkimuskäytössä olevat järjestelmät. Benchmarking-osiossa puolestaan tarkastellaan kunkin käyttötapauksen kannalta keskeisimpiä ja teknologisesti kehittyneimpiä olemassa olevia alustaratkaisuja sekä kaupallisesta että tutkimuskäytön näkökulmasta. Tavoitteena on kuvata, millaisiin tehtäviin kyseisiä alustoja on hyödynnetty ja mitkä niiden tekniset ominaisuudet tekevät niistä soveltuvia juuri kyseisiin käyttötarkoituksiin.

Tarkastelu perustuu kirjallisuuteen, tieteellisiin julkaisuihin sekä valmistajien tekniseen dokumentaatioon. Alustat on vertailtu systemaattisesti niiden koon,

hintaluokan ja luokittelun (esimerkiksi ROV-, AUV- ja USV-järjestelmät) perusteella. Valitut alustat edustavat erilaisia suunnittelufilosofioita ja käyttötarkoituksia, ja kukin niistä on kohdennettu ratkaisemaan tietyn tyyppinen tehtävä tai operatiivinen tarve.

ROV-, AUV- ja USV-kategorioiden yleisesittelyn jälkeen on tarkoituksenmukaista tarkastella tarkemmin yksittäisiä alustoja, jotka edustavat alan nykytilaa. Seuraavissa alaluvuissa esitellään valikoidut robotit, jotka on valittu teknologisen merkityksen, sovellusten monipuolisuuden ja saatavuuden perusteella. Kunkin robotin kohdalla käsitellään sen liikkumistapaa, navigointia, käyttökohteita ja keskeisiä ominaisuuksia.

3.2 Kauko-ohjatut vedenalaiset ajoneuvot

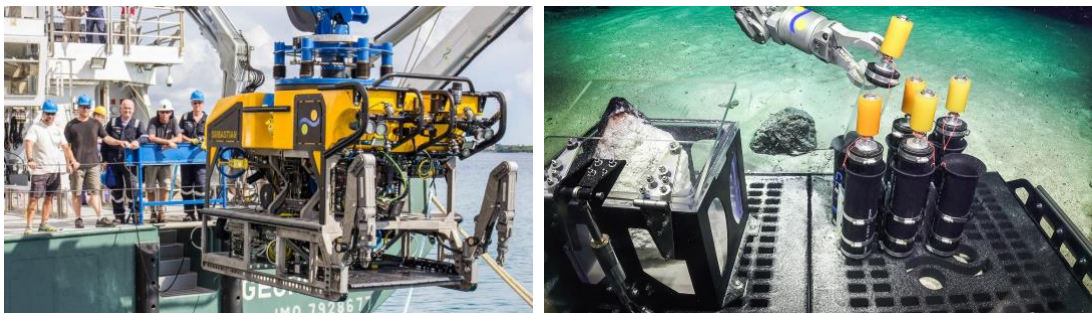
3.2.1 Subastian ROV

Subastian ROV on teollisuus- ja tutkimusluokan vedenalainen robotti, joka kuuluu Schmidt Ocean Institutin (SOI) tutkimusohjelmaan. Teollisuusluokan ROV-järjestelmät ovat kaapelilla (tether) ohjattavia vedenalaisia ajoneuvoja, jotka on varustettu kameroilla, valaisimilla, erilaisilla antureilla sekä usein myös manipulaattorivarsilla. Näitä järjestelmiä hyödynnetään laajasti tarkastus-, huolto- ja tiedonkeruutehtävissä useilla teollisuudenaloilla, kuten öljy- ja kaasuteollisuudessa, vesiviljelyssä sekä vedenalaisen infrastruktuurin kunnossapidossa. [34]

Subastian kykenee operoimaan jopa 4 500 metrin syvyydessä ja se on suunniteltu erityisesti näytteenottoon, vuorovaikutteiseen tieteelliseen tutkimukseen, kokeellisiin mittauksiin sekä uusien teknologioiden kehittämiseen ja testaamiseen. Ajoneuvon mitat ovat noin 3,1 m × 2,1 m × 1,9 m, ja sen massa on noin 3 200 kg ilmassa. Tyypillinen operatiivinen sukellus kestää keskimäärin noin kahdeksan tuntia. [33]

Subastiana operoidaan tutkimusalus R/V Falkorilta, joka tarjoaa ajoneuvon käyttöön tarvittavat tukijärjestelmät, mukaan lukien lasku- ja nostokalusto, vinssijärjestelmät, sähkönsyötön, navigointiratkaisut sekä tutkimustilat. Alusta on lisäksi varustettu laajalla tutkimusinstrumentaatiolla, johon kuuluvat muun muassa:

- manipulaattorivarret näytteiden käsittelyyn ja mekaanisiin toimenpiteisiin
- tooling valve pack ja science valve pack näytteiden imuun ja instrumenttien käyttöön
- skannaavat ja kuvaavat kaikuluotaimet
- monipuoliset valaistusratkaisut
- useita kamerajärjestelmiä, kuten tilannekamera, tutkimuskamera ja apukamerat. [34]



Kuva 5. Vasemmalta Subastian ROV:n lasku veteen, Subastian suorittamassa näytteenottoa (Schmidt Ocean Institute) [35]

Ajoneuvon navigointijärjestelmä perustuu useiden sensorien yhdistelmään, mukaan lukien liikeviitemittausyksikkö (MRU), inertianavigointijärjestelmä (INS), DVL, ultra-lyhyen perusviivan paikannusjärjestelmä (USBL), syvyyssensori sekä ääninopeusanturi (SV). Samaan korkean suorituskyvyn teollisuusluokkaan lukeutuvat myös muut edistyneet ROV-järjestelmät, kuten Odysseus ROV ja Argus RS ROV. [34]

3.2.2 Defender ROV

VideoRay ROV -alustat muodostavat kevyen luokan tarkastus-ROV-järjestelmien sarjan, joka koostuu useista kompakteista ja helposti käyttöönotettavista malleista. Sarjan kolme päämallia ovat kooltaan ja massaltaan huomattavasti pienempiä kuin raskaan teollisuusluokan ROV-järjestelmät, ja ne toimivat kaapeliyhteyden (tether) välityksellä. Alustat on suunniteltu erityisesti kevyisiin tarkastus- ja tutkimuspainotteisiin käyttötarkoituksiin, joissa vaaditaan hyvää liikuteltavuutta, nopeaa käyttöönottoa ja kustannustehokkuutta. [36]

VideoRay-sarjan mallien massa vaihtelee noin 12–17 kilogramman välillä. Defender-mallin massa on noin 17 kg, Ally-mallin noin 16 kg ja Pro 5 -mallin alle 12 kg. Defender ROV on suunniteltu operoitavaksi jopa 1 000 metrin syvyydessä, kun taas Ally ja Pro 5 soveltuvat enintään 300 metrin syvyysalueille. Kaikki mallit ovat suljetun lähdekoodin järjestelmiä ja hyödyntävät GreenSea IQ -ohjelmistoalustaa ajoneuvon ohjauksessa, käyttöliittymissä ja datanhallinnassa. [37]

Defender ROV, esitetty kuvassa 6, on kehitetty erityisesti tarkkaa paikan- ja asennonhallintaa sekä kevyen hyötykuorman käsittelyä vaativiin tehtäviin. Ajoneuvo on varustettu seitsemällä potkurilla, jotka mahdollistavat täyden kuuden vapausasteen (6 DOF) liikkeen hallinnan. [38], [39]

