



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JANNE ALATARVAS  
MERENALAINEN HYDRAULIIKKA: SOVELLUSKOHTEET JA VAA-  
TIMUKSET

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Lauri Siivonen

8. kesäkuuta 2018

## TIIVISTELMÄ

**JANNE ALATARVAS:** Merenalainen hydraulikka: sovelluskohteet ja vaatimukset

Underwater hydraulics: applications and requirements

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 32 sivua, 5 liitesivua

Kesäkuu 2018

Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Hydraulikka ja automatiikka

Tarkastaja: Lauri Siivonen

Avainsanat: merenalainen, hydraulikka, ROV, vaatimukset

Maailman energiankulutus kasvaa jatkuvasti, mutta käytössä olevat öljy- ja maakaasulähteet ovat ehtymässä. Energia- ja kaivosyhtiöt ovat aloittaneet uusien luonnonvarojen paikantamisen merien pohjista, ja niitä on löytynyt jopa 5 000 m:n syvyyksistä. Niin syvällä olevien lähteiden hyödyntäminen olisi käytännössä mahdollonta ilman merenalaisen hydraulikan jatkuvaa kehitystä. Merenalaisen hydraulikan eri sovelluksia voidaan hyödyntää energian sekä mineraalien löytämisessä ja niiden talteenottamisessa. Työssä perehdytään merihydraulikan sovelluksiin, kuten ROV:ihin, merenpohjan työkoneisiin ja hydraulisiin vasaroihin. Lisäksi työssä tutustutaan hieman öljynporaukseen liittyvään hydraulilaitteistoon sekä aaltovoimaa hyödyntäviin hydraulisovelluksiin.

Merenalaiset olosuhteet asettavat lukuisia haasteita hydraulikalle. Työn pääasiallisena tarkoituksena on selvittää, mitä vaatimuksia olosuhteet asettavat merenalaiselle hydraulikäytölle, ja mitä asioita tulee järjestelmiä suunniteltaessa ottaa huomioon. Suurimmat ongelmat merenalaisessa hydraulikassa ovat meressä järjestelmiin vaikuttava hydrostaattinen paine, meriveden lämpötilan muuttuminen sijainnin ja syvyyden mukaan sekä meriveden korrosoiva vaikutus metallimateriaaleihin. Hydraulijärjestelmissä nämä vaikutukset tulee huomioida, jotta järjestelmät säilyvät toimintakykyisinä. Järjestelmiä suunniteltaessa on tärkeää kiinnittää huomioita erityisesti materiaalivalintoihin ja sopivan hydraulines-teen valintaan.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	YMPÄRISTÖOLOSUHTEET JA NIIDEN VAIKUTUKSET .....	2
2.1	Hydrostaattinen paine.....	2
2.2	Veden lämpötila .....	3
2.3	Korroosio.....	6
3.	HYDRAULISET JÄRJESTELMÄT MERENALAISSA KÄYTÖSSÄ .....	8
3.1	ROV .....	8
3.1.1	Propulsiojärjestelmä.....	10
3.1.2	Työkalut .....	12
3.2	Hydraulinen vasara.....	13
3.3	Aaltovoima .....	15
3.4	Öljynporauksen hydraulikka .....	16
3.5	Riskit ja haitat.....	16
3.5.1	Ympäristövaikutukset .....	17
3.5.2	Hydraulinesteen syttyminen.....	17
3.5.3	Deepwater Horizon .....	17
4.	HYDRAULIJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU .....	20
4.1	Materiaalit .....	20
4.2	Painekompensointi .....	21
4.3	Venttiilikotelot .....	22
4.4	Hydraulinesteet.....	22
4.4.1	Mineraaliöljypohjaiset nesteet .....	22
4.4.2	Vaikeasti syttyvät nesteet.....	23
4.4.3	Nopeasti biohajoavat nesteet.....	24
4.4.4	Vesi .....	25
4.4.5	Hydraulinesteen valinta merenalaiseen käyttöön.....	25
5.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	28
	LÄHTEET .....	30

LIITE A: ALUMIINIEN VERTAILUTAULUKKO

LIITE B: HYDRAULIÖLJYJEN OMINAISUUKSIA

LIITE C: PANOLIN HYDRAULINESTEIDEN OMINAISUUKSIA

LIITE D: HYDRAULINESTEIDEN VISKOSITEETTEJA LÄMPÖTILAN  
MUUTTUESSA

LIITE E: KUVAAJA LÄMPÖTILAN VAIKUTUKSESTA ERI  
HYDRAULINESTEIDEN VISKOSITEETTEIHIN

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

MIC	Microbiologically Influenced Corrosion, mikrobiologinen korroosio
MSROV	Mid-Sized ROV, keskikokoinen kauko-ohjattava sukellusrobotti
OCROV	Observation Class ROV, pieni kauko-ohjattava sukellusrobotti
ROV	Remote Operated Vehicle, kauko-ohjattava sukellusrobotti
WCROV	Work Class ROV, raskas kauko-ohjattava työluokan sukellusrobotti
HPU	Hydraulic Power Unit, hydraulinen voimayksikkö
BOP	Blowout Preventer, öljylähteeseen asennettava räjähdysten estävä venttiililaitteisto
g	putoamiskiihtyvyys
h	korkeus
p	hydrostaattinen paine
t	lämpötila
v	kinemaattinen viskositeetti
$\rho$	tiheys

# 1. JOHDANTO

Maailman energian kulutus on lisääntynyt tasaisesti 1950-luvulta lähtien. Fossiiliset polttoaineet muodostavat noin 80 % maailman energian kulutuksesta, vaikka uudet hankkeet ja keksinnöt uusiutuvien energianlähteiden saralla ovat vähentäneet fossiilisten polttoaineiden käytön suhteellista osuutta. Maailman eksponentiaalisesti kiihtyvän väestönkasvun seurauksena kasvaa myös tarve fossiilisille polttoaineille ja luonnonvaroille, kuten öljylle, luonnonkaasuille ja mineraaleille. Etenkin kun nykyiset tunnetut luonnonvarojen lähteet ehtyvät valtavan kulutuksen seurauksena, energia- ja kaivosyhtiöt joutuvat etsimään niitä uusilta ennen koskemattomilta alueilta. Merien tutkimisesta ja kartoittamisesta on tullut suosittua, kun ihmiskunta on havainnut niiden lukemattomat mineraali- ja energiavarannot. [3][33]

Moderni vedenalainen teknologia tarjoaa työkaluja, jotka mahdollistavat merien tehokkaan tutkimuksen. Monet lähiaikoina löydettyistä luonnonvaroista sijaitsevat merien alla jopa 5 000 m:n syvyydessä. Uutta vedenalaista laitteistoa kehitetään jatkuvasti vastaamaan kasvaneeseen tutkimustarpeeseen ja mahdollistamaan meristä löydettyjen rikkauksien hyödyntämisen. Meriteollisuus, kuten esimerkiksi öljy- ja ruoppausteollisuus, hyödyntävät merenalaisissa toimissaan runsaasti hydrauliiikkaa. Näin ollen meriteollisuuden hydrauliset järjestelmät tulee suunnitella siten, että ne toimivat haastavissa merenalaisissa olosuhteissa. [2, s. 270][8, s. 3][33]

Tässä työssä käsitellään meren alla hyödynnettävää hydrauliiikkaa ja sen käyttökohteita. Aluksi käydään läpi meressä vallitsevia olosuhteita sekä niiden merkitystä hydrauliiikkaa hyödyntäville järjestelmille. Tämän jälkeen esitellään meressä käytettäviä hydraulisia sovelluksia ja perehdytään niiden toimintaan. Kuitenkaan työn tarkoituksena ei ole luetella kaikkia mahdollisia merenalaisen hydrauliiikan käyttökohteita, vaan antaa lukijalle riittävä näkemys hydrauliiikan mahdollisuuksista merikäytössä. Esimerkiksi työn rajallisen pituuden takia luvuissa 3.3 ja 3.4 käsitellään hyvin lyhyesti aaltovoimaa sekä öljynporauksen hydraulisovelluksia. Työn loppuosuudessa tarkastellaan vaatimuksia ja huomioidettavia asioita, joita merenalainen käyttö hydraulijärjestelmille aiheuttaa.

## 2. YMPÄRISTÖOLOSUHTEET JA NIIDEN VAIKUTUKSET

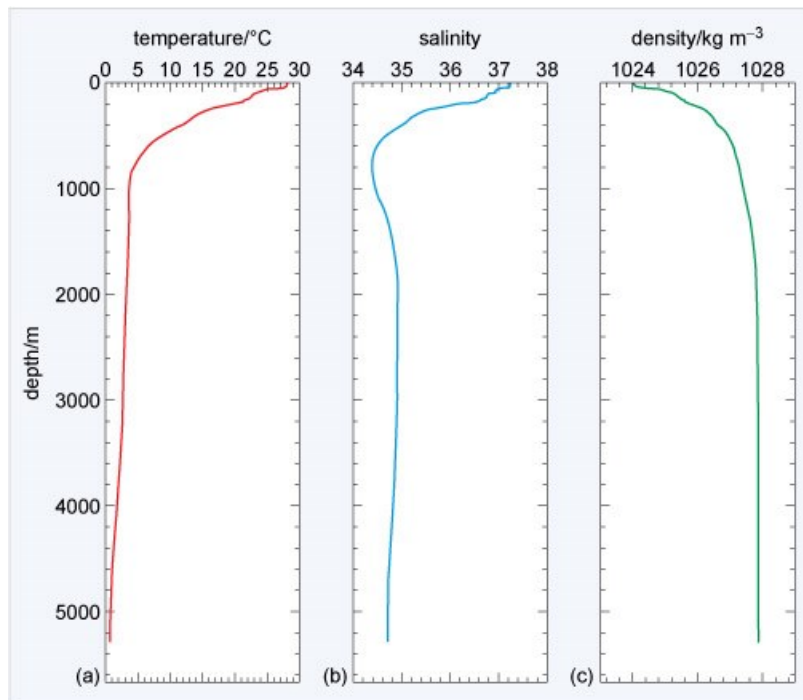
Hydrauliset järjestelmät altistuvat useille eri ympäristötekijöille merenalaisessa käytössä. Järjestelmiä puristaa sitä suurempi hydrostaattinen paine, mitä syvemmällä meressä järjestelmää käytetään. Lisäksi järjestelmät altistuvat meriveden lämpötilan vaihteluille sekä joutuvat kosketuksiin suolaisen meriveden kanssa. Järjestelmien vikaantuessa niiden korjaaminen on usein hankalaa ja kallista, joten ne tulee suunnitella siten, että ne pystyvät toimimaan ja kestävään haasteellisissa meriolosuhteissa. [8, s. 10]

### 2.1 Hydrostaattinen paine

Suunniteltaessa hydraulijärjestelmää merenalaiseen käyttöön tulee huomioida sen syvyyskäyttöalue eli kuinka syvällä kyseistä järjestelmää käytetään. Mitä syvemmällä veden alla järjestelmää halutaan käyttää, sitä suurempaa ulkoista painetta sen tulee kestää. Hydrostaattinen paine vedessä lasketaan seuraavasti:

$$p = \rho \times g \times h, \quad (1)$$

jossa  $p$  on paine,  $\rho$  on vedentiheys,  $g$  on putoamiskiihtyvyys ja  $h$  on vesipatsaan korkeus. Meriveden tiheys muuttuu syvyyden mukaan alla olevan kuvan 1 kuvaajan c mukaisesti.



**Kuva 1.** Atlantin valtameren meriveden (a) lämpötila, (b) suolapitoisuus ja (c) tiheys syvyyden mukaan mitattuina [32].

Kuvan 1 kuvaajan c mukaan Atlantin meriveden tiheys 5000 m:n syvyydessä on noin  $1\,028\text{ kg/m}^3$ . Lisäksi kuvaajan perusteella voidaan arvioida meriveden tiheyden olevan keskimäärin noin  $1\,027,6\text{ kg/m}^3$  alle 5 000 m:n syvyydessä. Tiedetään myös, että pu-toamiskiihtyvyyden arvo on yleisesti  $9,81\text{ m/s}^2$ . Näin ollen 5 000 m:n syvyydessä hydrostaattinen paine saadaan kaavaa (1) käyttämällä seuraavasti:

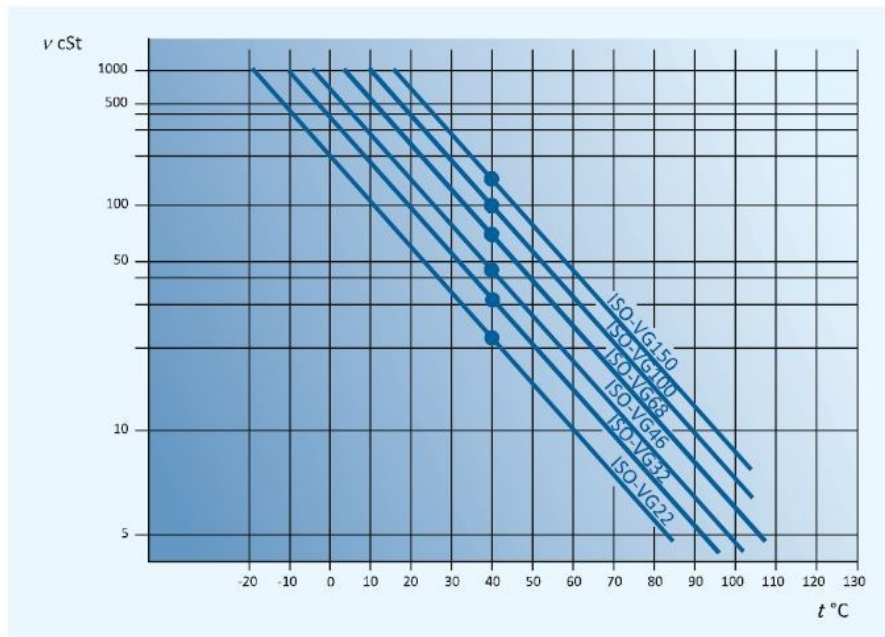
$$p = 1\,027,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 5\,000\text{m} \approx 50,4\text{ MPa}.$$

Meriveden tiheyden muutos syvyyden mukaan on suhteellisen vähäinen, joten hydrostaattisen paineen voidaan ajatella nousevan noin 0,1 MPa 10 m:n välein.

