

Hallinnoija
Alice Karlsson
Danial Farvardini
Laura Malek
Sähköpostiosoite
Alice.karlsson@afry.com

Päivämäärä
2024-03-14

Asiakas
Skyborn uusiutuvat energialähteet

Polargrund Offshore

Tekninen kuvaus

Hajautettu vedyntuotanto



Sisällysluettelo

1.	Johdanto	5
1.1	Hankkeen yhteenveto	5
1.2	Suunnittelu ja asettelu	6
2.	Prosessin kuvaus	7
2.1	Vedyn tuotanto	7
2.2	Muuntaja ja tasasuuntaaja	7
2.3	Vedenkäsittely	8
2.3.1	Käänteisosmoosi	8
2.3.2	Tyhjiötislaus	8
2.3.3	Ionivaihtokalvo	8
2.4	Elektrolyysi	9
2.4.1	PEM	9
2.4.2	Alkalielektrolyysi	10
2.4.3	Elektrolyysitekniikoiden vertailu	10
2.4.4	Sähkönjakelu	11
2.5	Kompressio	12
2.5.1	Kompressorin alusta	12
2.6	Kaasun puhdistus	13
2.7	Tukijärjestelmät	14
2.7.1	Jäähdytysjärjestelmä	14
2.7.2	Typpikaasun syöttö	15
2.7.3	Paineilma	15
2.8	Rakennus	15
3.	Kulutus, päästöt ja tuotanto	17
3.1	Vedenkulutus	17
3.2	Kemialliset tuotteet	17
3.3	Päästöt veteen ja ilmaan	18
3.3.1	Päästöt ilmaan	18
3.3.2	Päästö veteen	18
3.4	Yhteenveto vesi, vety ja happi	19
4.	Putkistojärjestelmä	21
4.1	Tekninen suunnittelu	21
4.1.1	Yleisesti ottaen	21
4.1.2	Tekniset eritelmät ja mitoitus	22



4.1.3	Putkiston materiaali.....	23
4.1.4	Putkistojen suojelu.....	23
4.1.5	Eroosiosuojaus ja tuki epätasaisessa syvyydessä.	24
4.1.6	Olemassa olevan merenpohjan infrastruktuurin ylittäminen	24
4.2	Materiaalilogistiikka.....	24
4.3	Putkien asennus.....	25
4.4	Putkiston kunnossapito.....	27
4.4.1	Putkien sisäinen tarkastus	27
4.4.2	Ulkopuolisten putkien tarkastus	27
4.5	Tietoliikennekaapeli.....	27
4.1	Kaasun- ja palonilmaisujärjestelmät ja hätäsulku.....	29
5.	Rakentaminen, käyttö ja käytöstä poistaminen	30
5.1	Asennus.....	30
5.2	Käyttö.....	30
5.3	Käytöstäpoisto	30
6.	Kunnossapito ja palvelut.....	31
6.1	Yleinen kunnossapito.....	31
6.2	Nosturi turbiinalustalla perustuksen ja tornin välissä	32



Määritelmät ja terminologia

Alkalielektrolyysi	Elektrolyysityyppi, jossa elektrolyytinä käytetään nestemäistä lipeää.
CTV	Miehistönkuljetusalus
Elektrodi	Elektronijohtimet, jotka luovat sähkökontaktin elektrolyytin välille. Positiivista elektrodia kutsutaan anodiksi ja negatiivista elektrodia katodiksi.
Elektrolyysarit	Prosessiyksikkö, jossa vetyä ja happea tuotetaan jakamalla vesimolekyyliä.
Elektrolyytti	Ioneja johtava aine, joka mahdollistaa kemiallisen reaktion. Käytetään elektrolyysereissä.
Jäähdytysvesi	Jäähdytykseen käytetty vesi eri prosessivaiheissa.
EMP	Protoninvaihtokalvo. Elektrolyysityyppi, jossa on kiinteä elektrolyytti.
Prosessivesi	Tarkoittaa valmistusprosessissa käytettävää puhdistettua vettä.
Veden hylkääminen	Raakaveden käsittelyssä syntyvät jäännökset.
Raakavesi	Tarkoittaa prosessivedeksi ja rejektivedeksi puhdistettua vettä.
SOV	Huoltotoiminta-alue