Ajoneuvon maksimisukellussyvyys on 1 000 metriä, ja se operoidaan kaapeliyhteyden välityksellä pintayksiköstä käsin. Defenderissä on älykamerajärjestelmä, joka sisältää integroidun tekoäly- (AI) ja koneoppimisprosessointikapasiteetin (ML), mahdollistaen esimerkiksi kohteiden tunnistuksen ja visuaalisen avustuksen operoinnin aikana. [38], [39]

Navigointia ja ympäristön havainnointia varten Defender on varustettu Tritech Micron -luotaimilla, joka on yksikeilainen pyörivä kaikuluotain. Luotain tuottaa 360 asteen sektorikuvauksen ajoneuvon ympäristöstä ja tukee ajoneuvon navigointia, paikannusta sekä esteiden havaitsemista ja väistämistä. Lisäksi

Defenderiin on integroitu kaksitoiminen manipulaattori, joka mahdollistaa tarttujan avaamisen ja sulkemisen sekä rotaatioliikkeen. Tarttujan nimellinen nostokapasiteetti on noin 10 kg. [38], [39]

Vaativampia operaatioita varten VideoRay ROV -alustoihin voidaan liittää erilaisia tehtäväkohtaisia moduuleja ja hyötykuormapaketteja, joiden avulla järjestelmä voidaan mukauttaa esimerkiksi teknisiin tarkastuksiin, mittaustehtäviin tai näytteenottoon liittyviin sovelluksiin. [38], [39]

3.2.3 BlueROV2

BlueROV2 on Blue Roboticsin kehittämä kaapeliohjattu vedenalainen robottiajoneuvo (ROV), joka on suunniteltu erityisesti tutkimus-, koulutus- ja tarkastuskäyttöön. Ajoneuvo edustaa kevyttä ROV-luokkaa ja sen massa on noin 10 kg. Laitteen syvyysluokitus on malliversion mukaan 100–300 metriä, ja se toimii noin 2–4 tunnin ajan. Energiavarastona käytetään 266 Wh litiumioniakkua (nimellisjännite 14,8 V, kapasiteetti 18 Ah), joka on sijoitettu paineenkestävään koteloon. [40]

Vakiorakenteessa BlueROV2 on varustettu kuudella Blue Roboticsin T200-potkurilla. Tämä kokoonpano mahdollistaa viiden vapausasteen (5 DOF) hallinnan ja tarjoaa riittävän liikkuvuuden tyypillisiin tarkastus- ja tutkimustehtäviin. Ajoneuvon hyötykuormakapasiteetti on noin 1,2–1,4 kg, mikä mahdollistaa erilaisten lisäantureiden ja kevyiden työkalujen integroinnin. Runkorakenne on valmistettu iskunkestävästä HDPE-muovista, ja ajoneuvo on varustettu eteenpäin suunnatulla kameralla, joka välittää reaaliaikaista 1080 p-tasoista videokuvaa pintayksikölle. [40]



Kuva 6. Vasemmalta Defender ROV, BlueROV2, Makobot AUV -tutkimusalus

Perusanturointi koostuu kolmiakselisesta gyroskoopista, kiihtyvyyssanturista ja magnetometrillä, joiden avulla mitataan ajoneuvon asento ja liike. Lisäksi järjestelmään kuuluu paine- ja lämpötila-anturi syvyyden ja ympäristöolosuhteiden seurantaan sekä virta- ja jänniteanturit energianhallinnan tueksi. Ajoneuvon kotelon tiiveyttä valvoo vuotohälytin, joka parantaa käyttövarmuutta ja turvallisuutta. Ohjaus, videokuva ja telemetriadata välitetään pintayksikköön kaapelin kautta reaaliaikaisesti. [40]

Koska GPS-signaalit eivät etene veden alla eikä vakioratkaisu sisällä inertianavigointijärjestelmää tai samanaikaisen paikannuksen ja kartoituksen (SLAM) toiminnallisuutta, BlueROV2 ei sellaisenaan kykene autonomiseen toimintaan. Ajoneuvon keskeiset vahvuudet liittyvät sen rakenteelliseen yksinkertaisuuteen, modulaarisuuteen ja kustannustehokkuuteen, minkä ansiosta se on laajasti hyödynnetty alusta tutkimus- ja opetuskäytössä sekä kokeellisissa sovelluksissa maailmanlaajuisesti. [40]

BlueROV2-alustaa on hyödynnetty esimerkiksi tutkimuksessa, jossa siitä on kehitetty edullinen ja avoimeen lähdekoodiin perustuva AUV (kuva 6). Kyseisessä kehitystyössä ajoneuvon on lisätty useita laskenta- ja sensorijärjestelmiä autonomisten toimintojen mahdollistamiseksi. [41]

Parannetussa versiossa hyödynnetään NVIDIA Jetson TX2 -laskentayksikköä, joka tarjoaa GPU-pohjaista rinnakkaislaskentaa, sekä Fitlet2-alustaa, joka on pienikokoinen x86-arkkitehtuuriin perustuva tietokone. Fitlet2 voidaan varustaa useilla Gigabit Ethernet -liitännöillä, mikä mahdollistaa suuren tiedonsiirtokapasiteetin ja useiden anturien samanaikaisen käytön. Näiden

järjestelmien avulla ajoneuvon laskentateho ja liitettävyyys kasvavat merkittävästi verrattuna alkuperäiseen ROV-kokoonpanoon. [41]

Sensorijärjestelmää laajennettiin asentamalla ajoneuvon alle synkronoitu stereokamerapari. Tämä kamerapari koostuu Baslerin GigE-konenäkökameroista. Lisäksi eteenpäin suunnatuksi asennettiin Blue Roboticsin hämäräolosuhteisiin optimoitu HD USB -kamera. Tätä kameraa käytetään yhdessä toisen kameran kanssa synkronoimattomana eteenpäin suuntautuvana stereoparina. Kokoonpanoa täydentää lisäksi korkealaatuinen IMU.

Näin laskentajärjestelmä tarjoaa verkkokapasiteetin GigE-kameroiden koko datavirran käsittelyyn sekä riittävän laskentatehon reaaliaikaiseen visuaaliseen SLAM-prosessointiin perustuvan autonomisen navigoinnin mahdollistamiseksi. [41]

3.3 Autonomiset vedenalaiset ajoneuvot

3.3.1 REMUS 100

Huntington Ingalls Industries kehittää autonomisia vedenalaisia ajoneuvoja, mihin kuuluu REMUS-sarjat. REMUS-sarjat edustavat torpedonmuotoista ja hydrodynaamisesti optimoitua ajoneuvoluokkaa. Sarjaan kuuluu neljä päämallia: REMUS 100, REMUS 300, REMUS 620 ja REMUS 6000. Mallinumerot viittaavat ajoneuvojen suurimpaan toimintasyvyyteen, joka vaihtelee 100–6000 metriin saakka. REMUS-sarjaa on hyödynnetty laajasti sekä sotilaallisissa että siviilitutkimukseen liittyvissä sovelluksissa, kuten merenpohjan kartoituksessa, ympäristön monitoroinnissa ja miinantorjunnassa. [42]