Suuressa ympäristön paineessa vaarana on järjestelmän hydraulikomponenttien rikkoutuminen, ja syvällä veden alla etenkin tiivisteet joutuvat suuren rasituksen alaiseksi. Esimerkiksi männänvarren tiiviste on yksi tärkeimpiä merenalaisen hydraulijärjestelmän osia, sillä se on kosketuksissa sekä meriveden että hydraulinesteen kanssa. Männänvarren tiivisteiden pettäessä suurena riskinä on meriveden tunkeutuminen järjestelmään, mikä usein aiheuttaa koko hydraulijärjestelmän rikkoutumisen. [2, s. 272][5, s. 28]

## 2.2 Veden lämpötila

Meriveden lämpötila vaihtelee sijainnin, vuodenajan, syvyyden ja jopa kellonajan mukaan. Kuvan 1 mukaan Atlantin valtameren pinnalla meriveden lämpötila voi olla  $28\text{ °C}$ , kun taas 1 000 m:n syvyydessä lämpötila on alle  $4\text{ °C}$ . Eteläisellä jäämerellä meriveden lämpötila voi alimmillaan olla jopa  $-1,8\text{ °C}$  [35]. Näin ollen meriveden lämpötilassa voidaan havaita suurta vaihtelua, joka vaikuttaa hydraulijärjestelmässä käytettävän hydraulinesteen viskositeettiin. Kauranne et al. [17, s. 121] toteavat viskositeetin kasvavan lämpötilan laskiessa ja pienenevän lämpötilan noustessa. Tämä viskositeetin käyttäytyminen voidaan huomata myös kuvasta 2, jossa tarkastellaan eräiden mineraaliöljyjen kinemaattisen viskositeetin muutosta lämpötilan mukaan.



**Kuva 2.** Hydraulisten mineraaliöljyjen kinemaattinen viskositeetti  $\nu$  lämpötilan  $t$  mukaan [2, s. 82].

Kauranne et al. [17, s. 121–122] mukaan kinemaattinen viskositeetti voidaan määrittää halutussa lämpötilassa, kun tunnetaan hydraulinesteen viskositeetit kahdessa eri lämpötilassa. Määrittäminen onnistuu seuraavan kaavan avulla

$$\nu_3 = e^{\Phi} - 0,7, \quad (2)$$

jossa tuntematon eksponentti

$$\Phi = e^Y, \quad (3)$$

ja edelleen tuntematon eksponentti

$$Y = Y_1 - \left( \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2} \right) \times (X_1 - X_3), \quad (4)$$



jossa arvot

$$Y_1 = \log(\log(v_1 + 0,7))$$

$$Y_2 = \log(\log(v_2 + 0,7))$$

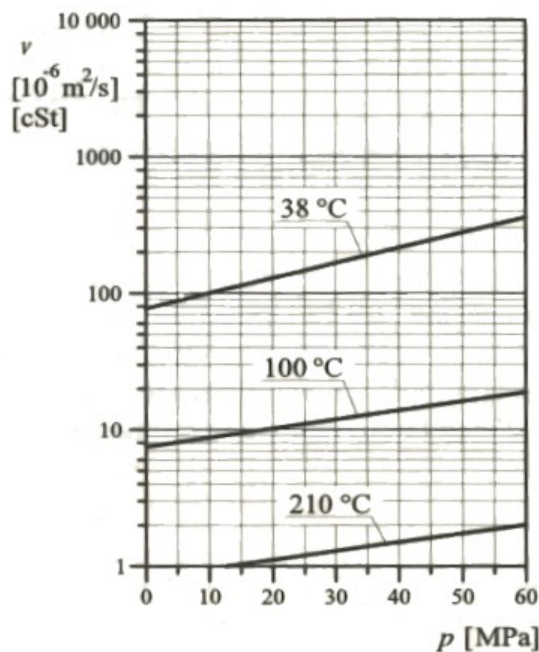
$$X_1 = \log(\theta_1) \tag{5}$$

$$X_2 = \log(\theta_2)$$

$$X_3 = \theta_3,$$

jossa  $v_1$  on nesteen kinemaattinen viskositeetti lämpötilassa  $\theta_1$ ,  $v_2$  on kinemaattinen viskositeetti lämpötilassa  $\theta_2$  ja  $\theta_3$  on lämpötila, jota vastaava viskositeetti  $v_3$  halutaan ratkaista.

Hydraulinesteiden viskositeetti kasvaa myös paineen kasvun seurauksena. Kasvun määrä on riippuvainen paineenmuutoksen lisäksi myös tarkasteltavan nesteen lämpötilasta niin, että mitä kylmempää kyseinen neste on, sitä suurempi on paineen viskositeettivaikutus [17, s. 26]. Esimerkiksi kuvassa 3 paineen kasvaessa 10 MPa:sta 35 MPa:iin viskositeetti noin kaksinkertaistuu 38 °C:ssa. Tämä on tärkeää huomioida hydraulinestettä valittaessa syvänmeren lähes 0 °C:n lämpötiloihin. Tosin eräiden luonnollisia kasviöljyjä sisältävien hydraulinesteiden viskositeetti ei riipu vastaavissa määrin lämpötilasta tai paineesta, kuin mineraaliöljyjen viskositeetti. [2, s. 83][17, s. 118]

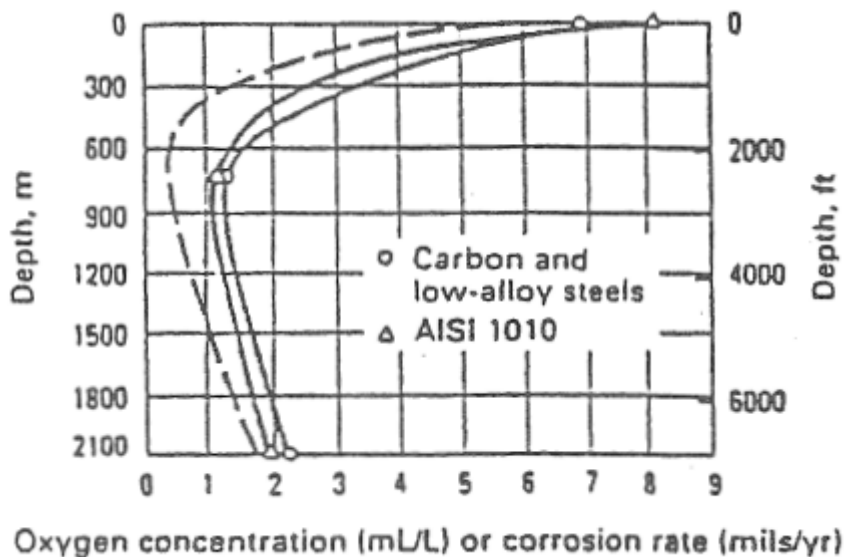


**Kuva 3.** Paineen vaikutus viskositeettiin tarkastelluissa lämpötiloissa [17, s. 26].

Jokaisella hydraulikomponentilla on viskositeettialue, jolla hydraulinesteen viskositeetin tulee olla, jotta komponentti toimisi oikein ja säilyisi ehjänä [2, s. 83]. Toimiakseen hydraulijärjestelmän tulee huolehtia hydraulinesteen oikeasta lämpötilasta. Käytettäessä järjestelmä lämmittää lämpötehon mukaisesti hydraulinestettä, mutta mikäli neste ei pysy riittävän lämpöisenä tai sen lämpötila kasvaa liian suureksi, voidaan järjestelmään lisätä joko lämmitin tai jäädytin tarpeen mukaan. [17, s. 27]

## 2.3 Korroosio

Korroosiolla tarkoitetaan yleisesti ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta aiheutuvaa metallien syöymistä. Tärkeimmät korroosionopeuteen vaikuttavat tekijät merikäytössä ovat meriveden happipitoisuus, suolapitoisuus, pH, virtausnopeus ja lämpötila. Näiden lisäksi korroosionkestävyyteen vaikuttaa hydrostaattinen paine. Syvemmälle mereen mentäessä paine kasvaa, jolloin materiaaleja suojaavan hapettumakerroksen koostumus, korroosio-reaktioiden kinetiikka ja tiettyjen materiaalien väsymiskestävyyys muuttuvat. [19][26]



**Kuva 4.** Syvyyden vaikutus terästen korroosioon Tyynessä valtameressä (happipitoisuuden vaihtelu merkitty katkoviivalla) [26, s. 11].

Merkittävin vedenalaisten teräskappaleiden korroosioon vaikuttava tekijä on meriveden happipitoisuus. Kuvan 4 kuvaajasta voidaan havaita, että Tyynessä valtameressä terästen korroosio on voimakkaimmillaan meren pinnalla ja vähiten korroosiota tapahtuu noin 700–800 m:n syvyydessä. Toisaalta, mitä syvemmälle meressä mennään, sitä enemmän heikkenee terästen korroosioväsymiskestävyyys. Tämän ajatellaan johtuvan siitä, että merivesi tunkeutuu materiaaleissa oleviin säröihin paremmin kasvavan paineen ansiosta, mikä kiihdyttää korroosiota. Lisäksi korkea paine hidastaa terästen pintaan muodostuvien korroosiolta suojaavien kerrosten muodostumista. Aivan kuten teräksen, myös pronssin, nikkelin ja alumiinin korrosoituminen muuttuu meressä sen mukaan, missä syvyydessä

materiaalia käytetään. Toisaalta titaanin ja kuparin korrosoituminen on aina samanlaista riippumatta materiaalin käyttösyvyydestä. [26]

Lisäksi on olemassa korroosiota, joka vaikuttaa myös muihin materiaaleihin kuin metalleihin. MIC (microbiologically influenced corrosion) eli mikrobiologinen korrosio on biologisten eliöiden vaikutuksesta aiheutuvaa korroosiota. Näihin biologisiin eliöihin luokituvat levät, bakteerit, sienet, homeet, sammaleet, jäkälät sekä erilaiset eläimet ja niiden eritteet. Kappaleiden pinnat, jotka ovat jatkuvassa kosketuksessa veden kanssa, ovat erityisen alttiita mikrobiologiselle korroosiolle. Otolliset olosuhteet mikrobiologiselle korroosiolle vallitsevat tyypillisesti merellä ja trooppisissa ympäristöissä, esimerkiksi veden alla sijaitsevilla pinnoilla. Mikrobiologinen korrosio vaikuttaa kaikkien materiaalien pintoihin, mutta erityisesti se vaikuttaa epämetalleihin, kuten teippeihin, tiivisteisiin, maaleihin, pinnoitteisiin, kumiin sekä muoviin. [12]

### 3. HYDRAULISET JÄRJESTELMÄT MERENALAISSA KÄYTÖSSÄ

Merihydrauliikan alkuaikoina hydraulisovelluksissa suurin osa järjestelmästä oli käytössä merenpinnan yläpuolella ja ainoastaan toimilaitte sijoitettiin veden alle. Energia toimilaitteelle siirrettiin hydrauliletkuilla. Nykyisin vastaavia järjestelmiä käytetään lähinnä hydraulisissa vasaroissa, joita voidaan käyttää enimmillään 1 200 m:n syvyydessä. Nykyään merikäytössä olevat hydrauliset järjestelmät ovat usein kokonaan veden alla toimivia, ja ne saavat tarvitsemansa energian sähkökaapeleita pitkin. [2, s. 270] Vedenalaiset hydraulijärjestelmät jaetaan kahteen eri luokkaan, öljy- ja vesipohjaisiin järjestelmiin, perustuen käytettävään tehonsiirron väliaineeseen [33].