1. Johdanto

Teknisen kuvauksen "*Hajautettu vedyntuotanto*" tarkoituksena on kuvata tekniset edellytykset vedyn tuotannolle Polargrundin merituulipuistossa. Se sisältää kuvauksen komponenteista, mukaan lukien putkistojärjestelmät ja niihin liittyvä infrastruktuuri, joita tarvitaan vedyn tuotantoon kussakin tuuliturbiinissa. Siinä kuvataan myös komponentit ja menetelmät, joita voidaan käyttää ehdotetun toiminnan rakentamisen, käytön ja käytöstä poistamisen aikana.

Asiakirja on liite tuulipuiston tekniseen kuvaukseen, joka puolestaan sisältää kuvauksen tuulipuiston pohjapiirroksesta, tuulivoimaloiden, perustusten, sähköaseman ja muuntamon suunnittelusta.

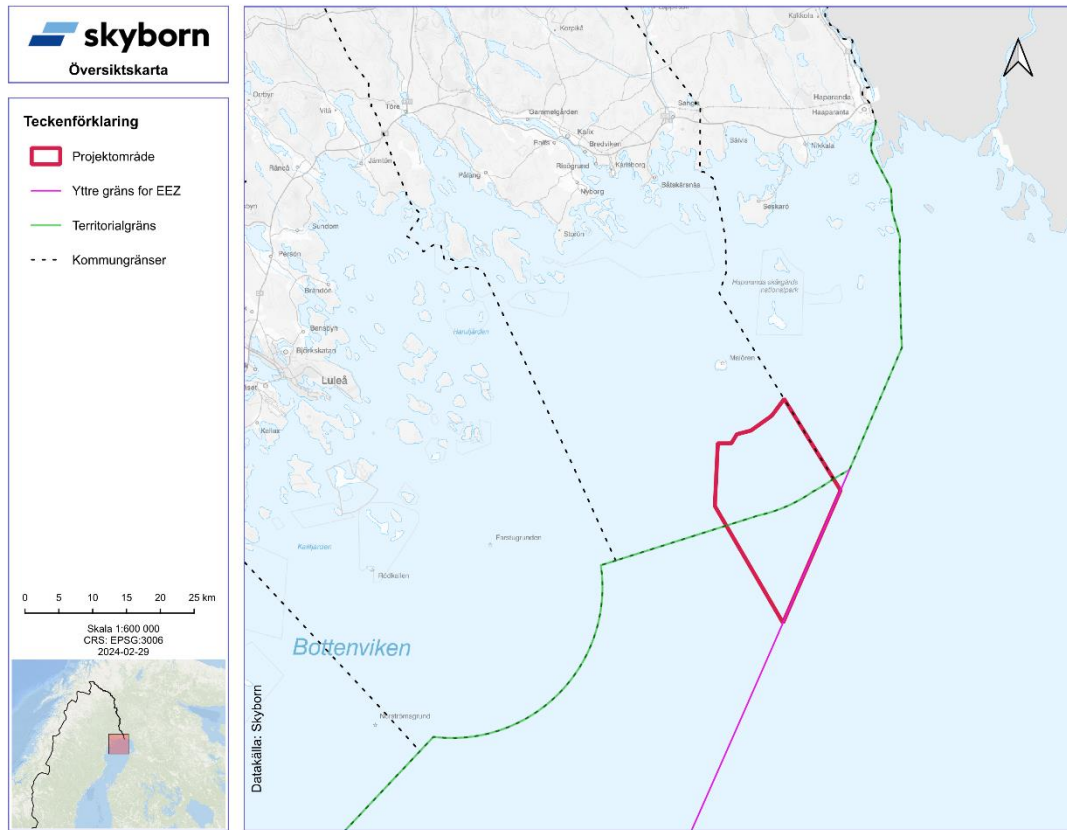
Tekniset kuvaukset muodostavat perustan tuulipuiston ympäristöarvioinnille.

1.1 Hankkeen yhteenveto

Tässä teknisessä kuvauksessa kuvataan toimintamalli, jossa vetyä tuotetaan tuulipuistossa ja viedään maalle.