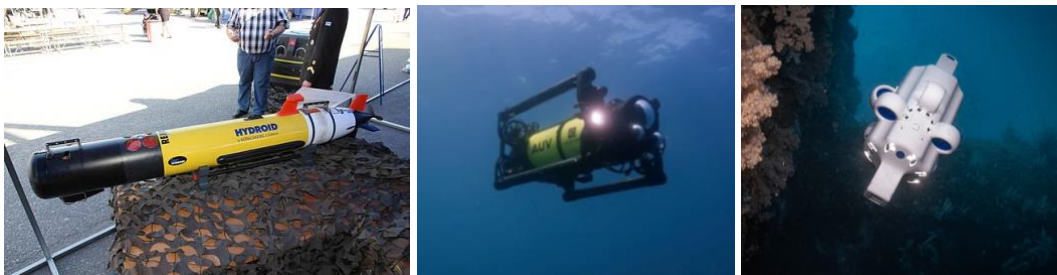
REMUS 100 on sarjan pienikokoisin ja kevyin malli, ja se on suunniteltu erityisesti rannikkoalueiden ja matalien vesien operaatioihin. Ajoneuvon pituus on tyypillisesti noin 1,6–1,7 metriä ja massa varustelun mukaan noin 37–40

kilogrammaa. Käytettävästä akkuteknologiasta ja sensorikokoonpanosta riippuen REMUS 100 kykenee operoimaan veden alla yhtäjaksoisesti noin 10–20 tunnin ajan ja kulkemaan yhden tehtävän aikana useita kymmeniä kilometrejä. Ajoneuvon kompakti koko mahdollistaa sen laskemisen veteen pieniltä aluksilta, miehittämättömiltä pinta-alustoilta tai jopa suoraan rannasta käsin, mikä lisää merkittävästi järjestelmän operatiivista joustavuutta. [42]

Ajoneuvo hyödyntää pintautuessaan WAAS-tuettua GPS-paikannusta sijaintivirheen korjaamiseen, ja vedenalaisessa tilassa se voi vastaanottaa paikkapäivityksiä akustisen modeemin kautta esimerkiksi LBL- tai USBL-paikannusjärjestelmistä. Viestintä ja tehtäväparametrien päivitys voidaan lisäksi toteuttaa Iridium-satelliittiyhteyden tai lähialueella WiFi-yhteyden avulla, mikä laajentaa ajoneuvon operatiivista autonomiaa ja mahdollistaa tehtävien dynaamisen hallinnan. [43]

Suomessa REMUS 100 -ajoneuvoja on hyödynnetty Puolustusvoimien miinan- torjuntatehtävissä sekä tutkimusorganisaatioiden suorittamassa ympäristön seurannassa ja merenpohjan kartoituksessa. Ajoneuvon autonominen toimintakyky, sivuttaissuuntaisella kaikuluotaimella toteutettu havainnointi sekä tarkka navigointijärjestelmä mahdollistavat merenpohjan systemaattisen kartoituksen ja miinamaisia kohteita muistuttavien objektien tunnistamisen turvallisen etäisyyden päästä ilman, että operaatio altistaa henkilöstöä tai kalustoa suoralle vaaralle. [44]

REMUS 100 hyödyntää monianturiseen tiedonfuusioon perustuvaa navigointijärjestelmää, jossa inertiamittaukset, DVL, akustinen paikannus ja ajoittaiset GPS-päivitykset yhdistetään jatkuvaksi ja yhtenäiseksi sijaintiarvioksi koko tehtävän ajan. Navigointijärjestelmän ytimen muodostaa T-16-inertianavigointijärjestelmä (INS), joka sisältää inertiamittausyksikön (IMU) sekä nopeusanturin ajoneuvon asennon, suunnan ja liikkeen arvioimiseksi. INS-järjestelmää täydentää DVL, joka mittaa ajoneuvon nopeutta suhteessa merenpohjaan ja parantaa merkittävästi paikannuksen tarkkuutta. [43]



Kuva 7. Vasemmalta Remus 100, Boxfish, Hydrus

3.3.2 Boxfish AUV

Boxfish AUV on Uudessa-Seelannissa toimivan Boxfish Roboticsin kehittämä autonominen vedenalainen ajoneuvo, jonka nimellinen toimintasyvyys ulottuu 600 metriin. Ajoneuvon rakenteessa on neljä vapaata liitántärajapintaa, joiden avulla järjestelmään voidaan integroida lisäensoreita ja kaikuluotaimia tehtäväkohtaisen tarpeen mukaan. Modulaarinen ja laajennettava kokonaisuus tukee sekä täysin autonomista, langatonta operointia että kaapeliyhteyteen perustuvaa manuaalista ohjausta. Tämä kaksitilainen toimintamalli mahdollistaa sen, että käyttäjä voi valita tilanteen mukaan joko autonomisen suorituksen tai suoran operatiivisen hallinnan esimerkiksi tarkastuksen, riskienhallinnan tai kokeellisen mittauksen aikana. [45]

Keskikokoisten AUV-järjestelmien navigointiratkaisut noudattavat usein samankaltaista perusarkkitehtuuria, mutta Boxfish-järjestelmässä korostuu hybridinavigointiin perustuva lähestymistapa. Ajoneuvon paikannus ja liikeestimointi muodostuvat useiden mittauslähteiden yhdistelmästä: inertiamittausyksikkö (IMU) ja syvyysanturi tuottavat perustan asennon ja syvyyden arvioinnille, DVL mittaa nopeutta suhteessa merenpohjaan, ja akustinen paikannus toteutetaan USBL-järjestelmän avulla. [45]

Lisäksi järjestelmä hyödyntää stereonäköä suhteellisen liikkeen arviointiin sekä ympäristön havainnointiin, mikä tukee käytännössä myös esteiden välttämistä ja reitin turvallista suorittamista. Yhdellä akun latauksella ajoneuvon arvioitu toimintasäde on noin 6 km, mikä vastaa tyypillisesti noin 10 tunnin

operointiaikaa käyttöprofiilista ja olosuhteista riippuen. Tutkimuskäyttöön tarkoitetun version yhteydessä toimitetaan ohjeistus ROS 2 -rajapinnan hyödyntämiseen ja järjestelmän toiminnallisuuksien laajentamiseen, mikä tukee integroitavuutta tutkimusympäristöihin ja kokeellisiin sovelluksiin. [45]

Boxfish AUV:ta käytetään monipuolisissa ympäristö- ja seurantatehtävissä, kuten koralliriuttojen tutkimuksessa ja pitkittäisseurannassa, fotogrammetristen mallien tuottamisessa, merenpohjan kartoituksessa sekä kalojen ja haitallisten vieraslajien havainnoinnissa. Tehtäväsuunnittelu toteutetaan Boxfish SafePath Planner -ohjelmistolla, jossa operaattori voi määrittää reitin graafisesti, lisätä reittipisteitä sekä asettaa operatiivisia parametreja, kuten nopeuden, syvyyden ja ajokorkeuden. Sukelluksen aikana Boxfish Commander -ohjelmisto tarjoaa reaaliaikaisen näkymän ajoneuvon tilatietoihin ja tehtävän etenemiseen, mikä parantaa operointia, tilannetietoisuutta ja tehtävähallintaa. [46]

3.3.3 Hydrus

Hydrus AUV on Advanced Navigationin kehittämä tieteellinen vedenalainen robotti, joka on suunniteltu vedenalaisten elinympäristöjen monitorointiin, merenpohjan kartoitukseen, rakenteiden tarkastukseen sekä kohteiden paikantamiseen ja luokitteluun. Ajoneuvossa on 4K-kamera 60 fps kuvataajuudella, mikä tukee tekoälypohjaista kuvantunnistusta ja laadun analysointia. Pienikokoisena (52 × 26 × 24 cm) ja vain 6 kilogrammaa painavana Hydrus soveltuu erityisesti kirkkaisiin, matalan sameuden vesistöihin. [47], [48]