#### 3.1 ROV

Christ ja Wernli [5, s. 4] jaottelevat miehittämättömät sukelluslaitteet eli sukellusrobotit edelleen vapaasti liikkuviin tai sidottuihin vedenalaisiin sukelluslaitteisiin. Vapaasti liikkuvat vedenalaiset sukelluslaitteet voivat edetä joko logiikkaohjauksella tai ennalta ohjelmoitua reittiä pitkin. Taasen sidotut vedenalaiset sukelluslaitteet ovat kaapelilla yhteydessä vedenpinnalle, ja ne voivat olla itsenäisesti liikkuvia tai kauko-ohjattuja. Kauko-ohjattu sukellusrobotti tunnetaan myös paremmin englanninkielisellä nimellään ROV (remote operated vehicle). Kuvassa 5 on nähtävissä ROV:n 3D-malli. Merenpinnalta ROV:tä ohjataan hallintalaitteella, jolla säädetään potkureita, kallistusta, käsilaitteita sekä kameraa. Toimilaitteet ovat lähes aina hydraulisia merenalaisessa käytössä. ROV on aina kytkettynä kaapelin avulla laivaan tai lauttaan, ja kaapelin kautta se saa sähköenergiaa, jonka se muuntaa tarvittavaksi hydrauliseksi energiaksi. [2, s. 270]



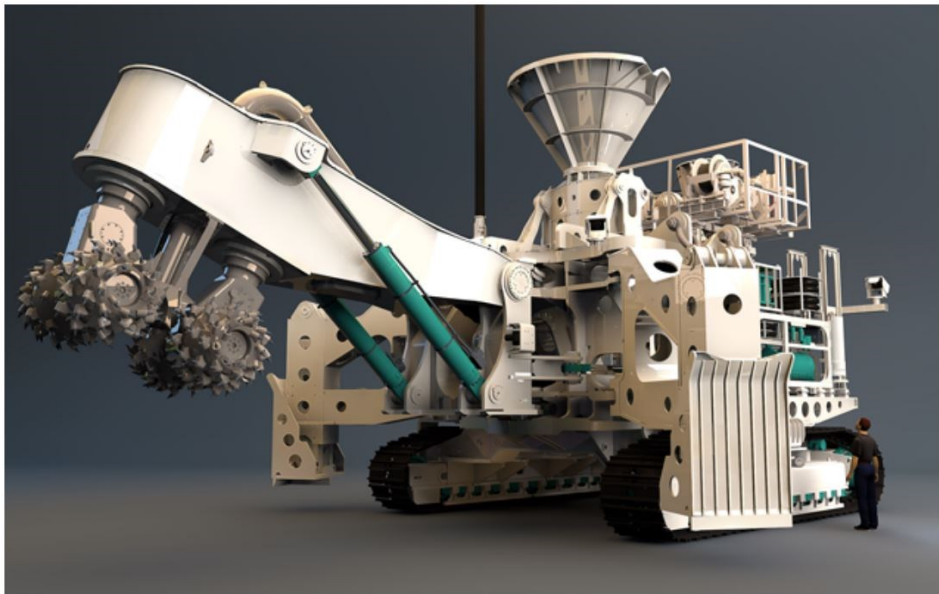
*Kuva 5. FMC Technologies:n HD ROV [10].*

ROV-laitteet luokitellaan usein käyttötarkoituksen ja ulkoisten mittojen mukaan. Taulukossa 1 on esitelty kolmen eri kokoluokan ROV-laitteiden ominaisuuksia. Pienimmät, alle 100 kg:n painoiset, sukellusrobotit kuuluvat tarkkailu- eli OCROV-luokkaan (Observation Class ROV), jonka robotit toimivat ainoastaan sähköisesti. Tarkkailuluokan sukellusrobottien toimintasyvyys on yleensä rajoitettu noin 300 m:n asti. Keskikokoinen sukellusrobotti eli MSROV (Mid-Sized ROV) painaa 100 – 1 000 kg ja on tarkkailuluokan sukellusrobottien tapaan usein sähköisesti toimiva. MSROV sisältää kuitenkin usein hydraulikalla toimivan mekaanisen käden ja siihen liitettäviä erilaisia työkaluja. Keskikokoisia sukellusrobotteja on suunniteltu käytettäväksi meressä vähintään 1 000 m:n syvyydessä. Työluokan sukellusrobotit eli WCROV:t (Work Class ROVs) ovat raskaita voimavirralla toimivia sähkömekaanisia laitteita, joiden potkurijärjestelmät ja työkalut ovat yleensä hydraulisesti toimivia. Työluokan sukellusrobotteja käytetään työtehtävissä jopa yli 3 000 m:n syvyydessä merenpinnan alla.

*Taulukko 1. ROV-luokkien ominaisuuksia [5, s. 8].*

Kokoluokka	Toimintasyvyys	Laukaisutapa	Potkurit	Työkalut
OCROV	alle 300 m	Käsin laukaisu	Sähköiset	Sähköiset
MSROV	yli 1 000 m	Nostokurki tai A-kehikko	Sähköiset	Hydrauliset
WCROV	yli 3 000 m	A-kehikko	Hydrauliset	Hydrauliset

Roboteista löytyy vielä neljäs luokka, johon kuuluvat erikoiskäyttöön tarkoitetut robotit eli merenpohjan työkoneet. Kuvassa 6 on hydraulijärjestelmällä varustettu merenpohjan työkone, jonka tarkoituksena on pohjakivien hajottaminen. Merenpohjan työkoneissa ei ole potkurijärjestelmää, vaan ne liikkuvat merenpohjalla renkaiden tai telaketjujen avulla. Niitä käytetään raskaiden laitteiden asentamiseen ja merenpohjan koeporauksiin. Öljy- ja maakaasuputkia suojellaan maanjäristysten, merivirtojen ja laivoille tapahtuvien haaksirikkojen varalta, hautaamalla ne työkoneita käyttämällä merenpohjaan. [5][8]



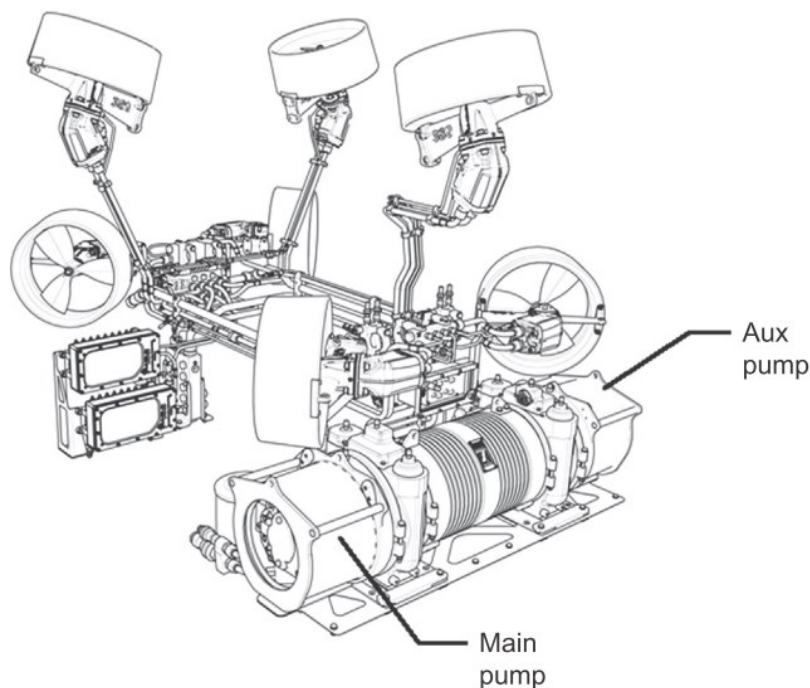
*Kuva 6. Merenpohjan kaivuri hydraulijärjestelmällä [31].*

### 3.1.1 Propulsiojärjestelmä

ROV-laitteissa käytetään kolmea erityyppistä työntö- eli propulsiojärjestelmää. Propulsiojärjestelmällä saadaan aikaan sukellusrobotin tarvitsema liike. Yleisimmin käytetyt propulsiotyypit ovat hydraulisesti (ks. kuva 7) tai sähköisesti ohjatut potkurit. Harvinaisempi propulsiotyyppi on kanavoitu suihkutyöntöjärjestelmä. Usein ROV-laitteen työtehtävän sijainti ja työn laatu vaikuttavat siihen, mikä propulsiotyyppi sukellusrobottiin valitaan. Esimerkiksi roskaisessa ympäristössä suihkutyöntöjärjestelmä olisi todennäköisesti sopivin vaihtoehto, sillä potkurikäyttöisissä järjestelmissä partikkelit voivat imeytyä pyöriviin potkureihin ja vahingoittaa niitä. Vastaavissa tapauksissa käytetään kuitenkin usein potkurinsuojia estämään potkurien likaantumisen. [5, s. 123] Taulukosta 1 voidaan huomata, että työluokan ROV-laitteissa käytetään yleensä hydraulisesti toimivaa työntöjärjestelmää, kun taas tarkkailu- ja keskiluokan sukellusroboteissa potkurijärjestelmä on usein sähköisesti toimiva.

Eri valmistajien mielipiteet eroavat suuresti siitä, että kumpaa (sähköistä vai hydraulista) energiaa hyödyntävää järjestelmää olisi järkevämpi käyttää. Hydraulisesti toimivissa pro-

pulsiojärjestelmissä on huomattavasti enemmän komponentteja kuin sähköisesti toimivissa, jolloin sähköisesti toimivat järjestelmät ovat yksikertaisempia. Hydraulisesti toimivissa ROV-laitteissa joudutaan niihin napakaapelilla toimitettava sähkövirta muuntamaan mekaaniseksi energiaksi, jolloin syntyy suuria energiahäviöitä. Lisäksi hydraulisen järjestelmän vioittuessa mahdolliset haitat ovat suurempia. Esimerkiksi työluokan sukellusrobotissa tapahtuvan pumppuvian seurauksena, koko järjestelmä saattaa vaurioitua meriveden tunkeutuessa järjestelmään. Tällöin myös ympäristön saastuminen tulee huomioida (ks. kappale 3.6). Taasen sähköllä toimivissa järjestelmissä komponentit voivat säilyä ehjinä, vaikka itse järjestelmään tulisi vika. Toisaalta nykyään suurin osa sukellusrobottien työkaluista ja toimilaitteista hyödyntävät hydraulista voimaa, joten hydrauliiikan käyttö raskaansarjan ROV-laitteissa on lähes välttämätöntä. [5, s.135–137]



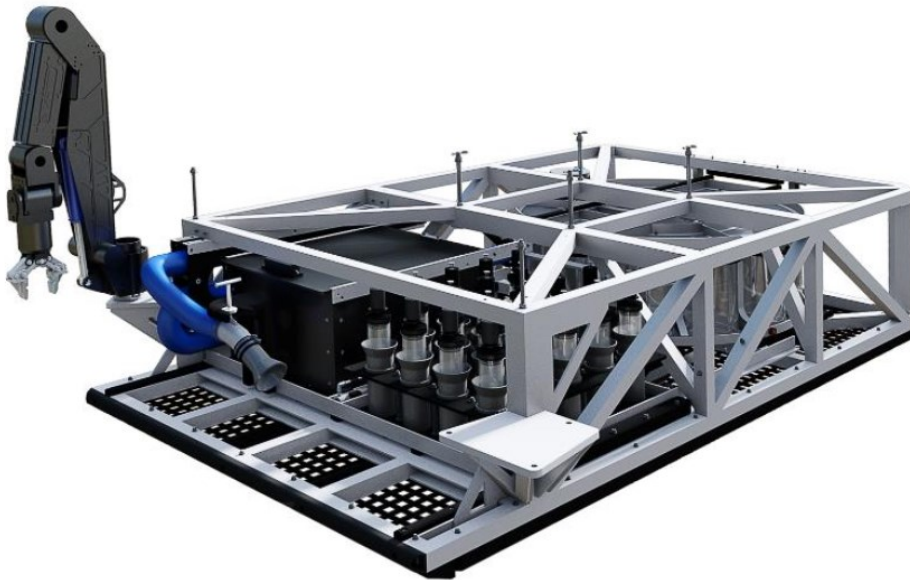
**Kuva 7.** Raskaan sukellusrobotin hydraulijärjestelmä [5, s. 123].

ROV:ssä käytetään kahta tai useampaa potkuria, ja niiden tarvittava koko riippuu useasta eri käytännön asiasta, kuten sukellusrobotin tehtävän laadusta ja sen käyttöympäristön olosuhteista. Lisäksi käytettävissä oleva teho sekä ROV:ltä vaadittava nopeus vaikuttavat potkurien valintaan. Energiatehokkaan laitteen tärkeys ja pyrkimys yksinkertaiseen kokonaisuuteen tulee ottaa huomioon suunniteltaessa ROV:tä sekä sen propulsio- ja käyttöjärjestelmää. Näin ollen suunnittelussa tulisi minimoida komponenttien lukumäärä ja sisällyttää järjestelmään vain tarpeelliset toiminnot. Kuvan 4 Schillingin HD ROV:n hydraulijärjestelmässä on pyritty modulaariseen kokonaisuuteen. Esimerkiksi järjestelmän hydraulipumput on suunniteltu helposti irrotettaviksi ja vaihdettaviksi. [5, s. 121–124]

Veden alla käytettävien potkurien tiivistämiseen on vaihtelevia tapoja. Tietyt valmistajat käyttävät nestetäytteisiä potkurikoteloita, joiden sisäinen paine nostetaan vastaamaan ympäristön painetta. Tällöin paine-eron tasoittuminen estää meriveden tunkeutumisen järjestelmään. Muita tekniikoita erottaa ilmatäytteinen potkurikotelo vedestä on voitelunesteen käyttäminen tiivisteenä tai potkurin akselin magneettinen kiinnitys, joka on yleinen ja erittäin luotettava tapa estää meriveden pääsy koteloon. [5, s. 132]

### 3.1.2 Työkalut

ROV:t on usein suunniteltu siten, että niiden työkaluja, käsielimiä tai antureita on nopea ja yksinkertainen vaihtaa. Tarve helpolle vaihtamiselle selittyy sillä, että robottien tehtävät voivat vaihdella hyvin paljon, joten niiden tarvitsemat varusteet vaihtuvat myös. Nämä työkalut yleensä sijoitetaan yhteen ISO 13628-8 -standardin mukaiseen jalustaan, jolloin vaihtamalla kyseinen moduuli, vaihtuu tarvittavat työkalut ja anturit. [5, s. 548]



**Kuva 8.** WCROV:n tiedejalusta yhdellä käsielimellä [6, s. 34].

Erilaisia jalustoja voi olla samalla ROV:llä useita. Yksi voi sisältää esimerkiksi korkeapaineisen vesisuuttimen ja hydraulipumpun vedenalaisten rakenteiden puhdistamista varten. Toisessa jalustassa voi taas olla käsielin ja vaijerinkatkaisin esimerkiksi merenalaista katkaisutehtävää varten. Kuvassa 8 on esitelty Curvetech:n valmistama tiedejalusta, jota käytetään muun muassa näytteiden keräämiseen [6, s. 34]. ROV:hen liitettäviä erilaisia työkalutyyppejä on kehitetty lukuisia. Taulukossa 2 on nähtävissä muutama eri työkalutyyppi sekä niiden vaatimat ROV-luokat. Raskaat työkalut ovat aina hydraulikäyttöisiä ja vaativat vähintään MSROV:n niiden käyttöä varten. Lisäksi voimaa tarvitsevat työkalut, kuten leikkurit, vaativat korkean järjestelmäpaineen. [5, s. 548–550]