Voi myös olla mahdollista suunnitella puiston osia sähköön vientiä maalle ja osia vedyn vientiä varten. Toisin sanoen sekä sähköenergiaa että vetyä tuotetaan puiston eri osissa ja viedään maalle vientilinjoissa ja vientiputkissa. Polargrundin tuulipuistossa vedyn tuotanto on suunniteltu hajautetuksi. Hajautettu järjestelmä tarkoittaa, että vetyä tuottavat elektrolyysarit asennetaan jokaisen turbiinin yhteyteen. Vety johdetaan elektrolyysereistä putkistoverkoston kautta yhteen tai useampaan keräyspisteeseen ja kuljetetaan lopulta putkistolla rannikolle.

Polargrundin tuulipuiston on suunniteltu käsittävän 120 tuulivoimalaa, joiden kokonaiskorkeus on enintään 350 metriä ja roottorin halkaisija noin 330 metriä. Suunnitelmien mukaan sen asennettu kapasiteetti on noin 3 000 MW, ja sen avulla voidaan tuottaa vuosittain noin 9-10 TWh uusiutuvaa sähköä. Polargrundin tuulipuiston potentiaalisen vedyntuotannon arvioidaan olevan noin 400-700 kg vetyä tunnissa turbiinia kohti (turbiinin nimellistehon ollessa 20-30 MW). Näin ollen vedyn kokonaistuotanto on noin 50-70 tonnia tunnissa noin 120 turbiinin perusteella. Suunniteltu jopa 10 TWh:n sähköntuotanto merkitsisi noin 200 000 tonnin vuotuista vedyntuotantoa. Vuotuisena vedyntuotantona tämä vastaa noin 20-25 prosenttia Ruotsin energiaviraston ehdotuksessa kansalliseksi vetystrategiaksi vuodelle 2030 esitetyistä suunnittelutavoitteista (Ruotsin energiavirasto, 2021). Polaarinen sijainti Pohjanlahdella tarkoittaa, että toiminta voidaan liittää rannikkoa pitkin mahdollisesti perustettaviin laajamittaisiin vetyputkistoihin ja siten saavuttaa laajempi maantieteellinen alue.



Kuva 1 - Yleiskuva hankealueesta.

1.2 Suunnittelu ja asettelu

Tuulivoimaloiden sijainnit suunnitellaan yksityiskohtaisesti optimaalisen toiminnan varmistamiseksi seuraavien seikkojen perusteella, mukaan lukien tuulivoimaloiden mitat, mahdolliset vanavedenkehän vaikutukset ja tuulivoimaloiden väliset etäisyydet sekä turbiinit. Tuulipuiston muita teknisiä näkökohtia, kuten sijoittelua ja perustustyyppejä, kuvataan tuulipuiston teknisessä kuvauksessa (Skyborn, 2024, Technical description Polargrund offshore, lupahakemuksen liite C).

Esimerkkejä sisäisten ja ulkoisten vetyputkistojen suunnittelusta esitetään myöhemmin. tämän asiakirjan osassa. Putkiverkon varsinainen suunnittelu kehitetään myöhemmin tutkimusvaiheessa.

2. Prosessin kuvaus

Tässä luvussa kuvataan erilaisia teknologioita, joita pidetään tällä hetkellä merkityksellisinä vedyn tuotannossa ja muissa siihen liittyvissä osajärjestelmissä, kuten muuntamisessa ja rektifioinnissa, vedenkäsittelyssä, paineistuksessa ja kaasun puhdistuksessa.