Hydrus kuuluu pienikokoisten AUV-ajoneuvojen luokkaan, ja sen navigointijärjestelmä koostuu akustisesta modeemista sekä tekoälyavusteisesta navigoinnista, joka hyödyntää Kalman-suodatinta. Käytössä oleva akustinen navigointijärjestelmä on Subsonus USBL, jonka on kehittänyt sama yritys. Se on akustinen paikannusjärjestelmä, joka tuottaa ajoneuville etäisyys- ja suuntatiedot sekä sisältää sisäisen inertianavigointijärjestelmän (INS) ja syvyysanturin. [47], [48]

Navigointijärjestelmä sisältää myös DVL:n, joka antaa reaaliaikaista tietoa ajoneuvon nopeudesta ja liikesuunnasta sekä tukee dead reckoning - navigointia. Subsonus USBL toimii puolestaan ulkoisena tukisensorina, joka täydentää Hydruksen sisäisen INS- ja DVL-järjestelmän navigointia. [47], [48]

3.4 Veden pinnalla olevat ajoneuvot

3.4.1 Saildrone USV

Saildrone on miehittämätön pinta-alus, joka on suunniteltu pitkäkestoisiin ja autonomisiin merellisiin tehtäviin. Aluksen pituus on noin 7 metriä. Sen liikkuminen perustuu noin 6 metriä korkeaan jäykkään siipipurjeeseen, joka hyödyntää tuulivoimaa (kuva 9). Aluksen sähköjärjestelmät ja sensorit saavat energiansa pääosin aurinkoenergiasta. Yhdessä tuuli- ja aurinkoenergia mahdollistavat jopa 12 kuukauden yhtäjaksoisen käytön. [49], [50]

Aluksen satelliittipohjainen tiedonsiirto mahdollistaa käytännössä rajattoman toiminta-alueen. Mittausdataa voidaan lähettää maa-asemille lähes reaaliajassa, mikä mahdollistaa jatkuvan seurannan myös syrjäisillä merialueilla. [49], [50]

Navigoinnin ja turvallisen toiminnan tukena Saildrone hyödyntää elektro-optisia kameroita sekä tekoälyä ja koneoppimismenetelmiä. Näiden avulla alus kykenee havaitsemaan esteitä ja tunnistamaan mahdollisia uhkia. Lisäksi alus on varustettu meritutkalla, jota käytetään navigointiin ja törmäyksenestoon. [49], [50]

Aluksen sensorikokonaisuus voidaan mukauttaa tehtävän mukaan. Ympäristön seurantaan käytetään sensoreita, joilla mitataan esimerkiksi veden lämpötilaa, suolapitoisuutta ja liuennutta happea. Näitä mittauksia hyödynnetään muun muassa sääennusteissa, ilmastotutkimuksessa ja meriympäristön tilan seurannassa. [51]



Kuva 8. Saildrone, autonominen USV [52]

Lisäksi Saildrone voidaan varustaa vedenalaisiin mittauksiin ja merenpojan kartoitukseen soveltuvilla järjestelmillä. Tällöin alukseen integroidaan monikeilainluotaimia, joiden avulla voidaan kartoittaa merenpohjan muotoja ja syvyyksiä. [52]

3.4.2 Otter USV

Otter USV on modulaarinen ja kompaktikokoinen pinta-alus, jonka on kehittänyt Maritime Robotics. Alus painaa 85 kg ilmassa ja sen toiminta-aika on noin 20 tuntia. Ajoneuvon 30 kg:n hyötykuorma mahdollistaa erilaisten lisäjärjestelmien integroinnin tarkkaa tiedonkeruuta, seuranta ja kartoitusta varten. [53]

Kyseessä on norjalainen USV-järjestelmä ja sen navigointianturit on kehittänyt Kongsberg. Otteria käytetään sovelluksissa, kuten batymetriassa ja hydrografisissa kartoituksissa, tieteellisessä tiedonkeruussa sekä pienten järvien, kanaalien, jokien, lampien ja satama-alueiden valvonnassa ja turvaamisessa. [53]



Kuva 9. Otter USV (Maritime Robotics) [53]

Otterin autonominen navigointijärjestelmä koostuu kolmesta yhteen toimivasta osa-alueesta. Vehicle Control System (VCS) on operointijärjestelmä, joka mahdollistaa tehtävien suunnittelun, aluksen tilan seurannan sekä etäohjauksen. Aluksen sisäinen SeaControl-järjestelmä toimii autonomisena ohjausyksikkönä, joka vastaa tehtävien suorittamisesta, potkurien hallinnasta sekä GPS- ja IMU-datan käsittelystä. Kun tehtävä on lähetetty VCS:stä, SeaControl ottaa aluksen hallintaansa ja navigoi Otteria autonomisesti. [53], [54]

Järjestelmän kolmas komponentti, SeaSight, tarjoaa alukselle 360 asteen tilannekuvan. Järjestelmä hyödyntää rungon kameroita ja AIS-järjestelmää, mikä mahdollistaa ympäristön havainnoinnin ja tukee sekä operaattorin tilannetietoisuutta että autonomista navigointia. [53], [54]

Eräässä tutkimuksessa Otterille on kehitetty myös avoimen lähdekoodin ohjelmistokerros, OtterROS, joka perustuu ROS 2 -alustaan. Sen tarkoituksena on helpottaa Otterin käyttöä tutkimuksessa ja kehityksessä. Paketti on Offroad Robotics -tutkimusryhmän (Queen's University, Kanada) kehittämä ja siihen liittyviä valmiita koodeja on saatavilla GitHubissa. [55]

4 Vedenalaisen robotiikan benchmarkkaus

Miehittämättömiä vedenalaisia ajoneuvoja käytetään hyvin erilaisissa toimintaympäristöissä ja tehtävissä, joten yksittäinen tekninen ominaisuus, kuten toimintatehokkuus tai yksittäinen sensori, ei riitä kuvaamaan järjestelmien soveltuvuutta. Tässä työssä benchmarkkaus perustuu ominaisuuksiin ja käyttötapauksiin, joissa vertaillaan, millaiset alustat ja laitteet soveltuvat parhaiten tiettyihin vaatimuksiin.

4.1 Alustojen vertailutaulukko

Tämän osion taulukossa vertaillaan valittuja droonialustoja Urban Mobile Robotics -hankkeen näkökulmasta. Hankkeessa vesirobotiikan käytössä kaupunkiympäristössä korostuivat etenkin rannikkoalueille sijoittuvat tehtävät. Taulukossa 4 esitetään valittujen kaupallisten ja tutkimuskäyttöön tarkoitettujen vedenalaisten droonialustojen vertailuanalyysi.