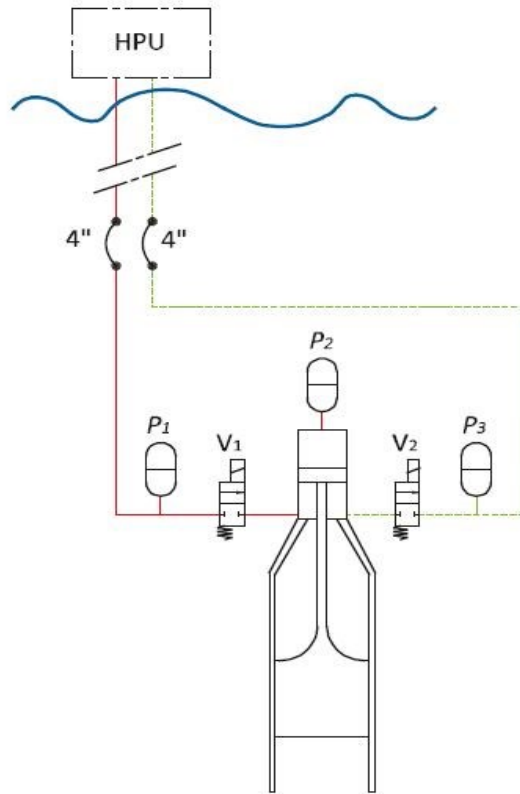


**Taulukko 2.** Työkalutyypin vaatimukset ROV-laitteelle [5, s. 10].

Työkalutyyppe	Työkalun paino vedessä	Voima	Vähimmäis ROV-luokka
Yksitoiminen käsielin	Pieni	Tasavirta (sähköinen)	OCROV
Kevyt nelitoiminen käsielin	Keskisuuri	Matalapaineinen ja pienitilavuusvirtainen hydrauliiikka	MSROV
Raskas 7-toiminen käsielin	Suuri	Korkeapaineinen ja pienitilavuusvirtainen hydrauliiikka	WCROV
Vaijerinkatkaisin	Keskisuuri	Korkeapaineinen ja pienitilavuusvirtainen hydrauliiikka	MSROV
Hydraulinen hiomakone	Keskisuuri	Matalapaineinen ja suuritilavuusvirtainen hydrauliiikka	MSROV
Timanttisaha	Pieni	Korkeapaineinen ja suuritilavuusvirtainen hydrauliiikka	WCROV

### 3.2 Hydraulinen vasara

Rakennettaessa mereen tai merenpinnan yläpuolelle, pitää perustuksien olla veden alla. Tällöin on tarpeen paaluttaa merenpohjaa, joka onnistuu hydraulisella vasaralla. Hydraulisella vasaralla saadaan aikaan isku, joka työntää paalua merenpohjaan. Paalutuksella voidaan myös luoda merenpohjaan kiinteä ankkurointipiste esimerkiksi poijulle tai laiturille. Kuvan 9 hydraulikaavio on esimerkkinä hydraulisesta vasarasta jossa HPU (Hydraulic Power Unit), eli hydraulinen voimayksikkö, sijaitsee vedenpinnan yläpuolella. Sieltä se antaa järjestelmään jatkuvaa tilavuusvirtaa, joka johdetaan hydraulisynteriin eli vasaraan. [2, s. 276]



**Kuva 9.** Hydraulisen vasaran hydraulikaavio [2, s. 276].

Tilavuusvirta nostaa sylinterin eli vasaran ylös ja aiheuttaa yhdessä paineakun  $P_2$  kanssa männän yläpuolelle suuren paineen. Venttiilit  $V_1$  suljetaan ja  $V_3$  avataan, jolloin painovoiman ja männän yläpuolella olleen ylipaineen ansiosta vasara saa suuren nopeuden alaspäin. Isku pyritään ohjaamaan paaluun. Paineakkuja  $P_1$  ja  $P_3$  käytetään järjestelmässä vaimentamaan vasaran aiheuttamia paineiskuja. HPU kiinnitetään itse vasaraan, kun halutaan paaluttaa erittäin syvällä merenpinnan alla. Tällöin säästytään pitkien hydraulij- ja ilmaletkujen viemiseltä vasaralta pinnalle ja voimayksikön tarvitsema virta tuodaan vasaralle sähkökaapelilla. Kuvassa 10 on nähtävissä 3D-mallinnus hydraulisesta vasarasta. [2, s. 276–277]

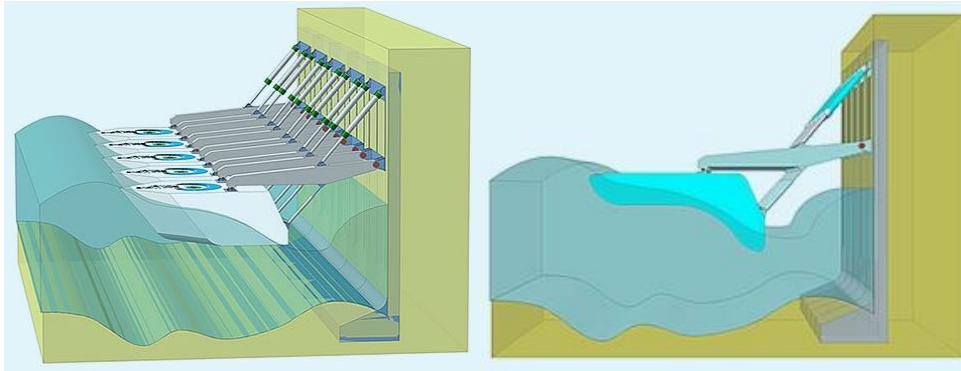


*Kuva 10. Hydraulinen vasara merenpohjan paalutukseen [25]*

### **3.3 Aaltovoima**

Luvussa 2 jo todettiin ihmiskunnan olevan riippuvainen fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Fossiilisten polttoaineiden vähittäinen loppuminen johtaa ennen pitkää suuriin haasteisiin maailman energiantuotannossa. Näin ollen ihmiskunta on joutunut investoimaan myös vaihtoehtoisiiin energianlähteisiin, kuten aaltoenergiaan.

Energiayhtiö Eco Wave Power on kehittänyt kaksi sovellusta, joilla voidaan tuottaa energiaa veden aaltoliikkeestä. Nämä laitteet poikkeavat perinteisistä aaltovoimaloista siinä, että ne voidaan asentaa jo olemassa oleviin kiinteisiin rakenteisiin, kuten laitureihin tai aallonmurtajiin. Kuvan 11 mukainen Wave Clapper voidaan asentaa kohteisiin joissa on rajallisesti tilaa. Se voidaan ottaa käyttöön yksittäisenä tai sarjoissa, jolloin voidaan hyödyntää kaikki käytettävissä oleva tila. Power wing toimii vastaavasti kuin Wave Clapper, mutta se on suurempi ja sitä voidaan käyttää vaihtelevammassa olosuhteissa, sillä kelluvaa mekanismia voidaan säätää optimaaliseksi eri aallonkorkeuksille. [36]



*Kuva 11. Wave Clapper ja Power Wing aaltoenergia sovellukset [34].*

Laitteiden kelluva mekanismi liikkuu ylös ja alas aaltoliikkeen mukana, mikä liikuttaa mäntää mekanismiin kiinnitetyssä hydraulisylinterissä. Mäntä paineistaa hydraulinesteen ja varastoi sen järjestelmään liitettyyn paineakkuun. Paineakusta neste ohjataan hydraulimoottoriin, joka pyörittää sähkömoottoria, ja näin ollen järjestelmä saadaan tuottamaan sähköä. [36]

### 3.4 Öljynporauksen hydrauliiikka

Öllyteollisuus hyödyntää merellä toimiessaan lukuisia hydraulisia sovelluksia ja laitteita. Lähes kaikki jo aiemmin esitellyt laitteet liittyvät jollain tavalla öljyteollisuuden tarpeisiin. Esimerkiksi ROV:itä öljyteollisuus hyödyntää öljyn etsinnässä ja merenpohjan kartoituksessa sekä lukuisissa erilaisissa syvänmeren tehtävissä, kuten öljylähteen varoventtiilien sulkemisessa. Hydraulisia vasaroita käytetään öljynporauslauttojen ankkurointipisteiden kiinnityksiin ja merenpohjan työkoneita käytetään öljyputkien asentamiseen ja hautaamiseen. Muun muassa öljylähteen päälle asennettavassa BOP:ssa (blowout preventer), eli räjähdysten estävässä venttiililaitteistossa, hyödynnetään hydrauliiikkaa. BOP:n toiminta selviää tarkemmin luvussa 3.5.3. [2][5]

### 3.5 Riskit ja haitat

Merenalaisessa käytössä oleva hydrauliiikka on erittäin läheisessä kosketuksessa luonnon kanssa, siksi järjestelmien vuodottomuus on tärkeää. Vähäinenkin hydraulinesteen vuotaminen aiheuttaa luonnolle vahinkoa mereen päätyessään, ellei järjestelmissä ole käytössä ympäristöystävällisempi biohajoava hydraulineste. Sen käyttö on kuitenkin melko harvinaista, johtuen sen huonoista käyttöominaisuuksista, kuten käyttöiän lyhyydestä. [28, s. 77] Lisäksi merenalainen kaivostoiminta voi aiheuttaa merkittäviä haittoja merien ekosysteemeille. Hydraulijärjestelmiä suunniteltaessa merenalaiseen käyttöön onkin hyvä ottaa huomioon mahdolliset riskitekijät, jotka voivat aiheuttaa järjestelmän vikaantumisen tai hydraulinesteen vuotamisen ympäristöön. Hydrauliset järjestelmät ovat usein korkeapaineisia ja voivat sisältävää helposti syttyvää mineraaliöljyä, joten onnettomuuk-silta ei voida välttyä. Mahdollisiin riskeihin tulee perehtyä jo järjestelmää suunniteltaessa

ja pyrkiä ehkäisemään kaikki mahdolliset vikatilanteet sekä niiden aiheuttamat vaarat. Alaluvussa 3.6.3 perehdytään Meksikonlahden öljyonnettomuuteen ja siihen johtaneisiin syihin erityisesti hydrauliiikan näkökulmasta.

### 3.5.1 Ympäristövaikutukset

Syvänmeren kaivostoiminnalla on useita haitallisia vaikutuksia meriympäristöille ja niiden luonnonmukaisuudelle. Kaivostoiminnassa hyödynnetään merenpohjan työkoneita, jotka mekaanisesti kaivavat pohjaa, leikkaavat sitä suihkuttamalla korkeapainevevettä tai kemiallisesti huuhtovat maata pois. Kaikki mainituista menetelmistä saavat aikaan suuria merenpohjan hiukkasista muodostuvia pilviä ja mineraalijätteen kerääntymistä mereen, mikä häiritsee merkittävästi merenpohjan ympäristöä. Pitkäaikainen kaivostoiminta voi pahimmillaan aiheuttaa paikallisen merenpohjan ekosysteemin tuhoutumisen ja monien kasvi- ja eläinlajien sukupuuttoon kuoleminen. Lisäksi kaivostoiminta voi saastuttaa kaloja ja muita mereneläviä raskasmetalleilla, hävittää kokonaisia koralliriuttoja sekä lisätä öljyn mereen päätymistä. [13]

### 3.5.2 Hydraulinesteen syttyminen

Nesteet voivat leimahtaa ja syttyä palamaan kolmen tärkeän olosuhteen täytyessä. Reaktioon tulee löytyä syttyvä materiaali, syttymisen lähde sekä happi, joka saadaan paineistetusta ilmasta. Kaikki edellä mainitut asiat tulee löytyä tai syttymistä ei tapahdu. Lisäksi syttymislähteen lämpötilan tulee saavuttaa syttävän nesteen leimahduspiste. Mineraaliöljyjen alin leimahduslämpötila on noin 160 °C. Valmistajat tyypillisesti ilmoittavat hydraulinesteidensä leimahduspisteet. [2, s. 219–220]

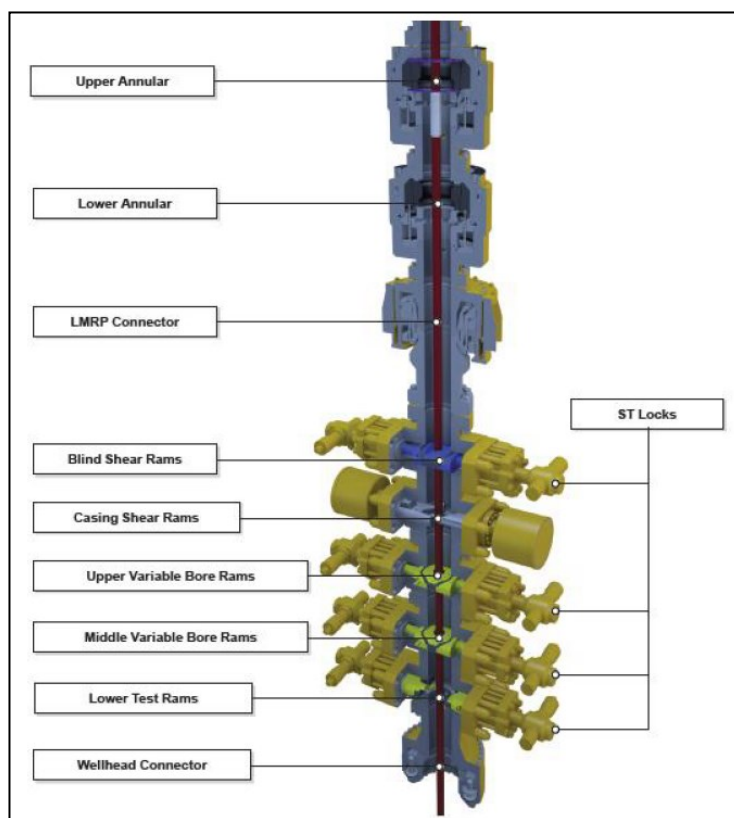
Muun muassa sylintereissä käytettävä hydraulineste on mahdollista syttyä palamaan, jos syttymisen lähde pääsee tarpeeksi lähelle sitä, sillä paineistetut sylinterit vuotavat aina vähän kaasua tiivisteidensä kautta. Merenalaisessa hydrauliiikassa kosteus estää hyvin ulkopuolelta tulevan syttymisen lähteen, mutta järjestelmä on mahdollista syttyä myös sisäpuolelta. Esimerkiksi männänvarren ja sylinterin väliin on mahdollista muodostua sähkökenttä, joka voi purkaantua staattisena sähköiskuna ja näin sytyttää nesteen. Myös mekaanisten osien hankauksesta syntyvät kipinät voivat sytyttää hydraulinesteen. Mekaanista hankausta ei normaaliolosuhteissa tulisi koskaan tapahtua, mutta se on mahdollista järjestelmän vikaantuessa. [2, s. 219–220]