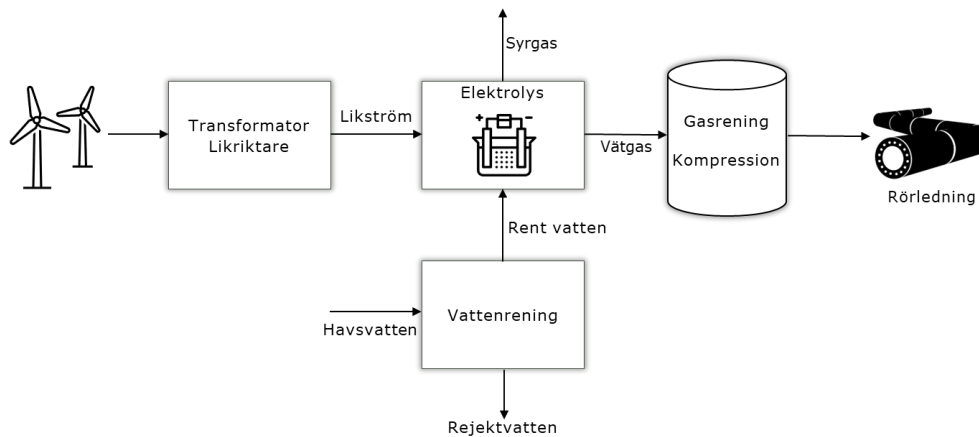
2.1 Vedyn tuotanto

Vetyä tuotetaan hajautetusti elektrolyysin avulla suunnitellun tuulipuiston valituissa turbiinalustoissa. Kyseisten tuulivoimaloiden tuottama sähkö käytetään suoraan elektrolyyserien ja muiden vedyntuotantoon liittyvien laitteiden käyttämiseen. Tämä tarkoittaa, että näissä erityisvoimaloissa ei ole sähköjakausta tai verkkoyhteyttä rannikolle tai rannikolta.

Vedyntuotantolaitteet sijoitetaan pääasiassa valittujen turbiinien lavojen päälle, mutta joitakin laitteita, kuten elektrolyysirit, voidaan sijoittaa myös näiden lavojen turbiinitorneihin.

Samalla osaa tuulivoimaloista voidaan käyttää sähköntuotantoon. Vielä ei ole päätetty, kuinka monta tuulivoimalaa kuhunkin tarkoitukseen käytetään.

Vedyn tuottaminen elektrolyysillä edellyttää puhdasta vettä ja sähköä. Elektrolyysissä vesi (H_2O) jaetaan vedyksi (H_2) ja hapeksi (O_2) sähköä käyttäen. Kaasun puhdistusprosessissa vedystä poistetaan loppukäytön vaatiman laadun mukaan mahdollinen jäljellä oleva vesi ja happi. Riippuen vedyn paineesta elektrolyysin ulostulossa ja loppukäyttöön tarvittavista paineista, vetyä voidaan joutua tiivistämään edelleen korkeapainekompressoreilla. Tämän jälkeen vety on tarkoitus kuljettaa putkistolla maalla sijaitsevaan loppukäyttöön. Vedyn tuotantoprosessin yleinen kaavamainen kuva on esitetty seuraavassa kuvassa.



Kuva 2 - Kaavamainen kuva vetylaitoksesta.

Tuotetun vedyn määrä on verrannollinen tuuliturbiinien tuotantomalliin ja elektrolyyserien hyötysuhteeseen. Elektrolyyserien hyötysuhde on erilainen eri tehoilla ja vaihtelee teknisen käyttöajan aikana, mikä tarkoittaa, että tuotetun vedyn määrä vaihtelee.

2.2 Muuntaja ja tasasuuntaaja

Elektrolyysirit toimivat tasavirralla. Jotta järjestelmiin saataisiin tasavirtaa oikealla jännitetasolla, saatetaan tarvita tasasuuntaajia ja muuntajia sen jälkeen, kun tuulivoimalat ovat tuottaneet sähköä. Muuntajan tarkoituksena on muuttaa vaihtovirtapiirin jännitetaso järjestelmän eri sovellusten ja



laitteiden edellyttämälle tasolle. Tasasuuntaajia käytetään muuntamaan syöttöjärjestelmän jokaisesta tuuliturbiinista tuleva vaihtovirta tasasähköksi, jota kukin elektrolyyseri tarvitsee.

Turbiinityypistä ja elektrolyysityypistä riippuen muuntamisen ja tasasuuntauksen tarve optimoidaan häviöiden ja komponenttien määrän vähentämiseksi, mikä voi tarkoittaa, että tasasuuntausta ja muuntamista ei tarvita.

Muuntajien ja tasasuuntaajien lämpöhäviöiden vuoksi yksiköitä on jäähdytettävä käytön aikana. Tämä voidaan tehdä merestä saatavalla jäähdytysvedellä tai ilmajäähdytyksellä, katso kohta 2.7.1.