Taulukko 4. Valittujen vedenalaisten droonien vertailu [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65]

Alusta	Maa	Mitat (mm)	Syvyys (m)	Nopeus (knots)	Paino (kg)	Hyötykuorma	Navigointi	Viestintä	Luotain	Toiminta-aika (t)
Falcon ROV	UK	1000 x 500 x 600	300	3,2	60	14 kg	-	Kaapeli (tether)	Kuvaava luotain	24/7
BlueROV2	USA	457 x 338 x 254	300	3,0	12	1–2 kg	DVL (valin)	Kaapeli	Kamera	2–4
Defender ROV	USA	713 x 392 x 241	300–1000	3,8	17	2–5 kg	DVL, INS	Kaapeli	Monikeilainluotain	24/7
Quadroin AUV	Saksa	1120 x 320 x 320	150	10,0	24	3 kg	GNSS, INS	Radio / akustinen	Sivuttaissuuntaiset	12
ARV-I AUV	Uusi-Seelanti	756 x 650 x 340	300–600	2,5	28	-	DVL, USBL	Akustinen	Monikeilainluotain	10
Hydrus AUV	Australia	520 x 260 x 240	300	1,5	7	-	DVL, USBL	Akustinen	vSLAM	2
Fifish V6 ROV	Kiina	383 x 331 x 143	100	3,0	4,6	-	-	Kaapeli	Kamera	5
Chasing X ROV	Kiina	810 x 640 x 450	350	4,5	45	-	DVL, USBL	Kaapeli	Laser-mittaus, sonar	2
Spectra ROV	Kanada	790 x 590 x 300	1000	4,0	38	-	DVL	Kaapeli	3D-luotain	-
Blueye X1 ROV	Norja	480 x 260 x 350	1000	3,0	8,6	-	-	Kaapeli	Kamera	2

Taulukossa vertailu keskittyy keskeisiin suorituskykyindikaattoreihin, kuten syvyysluokitukseen, hyötykuormakapasiteettiin, navigointijärjestelmiin sekä viestintämenetelmiin. Puuttuvia kohtia ei oltu ilmoitettu tuotteiden valmistajien verkkosivustoilla.

Taulukon perusteella voidaan havaita, että suurin osa ROV-alustoista on suunniteltu toimimaan noin 100–300 metrin syvyydessä. Tämä riittää hyvin rannikkoalueiden tarkastus- ja tutkimustehtäviin. Edistyneemmät ROV-järjestelmät, kuten Spectra ja Blueye X1, kykenevät operoimaan jopa 1000 metrin syvyydessä. Tämä asettaa korkeammat vaatimukset rakenteelliselle lujuudelle ja paineenkestolle, ja on suunnattu teollisiin ja vaativiin operaatioihin.

Navigointijärjestelmien osalta perustason ROV-alustat hyödyntävät kaapeliyhteyteen perustuvaa manuaalista ohjausta. Edistyneemmät järjestelmät hyödyntävät DVL, INS sekä USBL, joiden avulla voidaan määrittää aluksen sijainti ja liike autonomista operointia varten ja ilman suoraa visuaalista ohjausta.

Taulukon perusteella voidaan havaita selkeä yhteys alustan kustannusten ja suorituskyvyn välillä. Taulukon mukaan alustan valinta riippuu vahvasti käyttökohteesta. Tutkimus- ja kehityskäyttöön riittää usein kustannustehokas ja muokattava ratkaisu, kuten BlueROV2, kun taas teolliset sovellukset vaativat korkeamman luotettavuuden ja suorituskyvyn järjestelmiä, kuten Hydrus ja ARV-i.

4.2 Käyttötapauksiin perustuva benchmarkkaus

Tämän osion vertailun tavoitteena on arvioida eri alustatyyppeiden soveltuvuutta tiettyihin operatiivisiin tehtäviin. Benchmarkkaus perustuu analyysiin, jossa huomioidaan operatiivinen ympäristö, toimintamalli, navigointi ja paikannus, kesto ja energiaratkaisut, käytettävyys ja saatavuus.

Taulukko 5. Käyttötapaus: satamaympäristön ja infrastruktuurin tarkastus

Vertailukriteeri	ROV	AUV	USV
Toimintamalli	Reaaliaikaisesti kauko-ohjattu	Autonominen/ puoliautonominen	Autonominen/ kauko-ohjattu
Tyypillinen rooli	Lähietäisyydeltä suoritettava tarkastus	Ennalta määriteltyjen reittien kartoitus	Pintatason valvonta
Navigointiratkaisut	Kamera ja luotainpohjainen havainnointi	INS, DVL ja akustiset paikannusjärjestelmät	GNSS-pohjainen paikannus
Reaaliaikainen tiedonsiirto	Kaapeliyhteyden kautta (tether)	Vähäinen, tiedonsiirto tehtävän suorituksen jälkeen	Radio tai satelliittiyhteyksillä
Tehtävän kesto	Lyhyt	Keskipitkä	Pitkä
Toiminta-alue	Paikallinen	Laaja	Laaja
Liikunta-mekanismit	Monisuuntainen usein 5–6 DOF	Rajoitetut liikevapaudet	Pintakulkuun suunniteltu
Soveltuvuus haastaviin olosuhteisiin (sameus, rakenteet)	Kohtalainen rakenteiden läheisyydessä	Rajoitettu rakenteisissa ympäristöissä	Hyvä pintaympäristössä
Keskeiset vahvuudet	Tarkkuus ja hallittavuus	Autonominen toiminta ja peitto	Pitkäkestoinen seuranta
Keskeiset rajoitteet	Kaapeli-riippuvuus ja rajallinen peitto	Tiedonsiirto reaaliajassa	Ei vedenalaista lähitarkastusta

Taulukon perusteella ROV-järjestelmät soveltuvat parhaiten satamaympäristön tarkastustehtäviin, joissa vaaditaan reaaliaikaista ohjausta ja tarkkaa visuaalista havainnointia. AUV-järjestelmät tarjoavat etuja laajojen alueiden autonomisessa kartoituksessa, mutta niiden soveltuvuus rakenteellisesti monimutkaisiin ympäristöihin on rajoitetumpaa ja vaatii todella tarkkaa järjestelmää.

Suurin osa AUV-järjestelmistä ovat torpedonmuotoisia minimoidakseen virrankulutuksen ja maksimoidakseen akun käyttöiän ja tehtävän keston. Torpedonmuotoiset AUV-järjestelmät ovat luonteeltaan aliohjattuja ja vaikka niillä on teoreettisesti kuusi vapausastetta, ne pystyvät aktiivisesti hallitsemaan ainoastaan etenemisliikettä, sivuttaisliikettä ja suuntakulmaa. [66]

AUV-järjestelmissä ei ole pystysuuntaista liikettä ohjaavia potkureita, joten niiden kyky ylläpitää tarkkaa syvyyttä ja seurata pystysuuntaisia liikeratoja on rajallinen. Erään tutkimuksen vertailusimulaatiot osoittavat, että tämä voi aiheuttaa merkittäviä paikannusvirheitä z-akselin suunnassa. Toisaalta torpedomainen muoto ja toimilaitteiston vähäisempi monimutkaisuus parantavat hydrodynaamista vakautta sekä ajoneuvon kykyä sietää ulkoisia häiriöitä. Tämän vuoksi torpedonmuotoiset AUV-järjestelmät soveltuvat hyvin pitkäkestoisiin ja laaja-alaisiin tehtäviin, mutta eivät tarkkuutta vaativiin tarkastustehtäviin. [66]

Taulukko 6. Käyttötapaus: ympäristön ja vedenlaadun seuranta

Vertailukriteeri	ROV	AUV	USV
Mittausstrategia	Pistemuotoinen, operaattorin ohjaama	Ennalta ohjelmoitu reitin seuranta	Jatkuva ja toistuva mittaus
Ajallinen kattavuus	Hetkellinen	Jaksoittain ja säännöllinen	Pitkäkestoinen ja jatkuva
Energiatehokkuus	Kohtalainen	Hyvä	Erittäin hyvä
Datan saatavuus	Reaaliaikainen	Viiveellinen	Reaaliaikainen
Alueellinen kattavuus	Pieni, paikallinen kohdealue	Laaja vedenalainen alue	Laaja pinta-alue
Sää- ja ympäristöherkkyys	Vedenalainen melko pieni	Pieni	Suuri, aallokko, tuuli ja jää vaikuttavat

Taulukon perusteella USV-järjestelmät soveltuvat parhaiten ympäristön mittauksen pitkäkestoiseen seurantaan, sillä ne mahdollistavat jatkuvan mittauksen ja laajan toiminta-alueen. Toinen hyvä puoli USV-järjestelmissä on reaaliaikainen tiedonsiirto GNSS-yhteydessä, ja energiatehokkuus tuulivoimaa ja aurinkovoimaa käyttäen.