### 3.5.3 Deepwater Horizon

Deepwater Horizon oli Transocean-yhtiön rakentama kelluva öljynporauslautta, jolla pystyttiin poraamaan 3 000 m syvässä vedessä ilman, että sitä pidettiin paikallaan ankkureiden tai kaapeleiden avulla. Lautta pysyi veden päällä paikallaan kahdeksan tehokkaan tietokoneohjatun potkurin avulla. Deepwater Horizon upposi 22. huhtikuuta 2010 lautalla

sattuneen räjähdysten seurauksena, jossa menehtyi myös 11 sen työntekijää. Onnettomuus tapahtui Meksikonlahdella noin 70 km:n päässä Lousianan rannikosta ja sen seurauksena mereen tulvi, arvioiden mukaan, noin 800 000 m<sup>3</sup> öljyä. Onnettomuuden aikaan Deepwater Horizon oli vuokralla British Petroleum -yhtiöllä. [30, s. 6]

Onnettomuutta edeltäneessä porausoperaatiossa Deepwater Horizon oli laskenut Macondo öljylähteen päälle hydraulisesti toimivan, 16 m korkean ja 450 000 kg:n BOP-venttiililaitteiston. BOP sisältää kuvan 12 mukaisesti joukon vastakkain olevia hydraulisylintereitä, jotka on suunniteltu eri tehtäviin. BOP:n tarkoituksena oli hätätilanteessa leikata poikki porausputki ja estää hiilivetyjen purkautuminen sulkemalla öljylähde. Deepwater Horizon sai porattua reiän Macondo-öljylähteeseen ja sen valmistellessa siirtymistä seuraavaan porausoperaatioon, purkautui lähteestä kaasua ylös lautalle, mikä aiheutti kuolonuhrit vaatineen räjähdysten. Räjähdysten seurauksena Meksikonlahteen alkoi rikkoontuneesta putkistosta virrata hallitsemattomasti kaasua ja öljyä. British Petroleum ja Transocean yrittivät estää öljyn ja kaasun virtaamisen ROV:iden avulla ja sulkea BOP:n venttiilejä. Venttiilien sulkeminen ei kuitenkaan onnistunut, sillä räjähdysten seurauksena porausputki oli taipunut, eikä se ollut venttiilien välissä enää keskeisesti vaan putkea leikkaavien terien reunalla. Putken asennosta huolimatta sylinterit onnistuivat leikkaamaan porausputken poikki, mutta ne eivät onnistuneet muodostamaan pitävää tiivistettä, jotta öljyn virtaaminen olisi loppunut. [7, s. 33–35][30, s. 6–8]



**Kuva 12.** Deepwater Horizonin BOP-venttiililaitteisto [7, s. 45].

U.S Chemical Safety and Hazard Investigation –lautakunnan teettämän BOP-venttiililaitteiston vika-analyysin mukaan Deepwater Horizonin BOP:ssa oli kaksi painesensoria. Sensorien muodostaman datan avulla olisi todennäköisesti ymmärretty sulkea BOP-venttiililaitteisto tarpeeksi ajoissa jotta se olisi onnistunut. Tällöin kaasua olisi ehtinyt virrata vain vähän porausputkeen, eikä räjähdystä olisi tapahtunut ollenkaan. Porausryhmä ei kuitenkaan jostain syystä hyödyntänyt sensorien tarjoamaa dataa. Vika-analyysin mukaan BOP:n paineakkujen antama paine porausputken katkaisemiseen ei ollut tarpeeksi suuri, jotta venttiili olisi sulkeutunut. Suunnittelemalla katkaisuventtiilit ja paineakut odotetun öljylähteen maksimipaineen mukaan, vähennettäisiin onnettomuusrisiä. Onnettomuudesta lähtien Yhdysvaltain The Bureau of Safety and Environmental Enforcement on ottanut käyttöön tämän vaatimuksen. [7, s. 39–42]

## 4. HYDRAULIJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Valittaessa komponentteja meren alla käytettävään hydraulijärjestelmään on tärkeää huomioida, että mitä syvemmälle veden alle mennään, sitä suurempi on veden massan aiheuttama ympäröivä paine. Kuten jo kappaleessa 2.1 todettiin, niin kymmenen metriä vettä kasvattaa ympäristön painetta noin 0,1 MPa, mikä tarkoittaa että 5 000 m:n syvyydessä ympäröivä paine on 50 MPa. Näin ollen merikäytössä olevien komponenttien tulee kestää suurta ympäristön niihin kohdistamaa painetta. [8, s. 10] Komponenttien materiaaleilta vaaditaan myös hyvää korroosion kestoja tai suojausta sitä vastaan. Tästä syystä tulee materiaalien kestää vettä ja suolaisen meriveden aiheuttamaa korroosiota. [28, s. 15] Veden alla käytettävän toimilaitteen tulee olla suojattu merivedeltä ja merivedessä aiheutuvilta ilmiöiltä, kuten suolojen tunkeutumiselta ja kasvuston kiinnittymiseltä. [2, s. 272] Käytettäessä hydraulijärjestelmiä syvällä meren alla, tulee järjestelmien komponenttien olla toimintavarmoja, sillä niiden vikaantuessa on korjaaminen todennäköisesti haasteellista [8, s. 10]. Merenalaisissa hydraulijärjestelmissä voidaan periaatteessa hyödyntää vastaavia komponentteja kuin tavallisissa maalla käytettävissä järjestelmissä, kunhan otetaan huomioon komponenttien korroosionkestävyys [2, s. 274]. Syvälle merikäyttöön tuleva järjestelmä tulee aina painekompensoida (ks. luku 4.2). [5, s. 555].

### 4.1 Materiaalit

Yleisesti merenalaisessa hydraulikassa käytettyjä materiaaleja ovat ruostumaton teräs, haponkestävä teräs, erilaiset seostetut teräkset sekä erikoispinnoitetut teräkset. Teräksiä ei kannata käyttää meriolosuhteissa suojaamattomina muun muassa niiden huonon korroosiokestävyyden takia, vaan järkevämpi vaihtoehto on hyödyntää niitä pinnoitettuina. ISO 21457-standardi luettelee tyypillisimpiä materiaaleja merenalaisessa käytössä oleville komponenteille. Standardin mukaan esimerkiksi öljylähteen päälle sijoitettavan laitteiston kaikki veden kanssa kosketuksessa olevat pinnat tulisi olla joko hiili- tai niukkaseosteista terästä 625-seoksella. Putkistot tulisi tehdä lujitemuoveista tai ruostumattomista teräksistä, kuten 316, 22Cr Duplex tai 6Mo –laaduista. [17, s. 119][22]

Alumiiniseoksista parhaat korroosionkesto-ominaisuudet ovat 5000-sarjan alumiini-magnesiumseoksilla. Erityisesti alumiinit 5083 ja 5754 ovat tarkoitettu merivesikäyttöön ja niitä hyödynnetään muun muassa laivateollisuudessa (ks. LIITE A). Titaanilla ja sen seoksilla on erittäin hyvät korroosionkesto-ominaisuudet merivedessä, mikä perustuu niiden pintaan muodostuvan oksidikerroksen hyvään kiinnittyvyyteen sekä tiiveyteen. Oksidikerroksen muodostumiseen tarvittava happi on merivedessä yleensä aina saatavilla, joten titaani tai sen seokset eivät tavallisesti korrosoidu merivedessä. Toisaalta titaanipohjaiset seokset ovat hintaluokaltaan teräksiä huomattavasti kalliimpia. Metallien yleinen korroosio syvällä meressä on tavallisesti vähäisempää tai yhtä suurta kuin meren pinnalla.



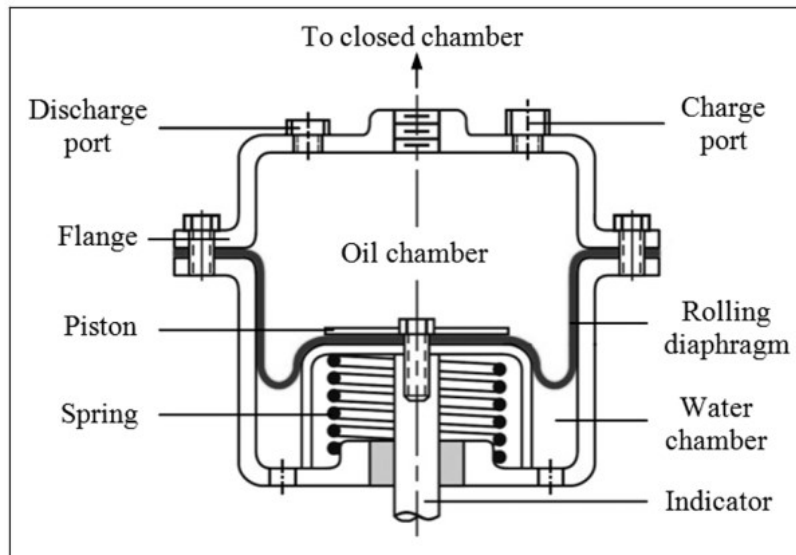
Tähän poikkeuksen tekevät alumiiniseokset, joilla yleinen korrosoituminen on syvällä meressä voimallisempaa kuin pinnalla. Metalleista hyvä korroosionkestävyys suojaamattomina on ainoastaan titaaniseoksilla ja tietyillä nikkeliseoksilla. Muut metallilaadut on tärkeää suojata joillain menetelmällä, kuten katodisella suojauksella tai pinnoitteella. [26]

Materiaalin kestävyys huomioiden, toimilaitteiden kotelot valmistetaan usein ruostumattomasta teräksestä tai Duplex-teräksestä ja niihin laitetaan usein myös NORSOK M-501-standardin mukainen meriveteen suunniteltu suojapinnoite tai maalausmenetelmä. Hydraulisyylintereissä käytetään yleisesti ruostumattonta terästä, kuten Duplex-terästä, ja se voidaan esimerkiksi pinnoittaa keraamilla tai kobolttipohjaisella Enduroq- eli suurnopeusliekkiruiskutuspinnoitteella [1]. Männänvarren tiiviste on tärkeä osa vedenalaista hydraulijärjestelmää, sillä se on kosketuksissa sekä meriveden että hydraulinesteen kanssa. Eräitä merihydrauliikassa käytettyjä tiivistemalleja ovat belofram-tiivisteet. [2][4][20]

## 4.2 Painekompensointi

Kaikki syvällä meren alla käytettävät hydraulijärjestelmät tulee jollain tavalla painekompensoida. Muutoin laskettaessa järjestelmää veden alle, ympäröivä vedenpaine pienentää hydraulineesteeseen sitoutuneiden ilmakuplien tilavuutta ja näin ollen aiheuttaa meriveden tunkeutumisen järjestelmään tai koko hydraulijärjestelmän rutistumisen kasaan. Hydraulijärjestelmän painekompensointi voidaan tehdä käyttämällä joustavia koteloita tai siihen erityisesti suunniteltuja painekompensaattoreita käyttäen. [5, s. 554–555]

Kuvassa 13 on esitetty välikalvoerotteinen painekompensaattori. Kyseisessä painekompensaattorissa järjestelmäpuoli erotetaan merivedestä jousipuristeisella välikalvolla. Paine-kompensaattorilla varustetussa hydraulijärjestelmässä jousella paineistettu neste korvaa välittömästi järjestelmässä kutistuvan ilman, kun järjestelmää lasketaan veden alla. Taasen nostettaessa järjestelmää meressä hydraulineesteeseen sitoutunut ilma laajenee ja korvaava neste palautuu takaisin painekompensaattoriin. Paine-kompensaattorissa jousi säädetään siten, että se aiheuttaa säiliöpuolelle hieman ympäristönpainetta suuremman paineen ja näin ollen estää veden tunkeutumisen järjestelmään. Valittaessa painekompensaattoria hydraulijärjestelmään on tärkeää valita kompensaattori, jonka nestesäiliön tilavuus on riittävä hydrauliselle laitteelle tarkoitettuun käyttösyvyyteen. Liian syvälle veteen lasketussa järjestelmässä painekompensaattorissa oleva korvaava neste loppuu ja järjestelmä on vaarassa rikkoutua. Markkinoilla on olemassa painekompensaattoreita, joissa on kompensaattorissa olevan nesteen määrää mittaava anturi ja paineenrajoitusventtiili, joka suojaa järjestelmää ylitäytöltä ja sisällä olevan öljyn lämpölaajenemiselta. [5, s. 223, 555][33, s. 223]