2.3 Vedenkäsittely

Tasavirran lisäksi tarvitaan puhdasta vettä, jotta vetyä voidaan tuottaa elektrolyysin avulla. Raakaveden otto koostuu merivedestä, mikä tarkoittaa, että vesi on puhdistettava suoloista, mineraaleista, orgaanisista yhdisteistä ja muista aineista, jotta sitä voidaan käyttää prosessivetenä elektrolyysiprosessissa. Näin vältetään elektrolyyserien vahingoittuminen ja vähennetään rappeutumiskärsiä. Sekä raakavesi että jäähdytysvesi kerätään kuhunkin säätioon.

Veden puhtausvaatimukset vaihtelevat toimittajasta ja käytetystä elektrolyysitekniikasta riippuen. Tekniikasta riippumatta tarvitaan suodatusta suurempien hiukkasten ja esineiden, kuten oksien, merilevien ja muiden mikro-organismien, poistamiseksi. Raakavedessä olevista aineista ja pitoisuuksista riippuen voidaan tarvita useita vedenkäsittelyjärjestelmien ja suodatuksen yhdistelmiä. Vedenkäsittely tuottaa rejektivettä, joka koostuu vedestä, jossa on korkeampia pitoisuuksia raakavedessä jo olevia aineita, pääasiassa suolaa. Prosessin rejektivesi johdetaan takaisin mereen kunkin turbiinilaiturin kohdalla. Tutkittavia vedenkäsittelyprosesseja ovat käänteisosmoosi, tyhjiötislaus ja ioninvaihtokalvot.

2.3.1 Käänteisosmoosi

Käänteisosmoosi on fysikaalinen erotusprosessi, jossa järjestelmään kohdistetaan painetta vesimolekyylien kuljettamiseksi suoloja läpäisemättömän kalvon läpi. Hylätyn veden määrä voi olla noin 20-50 prosenttia, joten tekniikka soveltuu sovelluksiin, joissa vettä on hyvin saatavilla. Käänteisosmoosin etuina on, että vedenkäsittelyyn kuuluu suhteellisen vähän energiaa ja että veden käsittelyyn ei käytetä kemikaaleja.

2.3.2 Tyhjiötislaus

Tyhjiötislaus on prosessi, jossa lämpöenergiaa käytetään puhtaan veden tislamiseen suolavedestä. Prosessi on suunniteltu minimoimaan lämmöntarve, koska vesi haihtuu alhaisemmassa lämpötilassa alipaineessa (tyhjiössä). Tekniikka soveltuu vaihtelevaan käyttöön, eikä siihen tarvita kemikaaleja. Järjestelmä voidaan suunnitella siten, että vedyntuotantoprosessissa tuotettua lämpöenergiaa voidaan käyttää tyhjiötislauslän lämmönlähteenä. Tyhjiötislauslän tekniikoita on kaksi erilaista, jotka ovat monivaiheinen välähdystislaus (Multi-stage flash distillation, MSF) ja monivaikutteinen tislaus (Multi-effect distillation, MED).

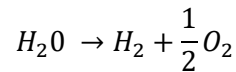
2.3.3 Ioninvaihtokalvo

Ioninvaihtokalvotekniikka on fysiokemiallinen prosessi, jossa raakavedessä olevat ei-toivotut ionit erotetaan vedessä liukenemattoman hartsin avulla. Ioninvaihtokalvot vaativat vähemmän raakavettä kuin muut tekniikat, ja siksi ne ovat edullisia silloin, kun veden saatavuus on rajallista, kuten

Polargrundissa ei ole. Rejektiveden määrä on usein noin 2-5 prosenttia raakaveden määrästä. Tekniikan haittapuolena on, että se vaatii sekä happamia että emäksisiä liuoksia.