Sääolosuhteilla on kuitenkin suuri vaikutus USV-järjestelmän toimintakykyyn, mikä tarkoittaa, että alustan on oltava hyvin suunniteltu erilaisiin olosuhteisiin.

Vaihtoehtoisesti sitä voidaan käyttää vain tiettyinä ajankohtina ja siirtää pois ennen ennustettuja sääolosuhteiden muutoksia.

AUV-järjestelmät toisaalta täydentävät ympäristöseurantaan mahdollistamalla autonomisen mittauksen veden alla ja laajemmilla alueilla, mutta rajoitteena on mittausdatan viiveellinen saatavuus.

4.3 Tulokset ja vertailuanalyysi

Benchmarkkauksen perusteella eri miehittämättömien vesialustojen soveltuvuus vaihtelee merkittävästi käyttötapauksen, toimintaympäristön sekä operatiivisten vaatimusten mukaan. Esimerkiksi alustan liikuntamekanismit ja siihen liittyvät liikevapaudet, energiatehokkuus ja navigointiratkaisut vaikuttavat ratkaisevasti siihen, millaisiin tehtäviin eri järjestelmät soveltuvat parhaiten.

ROV-järjestelmien monisuuntainen potkuripohjainen liikuntamekanismi mahdollistaa ajoneuvon paikallaan leijunnan sekä tarkan liikkeen hallinnan rakenteiden läheisyydessä. Tämä tekee ROV-alustoista soveltuvan vaihtoehdon tarkastus- ja näytteenottotehtäviin, jossa tarvitaan laitteen tarkkaa sijoittelua sekä reaaliaikaista ohjausta. Esimerkiksi Subastian ROV edustaa teollisuus- ja tutkimusluokan ROV-järjestelmiä, jossa on tarkka liikkeen hallinta jopa vaativissa olosuhteissa. Kevyempiä ja pienikokoisempia versioita voivat olla VideoRay-kategoriat alustat.

AUV-järjestelmät hyödyntävät pääasiassa eteenpäin suuntautuvaa, virtaviivaiseen runkoon perustuvaa liikuntamekanismia. Energiatehokkuuden ja pitkäkestoisen liikkeen ansiosta nämä soveltuvat hyvin laajojen alueiden autonomiseen mittaukseen ja kartoitukseen, offshore-öljy- ja kaasuteollisuuteen ja miinantorjuntaan.

Perinteistä torpedonmuotoisia AUV-ratkaisua edustavat Yhdysvaltojen Remus-sarjat ja Norjan Hugin-sarjat, joita käytetään laajasti sekä sotilaallisissa että tieteellisissä sovelluksissa. Hybridiohjauksen lähestymistapaa edustaa Boxfish

AUV, jossa useampiin vapausasteisiin perustuva liikuntajärjestelmä mahdollistaa paremman liikkeen hallinnan ja soveltuu tarkempiin mittauksiin.

USV-järjestelmien liikuntamekanismi perustuu pintakulkuun ja tuulivoiman ja aurinkovoiman hyödyntämiseen, joka mahdollistaa energiatehokkaan ja pitkäkestoisen toiminnan. Sen lisäksi reaaliaikaisen tiedonsiirto tekee USV-alustoista erityisen soveltuvia jatkuvaan vedenlaadun ja ympäristön seurantaan.

5 Yhteenveto

Raportissa tarkastellaan vedenalaisen robotiikan teknologioita, vertaillaan ROV-, AUV- ja USV-järjestelmiä sekä arvioidaan niiden soveltuvuutta eri käyttötapauksiin. Keskeinen johtopäätös on, että eri alustatyypeillä on selvästi toisistaan poikkeavat vahvuudet: ROV-järjestelmät soveltuvat parhaiten tarkkuutta ja reaaliaikaista ohjausta vaativiin lähitarkastuksiin, AUV-järjestelmät laajojen alueiden autonomiseen kartoitukseen ja mittaukseen ja USV-järjestelmät pitkäkestoiseen ja energiatehokkaaseen ympäristön seurantaan. Raportti korostaa myös sitä, että navigointiin, energiatehokkuuteen, tiedonsiirtoon ja toimintaympäristön olosuhteisiin liittyvät tekijät määrittävät ratkaisevasti, mikä järjestelmä on kuhunkin tehtävään sopivin.

Urban Mobile Robotics -hankkeen näkökulmasta raportin löydökset ovat erityisen merkityksellisiä, koska urbaanissa vesiympäristössä tarvitaan eri tehtäviin soveltuvia robotiikkaratkaisuja. Satamien, siltojen, rantarakenteiden ja muun vedenalaisen infrastruktuurin tarkastuksissa korostuvat ROV-järjestelmien tarkka hallittavuus ja reaaliaikainen havainnointi, kun taas AUV-järjestelmät tarjoavat mahdollisuuksia laajempaan merenpohjan kartoitukseen, ympäristömonitorointiin ja toistettaviin mittausreitteihin. USV-järjestelmät puolestaan soveltuvat hyvin pitkäkestoiseen vedenlaadun, pintavesien ja kaupunkiympäristön vesiekosysteemien seurantaan, koska ne mahdollistavat jatkuvan mittauksen ja tiedonsiirron.

Näin ollen raportti osoittaa, että Urban Mobile Robotics -hankkeessa vedenalainen robotiikka ei näyttäydy yhtenä yksittäisenä teknologiana, vaan toisiaan täydentävien ratkaisujen kokonaisuutena, jonka avulla voidaan vastata kaupunkiympäristön turvallisuuteen, ympäristön tilan seurantaan ja infrastruktuurin kunnossapitoon liittyviin haasteisiin.

Lähteet

1. Simpson, S. Unmanned Underwater Vehicles - UUV, AUV, ROV. Unmanned Systems Technology. Saatavilla:
<https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/unmanned-underwater-vehicles-uuv/> (Viitattu: 12.1.2026).
2. Grepow (2024) AUV vs. UUV: What's the Difference? Saatavilla:
<https://www.grepow.com/blog/auv-vs-uuv-what-is-the-difference.html>
(Viitattu: 12.1.2026).
3. Advanced Navigation (n.d.) Autonomous Systems. Saatavilla:
<https://www.advancednavigation.com/autonomous-systems/> (Viitattu: 12.1.2026).
4. Unmanned Surface Vehicles (USVs). WindWard. Saatavilla:
<https://windward.ai/glossary/unmanned-surface-vehicles-usvs/>
(Viitattu: 12.1.2026).
5. Meschini, A., Ridolfi, A., Gelli, J., Pagliai, M. ja Rindi, A. (2019) Pressure hull design methods for unmanned underwater vehicles. Journal of Marine Science and Engineering, 7(11), 382. Saatavilla:
<https://doi.org/10.3390/jmse7110382> (Viitattu: 12.1.2026)
6. Pereira, P.N.A.A.S. (2021) Housing components for autonomous underwater vehicles: Design and structural validation via finite element analysis. Saatavilla: <https://recipp.ipp.pt/bitstreams/38d023e3-6e87-47c6-93ab-10e576b01502/download> (Viitattu: 12.1.2026).
7. Globe Composite (2024) Buoyancy in submersibles and submarines. Saatavilla: <https://www.globecomposite.com/blog/buoyancy-in-submersibles-and-submarines> (Viitattu: 12.1.2026).