*Kuva 13. Painekompensaattori välikalvoerotuksella [33, s. 223].*

### 4.3 Venttiilikotelot

Suuntaventtiilit ovat erittäin herkkiä meriveden aiheuttamalle korroosiolle niiden ollessa kosketuksessa suolaiseen veteen. Näin ollen merenalaisissa hydraulijärjestelmissä venttiilit pyritään erottamaan merivesikontaktista koteloidmalla venttiilit hydraulineesteellä täytettyyn tilaan. Venttiilien ollessa kosketuksissa ainoastaan haluttuun hydraulineesteeseen, kuten mineraaliöljyyn, voidaan järjestelmässä käyttää tavallisia teollisuusventtiileitä. Nesteellä täytetty kotelo paineistetaan säiliöpaineeseen eli hieman ympäristönpainetta korkeammalle. Tällöin estetään meriveden tunkeutuminen järjestelmään ja mahdolliset vuodot suuntautuvat ulos järjestelmästä. [2 s. 275]][33, s. 222]

### 4.4 Hydraulinesteet

Hydraulineesteellä on hydraulijärjestelmässä useita tarkoituksia, kuten komponenttien osien voitelu, epäpuhtauksien ohjaus ulos järjestelmästä, järjestelmän tiivistys sekä suojaus korroosiolta ja ruostumiselta. Nesteen tärkein toiminto järjestelmässä on kuitenkin tehon jakaminen toimilaitteille pumpulta. Yleisesti ottaen hydraulinesteet koostuvat ainoastaan perusnesteestä sekä lisäaineista, jotka ovat nesteen ominaisuuksia parantavia kemikaaleja. [17, s. 112]

#### 4.4.1 Mineraaliöljypohjaiset nesteet

Hydraulijärjestelmissä käytettävistä nesteistä enemmistö on mineraaliöljyjä. Syitä mineraaliöljyjen suosiolle on useita, mutta pääasiallisia syitä ovat mineraaliöljyjen kustannustehokkuus, hyvä voitelukyky sekä yhteensopivuus eri voiteluaineiden ja materiaalien, kuten metallien ja tiivisteiden, kanssa. Mineraaliöljyt eivät vaadi tarkkaa huoltamista ja

niitä on saatavana hyvinkin erilaisilla viskositeeteilla, joten järjestelmään löytyy usein sopiva öljy. Mineraaliöljyt säilyttävät ominaisuutensa pitkään ja ominaisuuksia voidaan parantaa lisäaineiden avulla. Huonoina puolina mineraaliöljyissä on niiden heikko paloturvallisuus sekä haitallisuus vesiympäristöille ja maaperälle. [17, s. 115][27, s. 5]

#### 4.4.2 Vaikeasti syttyvät nesteet

Vaikeasti syttyviä nesteitä käytetään, kun on olemassa vaara hydraulinesteen syttymiselle. Taulukossa 3 on esitelty vaikeasti syttyvät nesteet ryhmittäin. Esimerkiksi HFC-nesteet ovat yksi käytetyimmistä hydraulinesteistä palovaarallisissa hankkeissa, kuten merellä tapahtuvassa öljyteollisuudessa, ja niitä voidaan hyödyntää jopa yli 35 MPa:n paineissa. HFC-nesteissä sisältää polyglykolia, jota käytetään nesteen sakeuttamiseen tarvittavan viskositeetin muodostamiseksi. Lisäksi nesteet sisältävät usein lisäaineita, kuten natriumsulfaatteja tai amiineja, joilla pyritään estämään nesteen vaahtoaminen, mikrobiologinen hajoaminen, komponenttien kuluminen ja korrosoituminen. Nesteisiin usein myös lisätään fluoresoivia väriaineita, jotta mahdolliset vuodot pystyttäisiin paremmin havaitsemaan. Toisin kuin mineraaliöljyt vaikeasti syttyvät nesteet ovat yhteensopimattomia useiden maalipintojen kanssa, ainoastaan epoksi-, fenoli- ja nailonpohjaiset maalit sopivat käytettäväksi niiden kanssa. [17, s. 117][27, s. 84][37, s. 90–91]

**Taulukko 3.** Vaikeasti syttyvät nesteet ryhmittäin [9][14, s. 26–27][17, s. 116–117].

Ryhmä	Alaryhmä	Koostumus	Käyttölämpötila-alue	Kuulalaakerin käyttöikä *	Kiertomoottorin käyttöikä **
HFA	HFAE	Mineraaliöljy tai synteettinen esteri, vesi (yli 80 %, tavallisesti 95 %)	5–50 °C	alle 5 %	2–5 %
	HFAS	Synteettiset kemikaalit, vesi (yli 80 %, tavallisesti 95 %)	5–50 °C		
HFB	-	Öljy, vesi (yli 40 %)	5–50 °C	30–35 %	10–20 %
HFC	-	Polyglykoli, vesi (35–50 %)	-20–55 °C	10–20 %	10–15 %
HFD	HFDR	Fosforihappoesteri	-20–150 °C	50–100 %	80–100 %
	HFDU	Karboksylihappo- tai polyolefiiniesteri	-35–90 °C		

\* Tyypillisen kuulalaakerin arvioitu käyttöikä verrattuna mineraaliöljykäyttöön, jolla arvo 100 %.

\*\* Tyypillisen kiertomoottorin arvioitu käyttöikä verrattuna mineraaliöljykäyttöön, jolla arvo 100 %.

### 4.4.3 Nopeasti biohajoavat nesteet

Vuonna 1992 pelkästään Saksassa hävitettiin 27 000 000 litraa hydraulioöljyjä kierrättämättä ympäristöön. Kasvava teollistuminen ja sen vaikutukset ympäristöön sekä luontoon ovat saaneet eurooppalaiset valtiot kehittämään biologisesti nopeasti hajoavia nesteitä, jotka ovat mineraaliöljyjä tai niiden emulsioita merkittävästi ympäristöystävällisempiä. [17, s. 118][27, s. 111]

Nesteiden biohajoavuutta testataan ensisijaisesti CEC-L-33-A-93 -testin avulla, joka on tarkoitettu erityisesti voiteluaineiden testaamiseen. Testillä määritellään nesteen biohajoavuudelle prosentuaalinen arvo, perustuen siihen kuinka paljon nesteessä muuttuu hiilivetyjä hiilidioksidiksi 21 testipäivän aikana. Testin arvon tulee olla vähintään 80 %, jotta neste voidaan luokitella biohajoavaksi nesteeksi Saksan Blue Angel -kriteerin mukaan. CEC-L-33-A-93 -testi ei kuitenkaan kerro viimeistä totuutta biohajoamisesta, vaan nesteelle suoritetaan usein vielä toinen testi, joka määrittää sen lopullisen biohajoavuusasteen. Kyseisessä OECD 301-B -testissä mitataan nesteestä 28 päivän aikana poistuva hiilidioksidin määrä. Mitattua arvoa verrataan hiilidioksidin määrään, joka olisi teoreettisesti mahdollista poistua nesteestä. Testillä määritettävä suhdeluku tulee olla vähintään 60 %, jotta se läpäisee biohajoavuuden kriteerit. Vaikka neste luokiteltaisiin biohajoavaksi, se ei välttämättä ole ympäristöystävällistä, sillä nesteiden sisältämät hajoamattomat ainesosat voivat muodostaa eliöille haitallisia ympäristömyrkyjä päätyessään luonnonvesistöön. [27, s. 128–132]

Voiteluominaisuuksiltaan biohajoavat nesteet ovat vähintään mineraaliöljyjen taseisia, mutta niiden kylmäominaisuuksia on usein jouduttu parantamaan lisäaineiden avulla. Biohajoavat nesteet eivät myöskään ole yhtä pitkäikäisiä kuin mineraaliöljyt. Taulukossa 4 biohajoavat nesteet on luokiteltu ryhmittäin. [17, s. 118]

**Taulukko 4.** Biohajoavat nesteet ryhmittäin [17, s. 118].

Ryhmä	Koostumus	Käyttölämpötila-alue
HETG	Kasvipäisiä estereitä	-20–70°C
HEES	Synteettisiä estereitä	-35–90°C
HEPG	Polyglykolinesteitä	-30–90°C
HEPR	Synteettisiä polyalfaolefiini- ja hiilivetyneisteitä	-35–80°C

#### 4.4.4 Vesi

Hydraulijärjestelmä on mahdollista myös suunnitella siten, että hydraulinesteenä käytetään merivettä perinteisten aineiden kuten mineraaliöljyn sijaan. Meriveden hyödyntäminen järjestelmissä on mutkatonta ja edullista. Merivettä hyödyntävissä järjestelmissä suolaveden tunkeutuminen järjestelmään ei myöskään vaaranna sen koko toimintaa. Nykyään merihydrauliikassa käytetään paljon biohajoavia nesteitä, mutta niiden vuotaminen ympäristöön on silti haitallista ja poliittisesti arveluttavaa [5, s. 136]. Merivedellä toimivan järjestelmän vuodot eivät tietenkään aiheuta ympäristön saastumista, ellei veteen ole lisätty lisäaineita sen hydraulisten ominaisuuksien parantamiseksi. [11]

Valittaessa merivesi hydraulinesteeksi tulee kuitenkin huomioida sen metallikomponenteille aiheuttamat haitat, kuten korrosoituminen, ruostuminen ja hapettuminen. Vedellä on myös heikot voiteluominaisuudet, jolloin järjestelmän komponentit altistuvat herkästi mekaaniselle kulumiselle. Veden käyttöön hydraulinesteenä liittyy myös muita ongelmia, kuten veden matalan viskositeetin aiheuttamat järjestelmän tehohäviöt, jollei järjestelmässä käytetä pienillä välyksillä valmistettuja erikoiskomponentteja. Lisäksi veteen voi järjestelmässä ollessaan alkaa kehittymään bakteerikasvustoa, mikä kerryttää järjestelmään haitallisia epäpuhtauksia. Merivettä hydraulinesteenä hyödyntävät järjestelmät tarvitsevat laadukkaan suodatuksen etenkin silloin, kun niiden toimintaympäristön vesi ei ole puhdasta. Kaikesta huolimatta meriveden hydraulinesteenä käytön mahdollistaminen on ollut insinöörien kehityskohteena jo pitkään ja tulevaisuudessa sen käyttö tulee todennäköisesti lisääntymään. [5, s. 136][11]

#### 4.4.5 Hydraulinesteen valinta merenalaiseen käyttöön

Järjestelmää suunniteltaessa tulee jo päättää mitä hydraulinestettä järjestelmässä aiotaan käyttää, koska nesteen ominaisuudet osittain määrittävät järjestelmälle sopivat materiaalit, mitoituksen sekä käyttöön vaikuttavat tekijät. Oikean nesteen valintaan vaikuttavat taasen käyttöympäristön olosuhteet, kuten ympäristön lämpötilan vaihtelu. Lisäksi nesteen määrittämiseen vaikuttavat järjestelmässä käytettävä painetaso, käyntiajanjaksot sekä -lämpötilat. [17, s. 130]

Kuten luvussa 2.2 mainittiin, niin hydraulinesteen viskositeetin tulee olla suotuisalla viskositeettialueella, jotta järjestelmän hyötysuhde olisi mahdollisimman hyvä ja sen komponentit toimisivat oikein. Näin ollen oikea hydraulinesteen valinta on tärkeää järjestelmän luotettavuuden ja kestävyuden kannalta. Kauranne et al. esittää [17, s. 121] yleisesti suositeltaviksi viskositeettirajoiksi taulukon 5 mukaiset arvot.

**Taulukko 5.** Suositeltavat viskositeettirajat hydraulinesteillä [17, s. 121].

	$\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [cSt]
Ideaalinen viskositeettialue	~ 15–100
Ylempi viskositeettiraja kylmäkäynnistyksessä (kavitaatiovaara)	~ 500–1 000
Alempi viskositeettiraja (voitelukyvyyn raja)	~ 10

Luvussa 2 osoitettiin, että meriveden lämpötila lähenee 0 °C:tta ja hydrostaattinen paine kasvaa, mitä syvemmälle meressä laskeudutaan. Tämä tulee huomioida valittaessa hydraulinestettä merenalaiseen hydraulijärjestelmään. Esimerkiksi valittaessa sopivaa hydraulinestettä ROV:hen tulee tietää millä syvyydellä laitteella aiotaan operoida. Normaalisti ROV toimii 0–30 °C:n lämpötiloissa [5, s. 30]. Yleisimmät hydraulinesteet eivät sovellu järjestelmiin, missä sen käyntilämpötila lähenee 0 °C:tta. Tällöin tulee tarkastella nesteitä, joiden viskositeetti säilyy alhaisena kylmissäkin olosuhteissa.

Taulukossa 6 on tarkasteltu 11 valitun hydraulinesteen viskositeettien käyttäytymistä eri lämpötiloissa. Liitteiden B ja C taulukoista on saatu ohjearvot Mobil-hydrauliöljyjen sekä Panolin HEES-luokan (ks. taulukko 4) nopeasti biohajoavien nesteiden viskositeeteille [21]. Ohjearvot on kerätty liitteeseen D. Luvun 2.2 kaavoja (1) – (5) sekä ohjearvoja hyödyntämällä on saatu määriteltyjä nesteiden viskositeetit valituissa lämpötiloissa ja piirrettyä kuvaaja liitteeseen E eri viskositeettien käyttäytymisestä lämpötilan muuttuessa.

**Taulukko 6.** Laskennallisesti määriteltyjä arvoja ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  [cSt]) hydraulinesteiden viskositeeteille lämpötilan muuttuessa.

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Viscosities	0	5	10	20	30	40	50
Teboil Arctic Oil	43,80	37,29	32,03	24,21	18,83	15,00	12,21
Teboil Oil Polar	69,22	58,29	49,55	36,73	28,06	22,00	17,64
Teboil Deck Oil	176,84	138,46	110,08	72,48	50,06	36,00	26,80
Teboil Hydraulic Eco 15	74,14	57,60	45,56	29,89	20,71	15,00	11,28
Teboil Hydraulic Eco 32	183,98	140,02	108,54	68,49	45,72	32,00	23,31
Teboil Hydraulic Eco 46	313,73	232,36	175,63	105,92	67,99	46,00	32,53
Panolin Atlantis 5	21,77	17,81	14,78	10,57	7,89	6,10	4,86
Panolin Atlantis 15	94,54	71,48	55,18	34,74	23,27	16,40	12,06
Panolin HLP Synth 15	86,57	65,87	51,15	32,53	21,98	15,60	11,54
Panolin HLP Synth 22	138,86	102,15	76,93	46,38	29,97	20,50	14,70
Panolin HLP Synth 32	271,24	193,93	142,18	81,65	50,55	33,30	23,10

Saatujen arvojen perusteella kuuden eri hydraulinesteen viskositeetit pysyvät 0 °C:n lämpötilassa taulukossa 3 annetulla ideaalisella viskositeettialueella ( $15\text{--}100 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ). Näistä kuudesta hydrauliöljystä viidellä viskositeetti on vielä 30 °C:ssa ideaalisella alu-

eella. Lisäksi jos pyritään huomioimaan hydrostaattisen paineen vaikutusta viskositeettiin esimerkiksi kaksinkertaistamalla viskositeetti 0 °C:ssa, niin nesteistä enää Teboil Arctic Oil -hydrauliöljy säilyy ideaalisella viskositeettialueella. Tosin Panolin Atlantis 5 -nesteellä on selvästi pienin viskositeetti 0 °C:ssa, joten sen viskositeetti säilyy pisimpään optimaalisella alueella kun tarkastellaan paineen aiheuttamaa viskositeetin nousua ja näin ollen se pysyy käyttökelpoisena syvimmälle meressä. Kyseinen nesteen voitelukyvyyn raja alkaa toisaalta tulla vastaan päälle 20 °C:n lämpötiloissa, joten lämpimissä vesissä sen käyttäminen vaatisi nesteen jäähdyttämistä.

Sopivan hydraulinesteen määrittäminen merenalaiseen hydraulikkaan vaatii järjestelmän ominaisuuksien ja käyttökohteiden tietämistä. Kun tiedetään järjestelmän tehohäviöt eli lämpöteho ja rakenteelliset jäähdytysalueiden mitat, voidaan karkeasti määrittää järjestelmän käyntilämpötila. Lisäksi tulee tietää järjestelmän käyttösyvyys, jolloin voidaan arvioida paremmin paineen aiheuttama muutos hydraulinesteen viskositeettiin. Toisaalta nesteiden sopivuutta järjestelmään voidaan auttaa tarvittaessa, lisäämällä järjestelmään lämmitin tai jäähdytin. Tällöin esimerkiksi taulukon 6 hydraulinesteistä useampaakin voitaisiin käyttää merenalaisissa järjestelmissä. Lopulta kun onnistutaan määrittämään järjestelmään sopivat nesteet, tulee huomioida myös nesteen aiheuttamat kustannukset. Esimerkiksi taulukossa 3 on havaittavissa kuulalaakerien tai kiertomoottoreiden heikko käyttöikä HFC-nesteillä verrattuna mineraaliöljyihin. Lisäksi taulukossa 7 voidaan nähdä myös suurpiirteistä hintavertailua eri hydraulinesteiden välillä ja voidaan huomata kyseisten HFC-nesteiden olevan myös 3–4 kertaa mineraaliöljyjä kalliimpia. Näin ollen mineraaliöljyn käytön hydraulijärjestelmissä voidaan olettaa tulevan halvemmaksi kuin HFC-nesteiden.

**Taulukko 7.** *Hydraulinestetyyppien hintavertailu [17, s. 130].*

Hydraulineste	Hinta suhteessa mineraaliöljyyn
HFAE	0,3–0,5
Mineraaliöljy	1
HFB	1,2–1,5
Kasviöljy	1,5–2,0
HFC	3,0–4,0
Synteettiset nesteet	4,0–20,0

## 5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Merenalaiset olosuhteet aiheuttavat hydraulikalle useita ongelmia, jotka tulee ratkaista hydraulijärjestelmien toimintakyvyn säilyttämiseksi merikäytössä. Merivedessä vallitsevaan hydrostaattinen paineeseen on järjestelmissä varauduttu niiden painekompensoinnilla. Merenalaisiin hydraulijärjestelmiin tulee asentaa painekompensaattori, joka paineistaa järjestelmän säiliöpaineen hieman ympäristön painetta korkeammaksi. Näin ollen järjestelmän mahdolliset vuodot tapahtuvat aina ulos järjestelmästä, jolloin merivesi ei pääse tunkeutumaan järjestelmään ja vioittamaan sitä. Painekompensoitu hydraulijärjestelmä ei myöskään paineen vaikutuksesta rutistu kasaan syvällä meressä.

Suolaisen meriveden metalleihin aiheuttaman korroosion takia, järjestelmiin tulee valita materiaaleja jotka ovat korroosiokestäviä. Näihin materiaaleihin lukeutuvat muun muassa ruostumaton teräs, pinnoitettu teräs sekä tietyt metalliseokset. Yritykset ovat myös lanseeranneet teräksille omia meriveden kestäviä erikoispinnoitteitaan, kuten Rexroth Bosch Group Enduroq-pinnoitteen. Lisäksi muun muassa NORSOK M-501 -standardi määrittelee vaatimuksia suojapinnoitteille ja maalausmenetelmille. Korroosiolle erityisen herkäät suuntaventtiilit pyritään merenalaisissa järjestelmissä erottamaan merivesikontaktista, koteloimalla ne hydraulineesteellä täytettyyn painekompensoitavaan tilaan. Koteloinnin etuna on, että järjestelmissä pystytään hyödyntämään tavallisia teollisuusventtiileitä.

Hydrauliikan käyttäminen meren alla aiheuttaa myös erilaisia riskejä. Nykyään kun yritykset joutuvat entistä enemmän kiinnittämään huomiota toimiensa ympäristöystävällisyyteen, niin merien saastuttamista öljyllä ja ympäristömyrkyillä ei pidetä erityisen korrektina toimintana. Tästä syystä on alettu huomioida hydraulinesteiden vaikutuksia ympäristölle, ja markkinoille on tullut nopeasti biohajoavat nesteet. Tosin nekään eivät ole täysin ympäristölle vaarattomia.

Hydraulinesteen valitsemisessa merenalaiseen järjestelmään tulee huomioida järjestelmän todellinen käyttösyvyys ja ympäröivä veden lämpötila. Työssä tutkittiin laskennallisesti 11 eri hydraulinesteen viskositeetin käyttäytymistä eri lämpötiloissa. Sopivimmaksi nesteeksi 0–30 °C:ssa toimivaan järjestelmään viskositeetin perusteella havaittiin Teboilin Arctic Oil -mineraaliöljy, mutta syvempiin olosuhteisiin Panolin Atlantis 5 -neste olisi kuitenkin sopivampi. Oikean hydraulinesteen määrittämiseksi tulee myös tietää järjestelmän tehohäviöt ja jäähdytyspinta-ala. Nesteen valinnasta muodostuu helposti valinta eettisyyden ja kustannussäästöjen välillä, sillä biohajoavat nesteet ovat kalliita ja käytössä lyhytikäisiä esimerkiksi mineraaliöljyihin verrattuna. Lisäksi biohajoavien nesteiden käyttö kuluttaa järjestelmän komponentteja mineraaliöljyjä nopeammin. Insinöörien kehityskohteena on ollut merivettä hydraulinesteenä hyödyntävät järjestelmät. Merivesi on



hydraulinesteenä halpaa sekä ympäristölle vaaratonta, mutta meriveden käyttö järjestelmissä aiheuttaa useita muita ongelmia. Merivettä hydraulinesteenä käyttävät järjestelmät tulevat kuitenkin kehittymään ja todennäköisesti lisääntymään tulevaisuudessa.

## LÄHTEET

- [1] Advances in high velocity oxygen fuel spraying enhance long term durability in Bosch Rexroth Large Hydraulic Cylinder rods, Rexroth Bosch Group, 2014. Saatavissa: [https://dc-us.resource.bosch.com/media/us/trends\\_and\\_topics\\_2/technical\\_papers/hvof/rexroth-hvof-l.pdf](https://dc-us.resource.bosch.com/media/us/trends_and_topics_2/technical_papers/hvof/rexroth-hvof-l.pdf).
- [2] P. Albers, Motion Control in Offshore and Dredging, Springer, 2010.
- [3] Y. Bai, Q. Bai, Subsea Engineering Handbook, Elsevier, 2010, pp. 2–4.
- [4] R. Bhattacharyya, M.E. McCormick, Wave energy conversion, Elsevier, 2003, s. 42.
- [5] R.D. Christ, R.L Wernli, The ROV Manual: A User Guide for Remotely Operated Vehicles, Elsevier, 2014.
- [6] Curvetech: sales brochure, Docplayer, 2017. Saatavissa (viitattu 5.6.2018): <http://docplayer.net/65136159-Sales-brochure-last-updated-09-01-2017.html>.
- [7] Deepwater Horizon Blowout Preventer Failure Analysis Report, U. S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Engineering Services, L.P., 2014. Saatavissa: <https://www.scribd.com/document/269051282/Deepwater-Horizon-Blowout-Preventer-Failure-Analysis-pdf>.
- [8] Discovering the deep sea with Rexroth hydraulics, Rexroth Bosch Group, 2012. Saatavissa: [http://www.boschrexroth-us.com/country\\_units/america/united\\_states/en/Company/Press/trade\\_show\\_information/2012\\_OTC\\_Press\\_Kit/Rexroth\\_-\\_Deep\\_Sea\\_Hydraulics.pdf](http://www.boschrexroth-us.com/country_units/america/united_states/en/Company/Press/trade_show_information/2012_OTC_Press_Kit/Rexroth_-_Deep_Sea_Hydraulics.pdf).
- [9] Fire-Resistant Fluids – Conversion and Compatibility, Exxon Mobil Corporation, 2009. Saatavissa: <https://www.mobil.com/en/industrial/Lubricant-Expertise/Resources/fire-resistant-fluids-conversion-and-compatibility>.
- [10] FMC HD ROV 3D Model, Labicko, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.6.2018): <http://labicko.com/portfolio/3d-rov-model>.
- [11] X. He, B. Zhu, Y. Liu, Z. Jiang, Study on a seawater hydraulic piston pump with check valves for underwater tools, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy, 2012, s. 151–160.
- [12] R. Hienonen, R. Lahtinen, Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa, VTT, 2007, Liite 1/40–41. Saatavissa (viitattu 29.5.2018): <https://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2007/P623.pdf>.

- [13] J. Hunter, P. Singh, J. Aguon, Broadening Common Heritage: Addressing Gaps in the Deep Sea Mining Regulatory Regime, Harvard Environmental Law Review, 2018. Saatavissa: [http://harvardelr.com/2018/04/16/broadening-common-heritage/#\\_ftn43](http://harvardelr.com/2018/04/16/broadening-common-heritage/#_ftn43).
- [14] Hydraulic Fluids and Lubricants: Oils, Lubricants, Grease, Jelly, Danfoss, 2016. Saatavissa: <http://files.danfoss.com/documents/520L0463.pdf>.
- [15] Hydrauliiikkaöljyn valintaperusteita, Oy Teboil Ab, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.5.2018): <https://www.teboil.fi/tuotteet/voiteluaineet/yleista-voiteluaineista/hydrauliikkaoljyn-valintaperusteita/>.
- [16] Hydrauliiikkaöljyt, Oy Teboil Ab, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.5.2018): <https://www.teboil.fi/tuotteet/voiteluaineet/ajoneuvot/hydrauliiikkaoljyt/>.
- [17] H. Kauranne, J. Kajaste, M. Vilenius, Hydraulitekniikka, WSOY, 2008.
- [18] E. Korhonen, Alumiinit, 2012, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.6.2018): <http://www.oamk.fi/~eeroko/Opetus/ValmistustekniikanJatkokurssi/Toteutus2012/alumiinit.pdf>.
- [19] K. Laitinen, Korroosio, TRY, 2012, 1 s. Saatavissa (viitattu 29.5.2018): <http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/151/8ac778e/korroosio.pdf>.
- [20] NORSOK STANDARD M-001 Material Selection, Standard Norge, Nov 2002, Saatavissa (viitattu 29.5.2018): <http://www.standard.no/pagefiles/1176/m-001.pdf>.
- [21] Oil & Gas - Hydraulic Oils, PANOLIN Group, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.5.2018): <https://www.panolin.com/inten/products/oil-gas/hydraulic-oils.php>.
- [22] S. Olsen, ISO 21457 Materials selection and corrosion control for oil and gas production systems, EUROPEAN FEDERATION OF CORROSION, Sep 2008, Saatavissa (viitattu 29.5.2018): [http://www.efcweb.org/efcweb\\_media/Appendix+B08.pdf](http://www.efcweb.org/efcweb_media/Appendix+B08.pdf).
- [23] PANOLIN ATLANTIS: Synthetic biodegradable production line control fluid for offshore applications, SPE Offshore Europe, 2016. Saatavissa (viitattu 5.6.2018): [https://www.offshore-europe.co.uk/\\_\\_novadocuments/309702?v=636155834840800000](https://www.offshore-europe.co.uk/__novadocuments/309702?v=636155834840800000)
- [24] PANOLIN HLP SYNTH: Hydraulic fluid, readily biodegradable – saturated synthetic ester basis, Lubexel, 2016. Saatavissa (viitattu 5.6.2018): <http://www.lubexcel.com/repo/docs/A17-4682-35020.en%20HLP%20SYNTH.pdf>.
- [25] Pile driver, Turbosquid, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.6.2018): <https://www.turbosquid.com/3d-models/pile-driver-3d-model/926625>.
- [26] P. Pohjanne, Rakennemateriaalien kestävyys syvänmeren olosuhteissa, VTT, 1989, s. 8–41.
- [27] M. Radhakrishnan, Hydraulic fluids: a guide to selection, test methods, and use, ASME Press, 2003.