8. Advanced Navigation (2022) *Acoustic positioning and navigation – an introduction*. Saatavilla: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/acoustic-positioning-and-navigation/> (Viitattu: 1.3.2026).
9. Campagnaro, F., Steinmetz, F. ja Renner, B.-C. (2023) Survey on low-cost underwater sensor networks: From niche applications to everyday use. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 125. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/jmse11010125> (Viitattu: 1.3.2026).
10. Mallios, A., Ribas, D. ja Ridao, P. (2009) Localization advances in the unstructured underwater environment. Teoksessa: *Proceedings of the 9th Hellenic Symposium of Oceanography and Fishery*, vol. 1, s. 111–116. Saatavilla: https://www.researchgate.net/profile/Angelos_Mallios/publication/235955189_Localization_Advances_in_the_Unstructured_Underwater_Environment/links/5530d6fb0cf2f2a588ab3d4e/Localization-Advances-in-the-Unstructured-Underwater-Environment.pdf (Viitattu: 1.3.2026).
11. Blue Robotics (2026) Spreadsheet data. A Wave of Sonars & DVLs. Saatavilla: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ajVTSS8elzIrvq-TEKv2Yv8kwd5INhKTTD6FZZpN4eE/edit> (Viitattu: 1.3.2026).
12. Water Linked (2024) Underwater GPS. Saatavilla: <https://www.waterlinked.com/underwater-gps> (Viitattu: 25.3.2026).
13. Blue Robotics (2023) A smooth operator's guide to underwater sonars and acoustic devices. Saatavilla: <https://bluerobotics.com/learn/a-smooth-operators-guide-to-underwater-sonars-and-acoustic-devices/> (Viitattu: 1.3.2026).
14. McDicken, W.N. ja Anderson, T. (2011) *Basic physics of medical ultrasound*. Teoksessa: McDicken, W.N. (toim.) *Diagnostic ultrasound: Physics and equipment*. 2. painos. Elsevier, s. 1–19. Saatavilla: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:27423014> (Viitattu: 1.3.2026).

15. Advanced Navigation (2024) DVL (Doppler Velocity Log). Saatavilla: <https://www.advancednavigation.com/glossary/dvl/> (Viitattu: 1.3.2026).
16. NOAA Ocean Exploration (2020) Multibeam sonar. Saatavilla: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sonar-multibeam/> (Viitattu: 1.3.2026).
17. Cerulean Sonar (n.d.) Surveyor 240-16 MBES. Saatavissa: <https://ceruleansonar.com/product/surveyor-240-16/> (Viitattu 20.2.2026).
18. Geo-matching (2022) How USV-mounted multibeam echosounder enhances accuracy in bridge pier scouring survey. Saatavissa: <https://geo-matching.com/articles/how-usv-mounted-multibeam-echosounder-enhances-accuracy-in-bridge-pier-scouring-survey> (Viitattu 20.2.2026).
19. Kordil Surveying & Engineering Ltd. Co. (n.d.) Norbit iWBMS Standart multibeam sonar. Saatavissa: <https://kordil.com/distributorships/norbit/norbit-iwbms> (Viitattu 20.2.2026).
20. Teledyne Marine (n.d.) MB2. Saatavissa: <https://www.teledynemarine.com/brands/odom-hydrographic/mb2> (Viitattu 20.2.2026).
21. NOAA Ocean Exploration (2020) Side-scan sonar. Saatavilla: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/sonar-side-scan/> (Viitattu: 1.3.2026).
22. Zhang, S., Zhao, S., An, D., Liu, J., Wang, H., Feng, Y., Li, D. ja Zhao, R. (2022) Visual SLAM for underwater vehicles: A survey. Computer Science Review, 46, 100510. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2022.100510> (Viitattu: 18.1.2026).

23. Advanced Navigation (2023) Inertial measurement unit (IMU) – an introduction. Saatavilla: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/inertial-measurement-unit-imu-an-introduction/> (Viitattu: 18.1.2026).
24. Advanced Navigation (2022) An introduction to dead reckoning. Saatavilla: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/an-introduction-to-dead-reckoning/> (Viitattu: 18.1.2026).
25. Einarsson, E.M. ja Lipenitis, A. (2020) MPC control for the BlueROV2 – Theory and Implementation. Diplomityö / Master's thesis. Aalborg University. Saatavilla: https://projekter.aau.dk/projekter/files/387609647/MPC_control_for_the_BlueROV2_Theory_and_Implementation.pdf (Viitattu: 7.2.2026).
26. Advanced Navigation (2021) How AI is revolutionising inertial navigation. Saatavilla: <https://www.advancednavigation.com/tech-articles/how-ai-revolutionising-inertial-navigation/> (Viitattu: 18.1.2026).
27. Petraitis, D. C., Callaway, J., Elliott, M., Kern, K. J., Seal, J., Smith, B. C. ja Vasquez, M. B. (2025) Utilizing Uncrewed Surface Vehicles (USVs) in operational buoy networks. Saatavilla: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025AMS...10550510P/abstract> (Viitattu: 18.1.2026).
28. Argo (2026) Argo floats and global ocean observing system. Saatavilla: <https://argo.ucsd.edu/> (Viitattu: 18.1.2026).
29. Ocean Observatories Initiative (OOI) (2024) Global Station Papa Array. Saatavilla: <https://oceanobservatories.org/site/gso1sumo/> (Viitattu: 18.1.2026).
30. Lin, M., Lin, R., Yang, C., Li, D., Zhang, Z., Zhao, Y. ja Ding, W. (2022) Docking to an underwater suspended charging station: Systematic design

- and experimental tests. Ocean Engineering. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110766>. (Viitattu: 18.1.2026).
31. Zhang, H., Wang, J., Li, X., Chen, Y. ja Wu, Q. (2025) Inductive wireless power transfer for autonomous underwater vehicles: A comprehensive review of technological advances and challenges. Journal of Marine Science and Engineering. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/jmse13101855> (Viitattu: 18.1.2026).
32. Bobba, P.B., Rao, R.K. ja Chinthamaneni, S.S.V. (2022) Wireless power transfer in autonomous underwater vehicles. Teoksessa: 2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT), Hyderabad, India, s. 1–5. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/SeFeT55524.2022.9909064> (Viitattu: 18.1.2026).
33. Schmidt Ocean Institute (2024) 4500 m remotely operated vehicle (ROV SuBastian). Saatavilla: <https://schmidtocean.org/technology/robotic-platforms/4500-m-remotely-operated-vehicle-rov/> (Viitattu: 22.10.2025).
34. NOAA Ocean Exploration (2025) Exploration vehicle summary sheets. Saatavilla: <https://oceanexplorer.noaa.gov/wp-content/uploads/2025/04/exploration-vehicle-summary-sheets.pdf> (Viitattu: 22.10.2025).
35. Schmidt Ocean Institute (n.d.) ROV SuBastian Dive 401 (Pt A) - Newly Discovered 500m Tall Reef, Australia - FK200930 [YouTube-video]. YouTube. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=L_Ee7JV5oSI (Viitattu: 22.10.2025).
36. VideoRay (2024) VideoRay underwater ROV systems. Saatavilla: <https://videoray.com/> (Viitattu: 22.10.2025).