- [28] T. Rastus, Ympäristöolosuhteiden vaikutus hydraulijärjestelmien suunnitteluun ja käyttöön merisovelluksissa, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2011, 90 s. Saatavissa: <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/20682>.
- [29] RMI ASTM D341, Razaghi Meyer International. Saatavissa: <http://www.visco-analyser.com/RMI%20ASTM%20D341%20rev01.xls>.
- [30] M.A. Rose, B. Hunt, Learning From Engineering Failures: A Case Study of the Deepwater Horizon, Technology & Engineering Teacher, Vol. 71, Iss. 5, Feb 2012, pp. 5-11.
- [31] Seafloor Production Tools, Nautilus Minerals, 2018, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.6.2018): <http://www.nautilusminerals.com/irm/content/seafloor-production-tools.aspx?RID=333>.
- [32] The oceans, The Open University, 2016. Saatavissa: <http://www.open.edu/open-learn/science-maths-technology/the-oceans/content-section-3.2>.
- [33] F. Wang, Y. Chen, Design and experimental study of oil-based pressure-compensated underwater hydraulic system, Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 228, Iss. 4, 2014, 221 p.
- [34] Wave Power | Wave Clapper and Power Wing, Renewable Energy Development, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 29.5.2018): <http://renewableenergydev.com/wave-power-wave-clapper-and-power-wing/>
- [35] Why Don't Antarctic Fish Freeze?, Live Science, 2010. Saatavissa: <https://www.livescience.com/32794-why-antarctic-fish-dont-freeze-100831.html>.
- [36] A. Williams, Eco Wave Power completes installation of innovative device in Gibraltar, Maritime Journal, 2016. Saatavissa: <http://www.maritimejournal.com/news101/marine-renewable-energy/eco-wave-power-completes-installation-of-innovative-device-in-gibraltar>.
- [37] L. Zheng, A. Neville, A. Gledhill, D. Johnston, An Experimental Study of the Corrosion Behavior of Nickel Tungsten Carbide in Some Water-Glycol Hydraulic Fluids for Subsea Applications, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 19, 2010.

## LIITE A: ALUMIINIEN VERTAILUTAULUKKO

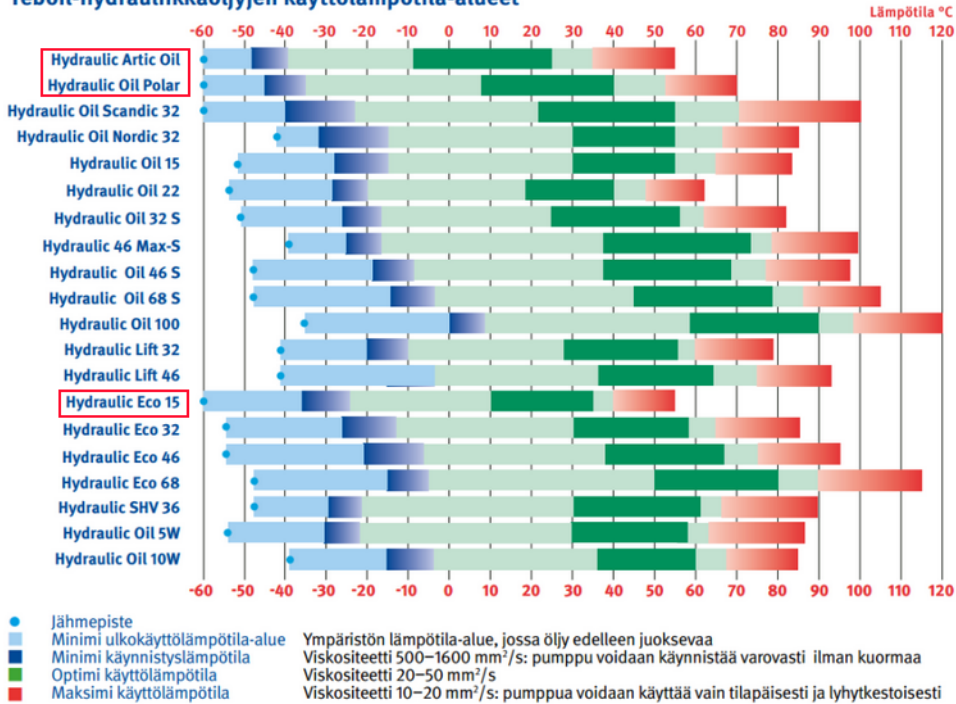
Alla olevassa taulukossa on lueteltu yleisimpiä seoksia ja niiden tyypillisiä ominaisuuksia. Näitä alumiineja on saatavissa eri muodoissa.

Alumiinien vertailutaulukko							
EN AW	AA	WERKSTOFF	DIN	R, 0.2% Rm			Käyttökohteet
				SS	MPa	MPa HB	
1050A	1050A	3.0255	Al99,5	4007	20	65	20 Hyvä korroosiokesto, hyvä muovattavuus
1070A	1070A	3.0275	Al99,7	4005	15	60	18 Hyvä korroosiokesto, hyvä muovattavuus
1200	1200	3.0205	Al99,0	4010	25	75	23 Syvävetoon, lämmönvaihtimet
2007	2007	3.1645	AlCuMgPb	4335	220	340	90 Automaattisorvauslaatu
2014	2014	3.1255	AlCuSiMn	4338	440	360	120 Suuri lujuus, lentokoneteollisuus
2017A	2017	3.1325	AlCuMg1		260	380	110 Pakkausteollisuus, hyvä lujuus
2024	2024	3.1355	AlCuMg2		330	460	120 Suuri lujuus ja sitkeys, lentokoneteollisuus
3003	3003	3.0517	AlMnCu		35	95	28 Hyvä korroosiokesto, hyvä muovattavuus
3103	3103	3.0515	AlMn1	4054	35	90	27 Autokorilaatu
5005	5005	3.3315	AlMg1	4106	110	145	47 Anodisointilaatu
5052	5052	3.3523	AlMg2,5	4120	65	170	47 Hyvä korroosiokesto
5083	5083	3.3547	AlMg4,5Mn	4140	125	275	75 Hyvä korroosiokesto, merivesilaatu
5754	5754	3.3535	AlMg3	4125	80	200	50 Merivesilaatu, hyvä hitsattavuus
6012	6012	3.0615	AlMgSiPb		200	275	80 Automaattisorvauslaatu
6061	6061	3.3211	AlMg1SiCu		240	290	90 Hyvä hitsattavuus, suuri lujuus
6063	6063	3.3206	AlMgSi0,5	4104	160	215	70 Yleisin profiililaatu, sopii anodisointiin
6082	6082	3.2315	AlMgSi1	4212	255	315	95 Yleisin koneenrakennusos, anodisoitava
6262	6262		AlMg1SiPb		240	290	85 Automaattisorvauslaatu, anodisoitava
7010	7010	3.4394			485	545	150 Suuri lujuus, lentokoneteollisuus
7020	7020	3.4335	AlZn4,5Mg1	4425	275	350	105 Suuri lujuus, hitsattava
7050	7050	3.4144			485	545	150 Lentokoneteollisuus, muotINVALMISTUS
7075	7075	3.4365	AlZnMgCu1,5		505	570	150 Muottiteollisuus, työvälaineet, lentokoneet
7475	7475	3.4384			420	500	140 Lentokoneteollisuus

[18]

## LIITE B: TEBOIL HYDRAULIIKKAÖLJYJEN OMINAISUUKSIA

### Teboil-hydrauliikkaöljyjen käyttölämpötila-alueet



### Teboil Hydraulic Arctic Oil (15), Oil Polar (22), Deck Oil (32)

Voimakkaasti vaihtelevissa ilmasto-olosuhteissa toimiviin hydrauliikkajärjestelmiin suunniteltuja erikoishydrauliikkaöljyjä. Näillä öljyillä on erittäin korkea viskositeetti-indeksi ja erinomaiset kylmäominaisuudet. Soveltuvat erinomaisesti mm. kuorma-autojen perälautanostimiin, laivojen kansihydrauliikkaan ja muihin järjestelmiin, joiden käyttö on jaksottaista, mutta järjestelmät on saatava käynnistettyä kovallakin pakkasella ilman lämmityskäyttöä.

**Suorituskyky:** Eaton Vickers I-286-S, M-2950-S; ISO 11158 HV

	ISO VG	Viskositeetti @ 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	Viskositeetti @ 100 °C (mm <sup>2</sup> /s)	VI	Jähmepiste °C	Leimahduspiste °C
Arctic	15	15	5,5	375	-60	110
Polar	22	22	7,5	375	-60	110
Deck	32	36	8,9	245	-54	170

### Teboil Hydraulic Eco 15, 32, 46

Synteettisistä estereistä valmistettuja biologisesti hajoavia hydrauliikkaöljyjä. Erinomaiset kylmäjuoksevuusominaisuudet mahdollistavat riskittömän käynnistuksen kovillakin pakkasilla. Korkea viskositeetti-indeksi ja erittäin hyvä leikkauskestävyys varmistavat varman voitelun korkeissakin käyttölämpötiloissa. Ne ovat tarkoitettu erityisesti pohjavesi-, ranta- ja puistoalueilla toimiviin vaativiin korkeapainejärjestelmiin. Biohajoavuus on yli 70 % (OECD 301 B).

**Suorituskyky:** SS 155435 AAV Environmentally acceptable; ISO 15380 L-HEES

	ISO VG	Viskositeetti @ 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	Viskositeetti @ 100 °C (mm <sup>2</sup> /s)	VI	Jähmepiste °C	Leimahduspiste °C
15	15	15	4,0	170	-60	200
32	32	32	7,3	185	-54	200
46	46	46	9,2	205	-54	200

[15][16]

## LIITE C: PANOLIN HYDRAULINESTEIDEN OMINAISUUKSIA

### Technical data (mean values, subject to normal tolerances)

PANOLIN ATLANTIS	Product No.	Density g/cm <sup>3</sup> 15°C	Viscosity in mm <sup>2</sup> /s		Flashpoint COC in °C	Pour point in °C	Viscosity index	Iodine No.
			40°C	100°C				
5	36054	0.865	6.1	2.1	>160	-30	162	<10
15	36060	0.922	16.4	4.0	220	<-60	146	<10

### Technical data (mean values, subject to normal tolerances)

PANOLIN HLP SYNTH	Product No.	Density g/cm <sup>3</sup> 15°C	Viscosity in mm <sup>2</sup> /s		Flashpoint COC in °C	Pour point in °C	Viscosity index	Iodine No.
			40°C	100°C				
15	35020	0.920	15.6	3.9	222	<-60	151	<6
22	35030	0.920	20.5	4.5	220	-58	136	<6
32	35040	0.918	33.3	6.3	240	-58	142	<7

[23][24]

## LIITE D: HYDRAULINESTEIDEN VISKOSITEETTEJA LÄMPÖTILAN MUUTTUESSA

Viscosity Vs. Temperature calculations for hydrocarbon fluids > 2cst

Based on ASTM D341 equation:  $[\log.\log.(v+0.7)=A-B.\log.(T+273.15)]$

Product	Viscosities				Constants	
	V1 at T1	T1	V2 at T2	T2	"A"	B
Teboil Arctic Oil	15,00	40,00	5,50	100,00	5,9377	2,3480
Teboil Oil Polar	22,00	40,00	7,50	100,00	5,7515	2,2515
Teboil Deck Oil	36,00	40,00	8,90	100,00	6,8227	2,6558
Teboil Hydraulic Eco 15	15,00	40,00	4,00	100,00	8,2819	3,2873
Teboil Hydraulic Eco 32	32,00	40,00	7,30	100,00	7,5416	2,9495
Teboil Hydraulic Eco 46	46,00	40,00	9,20	100,00	7,5802	2,9481
Panolin Atlantis 5	6,10	40,00	2,10	100,00	8,7693	3,5456
Panolin Atlantis 15	16,40	40,00	4,00	100,00	8,7301	3,4615
Panolin HLP Synth 15	15,60	40,00	3,90	100,00	8,6796	3,4443
Panolin HLP Synth 22	20,50	40,00	4,50	100,00	8,8997	3,5168
Panolin HLP Synth 32	33,30	40,00	6,30	100,00	8,6496	3,3916

Viskositeettien ohjeavot V1 ja V2 nesteille on saatu liitteiden B ja C taulukoista.

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Viscosities	0	5	10	20	30	40	50
Teboil Arctic Oil	43,80	37,29	32,03	24,21	18,83	15,00	12,21
Teboil Oil Polar	69,22	58,29	49,55	36,73	28,06	22,00	17,64
Teboil Deck Oil	176,84	138,46	110,08	72,48	50,06	36,00	26,80
Teboil Hydraulic Eco 15	74,14	57,60	45,56	29,89	20,71	15,00	11,28
Teboil Hydraulic Eco 32	183,98	140,02	108,54	68,49	45,72	32,00	23,31
Teboil Hydraulic Eco 46	313,73	232,36	175,63	105,92	67,99	46,00	32,53
Panolin Atlantis 5	21,77	17,81	14,78	10,57	7,89	6,10	4,86
Panolin Atlantis 15	94,54	71,48	55,18	34,74	23,27	16,40	12,06
Panolin HLP Synth 15	86,57	65,87	51,15	32,53	21,98	15,60	11,54
Panolin HLP Synth 22	138,86	102,15	76,93	46,38	29,97	20,50	14,70
Panolin HLP Synth 32	271,24	193,93	142,18	81,65	50,55	33,30	23,10

[27]



## LIITE E: KUVAAJA LÄMPÖTILAN VAIKUTUKSESTA ERI HYDRAULINESTEIDEN VISKOSITEETTEIHIN