37. VideoRay (2024) Product comparison guide (REV 1.2.0). Saatavilla: <https://videoray.com/wp-content/uploads/Product-Comparison-Guide-REV1.2.0.pdf> (Viitattu: 22.10.2025).
38. VideoRay (2024) Mission Specialist Defender. Saatavilla: <https://videoray.com/products/mission-specialist-defender/> (Viitattu: 22.10.2025).
39. VideoRay (2025) Mission Specialist Defender commercial datasheet. Saatavilla: https://videoray.com/wp-content/uploads/AV_Defender_Commercial_Datasheet_250825.pdf (Viitattu: 22.10.2025).
40. Blue Robotics (2025) BlueROV2 buyer's guide. Saatavilla: <https://bluerobotics.com/learn/bluerov2-buyers-guide/> (Viitattu: 24.10.2025).
41. Wilby, A. ja Lo, E. (2020) Low-cost, open-source hovering autonomous underwater vehicle (HAUV) for marine robotics research based on the BlueROV2. Teoksessa: 2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium (AUV), St. John's, NL, Canada. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/AUV50043.2020.9267913> (Viitattu: 24.10.2025).
42. Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) (2024) REMUS 100 autonomous underwater vehicle. Saatavilla: <https://www2.whoi.edu/site/osl/vehicles/remus-100/> (Viitattu: 24.10.2025).
43. Kongsberg Maritime (2016) Hydroid introduces the new generation REMUS 100 AUV. Saatavilla: <https://www.kongsberg.com/maritime/news-and-events/news-archive/2016/hydroid-introduces-the-new-generation-remus-100-auv/> (Viitattu: 24.10.2025).
44. Finnish Navy operates REMUS 100 autonomous underwater vehicles as part of its mine countermeasure systems (2011). Kongsberg Maritime.

- Saatavilla: https://www.kongsberg.com/maritime/news-and-events/our-stories/hunt-when-you-can/?utm_source=chatgpt.com (Viitattu: 24.10.2025)
45. Boxfish Robotics (n.d.) Boxfish AUV Research Kit. Saatavilla: <https://www.boxfishrobotics.com/products/boxfish-auv/new-boxfish-auv-research-kit/> (Viitattu: 5.12.2025).
46. Unmanned Systems Technology (n.d.) Product spotlight: Boxfish AUV. Saatavilla: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/feature/product-spotlight-boxfish-auv/> (Viitattu: 5.12.2025).
47. Advanced Navigation (2024) Hydrus micro AUV. Saatavilla: <https://www.advancednavigation.com/robotics/micro-auv/hydrus/> (Viitattu: 5.12.2025).
48. YouTube (2026) Hydrus - a \$55K subsea drone from Australian company Advanced Navigation that is truly revolutionary. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=vEtHIB7Nkfs> (Viitattu: 5.12.2025).
49. NOAA Fisheries (2019) What is a saildrone and what does it do for NWFSC? Saatavilla: <https://www.fisheries.noaa.gov/science-blog/what-saildrone-and-what-does-it-do-nwfsc> (Viitattu: 5.12.2025).
50. Córdova, D., et al. (2023) A route-creating algorithm for Saildrones by comparing a pseudo straight-line route and wind direction. Saatavilla: <https://proceedings.laccei.org/index.php/laccei/article/view/3105> (Viitattu: 5.12.2025).
51. Nickford, S., Palter, J.B. ja Mu, L. (2024) The importance of contemporaneous wind and pCO₂ measurements for regional air–sea CO₂ flux estimates. Journal of Geophysical Research: Oceans, 129(6), e2023JC020744. Saatavilla: <https://doi.org/10.1029/2023JC020744> (Viitattu: 5.12.2025).

52. Azo Robotics (2022) Sailing into Success with Saildrone's Unmanned Surface Vehicles. Saatavilla: <https://www.azorobotics.com/Article.aspx?ArticleID=516> (Viitattu 5.12.2025).
53. Maritime Robotics (2024) Otter unmanned surface vehicle (USV). Saatavilla: <https://www.maritimerobotics.com/otter> (Viitattu: 5.12.2025).
54. RS Aqua (2024) Maritime Robotics Otter Pro USV. Saatavilla: <https://rsaqua.co.uk/product/maritime-robotics-otter-pro-usv/> (Viitattu: 5.12.2025).
55. Sears, T., et al. (2024) OtterROS: Picking and programming an uncrewed surface vessel for experimental field robotics research with ROS 2. arXiv preprint. Saatavilla: <https://arxiv.org/abs/2404.05627> (Viitattu: 5.12.2025).
56. Saab Seaeye (2025) Falcon ROV datasheet. Saatavilla: [https://www.saabseaeye.com/uploads/saab-falcon-rev19-3_\(1\).pdf](https://www.saabseaeye.com/uploads/saab-falcon-rev19-3_(1).pdf) (Viitattu: 20.2.2025).
57. Blue Robotics (2025) BlueROV2. Saatavilla: <https://bluerobotics.com/store/rov/bluerov2/> (Viitattu: 20.2.2025).
58. VideoRay (2026) Product comparison guide. (PDF-dokumentti). Saatavilla: <https://videoray.com/wp-content/uploads/Product-Comparison-Guide-REV1.2.0.pdf> (Viitattu: 20.2.2025).
59. Buvi Scandinavia (2024) Quadroin AUV. Saatavilla: <https://www.buviscandinavia.com/products/quadroin-auv> (Viitattu: 20.2.2025).
60. Boxfish Robotics (2024) ARV-i technical specifications. Saatavilla: <https://www.boxfishrobotics.com/products/arv-i/arv-i-technical-specifications/> (Viitattu: 20.2.2025).

61. Advanced Navigation (2024) Hydrus micro AUV specifications. Saatavilla: <https://www.advancednavigation.com/robotics/micro-auv/hydrus/#h-specifications> (Viitattu: 20.2.2025).
62. Scandinavian Photo (2024) QYSEA FIFISH V6 Expert M200. Saatavilla: <https://www.scandinavianphoto.fi/qysea/fifish-v6-expert-m200-1055013> (Viitattu: 20.2.2025).
63. Chasing Innovation (2024) Chasing X specifications. Saatavilla: <https://www.chasing.com/en/chasing-x-specs.html> (Viitattu: 20.2.2025).
64. Deep Trekker (2024) ROV buying guide. Saatavilla: <https://www.deeptrekker.com/resources/rov-buying-guide> (Viitattu: 20.2.2025).
65. Blueye Robotics (2024) Blueye X1 ROV. Saatavilla: <https://www.blueyeroobotics.com/rov/x1> (Viitattu: 20.2.2025).
66. Wahyuadnyana, K.D., Indriawati, K., Darwito, P.A., Aufa, A.N. & Tnunay, H. (2023) Comparative numerical analysis of torpedo-shaped and cubic symmetrical autonomous underwater vehicles in the context of Indonesian marine environments. Mathematical Modelling of Engineering Problems. Saatavissa: <https://doi.org/10.18280/mmep.100601> (Viitattu: 18.12.2025).