2.4 Elektrolyysi

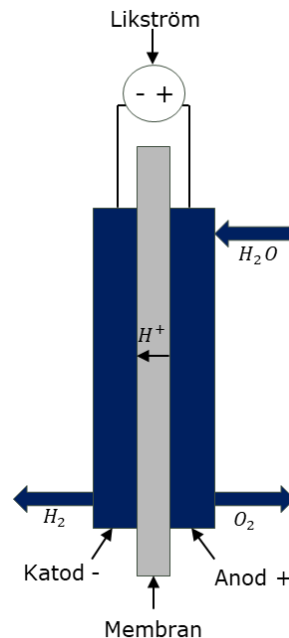
Elektrolyysin avulla tuotetaan vetyä jakamalla vesi vedyksi ja hapeksi sähkön avulla. Elektrolyysilaitte koostuu useista yksittäisistä elektrolyysikennoista, joissa varsinainen jakamisreaktio tapahtuu. Elektrolyysikennot on sijoitettu ryhmiin, joita kutsutaan pinoiksi. Nämä pinot sijoitetaan modulaarisina yksikköinä muiden prosessilaitteiden kanssa turbiinalustoille. Elektrolyysiprosessissa puhdistettu vesi (prosessivesi) hajotetaan hapeksi ja vedyksi elektrolyytin läsnä ollessa, kun siihen kytketään tasavirtaa. Stökiometrinen kokonaisreaktio on seuraava:



Vetykaasua muodostuu katodin puolella, ja se kerätään nesteen ja kaasun erottimeen johtavaan putkeen. Happi johdetaan erikseen anodin puolelta neste/kaasuerottimeen. Kaasut kerätään erikseen ja johdetaan kaasujäähdyttimiin, minkä jälkeen happi poistetaan ilmaan ja vety johdetaan kaasunpuhdistukseen. Nykyisten tekniikoiden hyötysuhde on 58-75 prosenttia. Harkittavia elektrolyysitekniikoita ovat PEM- ja emäksinen elektrolyysi, joista PEM-elektrolyysitekniikkaa tutkitaan pääasiallisena teknologiavaihtoehtona.

2.4.1 PEM

Protoninvaihtokalvo (PEM) on elektrolyysityyppi, joka koostuu elektrodeista ja kalvosta, joka johtaa protoneita ja toimii kiinteänä elektrolyytinä. PEM-elektrolyysikennon kaaviokuva on esitetty seuraavassa kuvassa. Kuva 3.



Kuva 3 - PEM-elektrolyysikennon kaaviokuva.

PEM-elektrolyysin käyttölämpötila on yleensä 60-80 °C, ja käyttöpainne voi vaihdella 1-40 baarin välillä. PEM-elektrolyyserien anodi- ja katodimateriaalit on useimmiten valmistettu platinaryhmän metalleista. Kalvo on valmistettu polymeerimateriaalista, ja se on läpäisemätön kaikille muille paitsi protoneille, joten tuotetun vedyn ja hapen puhtaus on erittäin korkea.



PEM-tekniikan tekninen etu on sen kyky toimia laajalla tehoalueella nopealla vasteajalla, mikä soveltuu suunniteltuun sovellukseen, joka sijaitsee suoraan tuuliturbiinien vieressä ja jossa sähköntuotanto vaihtelee. Piipun rakenne on myös kompakti ja vaatii hieman pienemmän pinta-alan kuin muut tekniikat. Etuna muihin elektrolyysitekniikoihin verrattuna on se, että elektrolyyttinä ei käytetä syövyttävää lipeänestettä, mikä yksinkertaistaa tiettyjä huoltotoimenpiteitä.

2.4.2 Alkalielektrolyysi

Alkalielektrolyysille on ominaista, että kaksi elektrodia upotetaan nestemäiseen emäksiseen elektrolyyttiliuokseen, kuten natriumhydroksidiin (NaOH) tai kaliumhydroksidiin (KOH), jonka konsentraatio on yleensä 20-30 %. Elektrolyytti, joka on emäksinen ja syövyttävä, ei kulu prosessissa, vaan se on katalyysaattorina osa suljettua järjestelmää.

Emäksinen elektrolyysikemio koostuu elektrodeista (anodi/katodi), elektrolyytistä ja hydroksidi-ioneja läpäisevästä kalvosta. Käyttölämpötila on usein noin 70-90 °C ja paine yleensä hieman yli ilmakehän paineen. Vetyä ja happea tuotetaan saman kokonaisreaktion mukaisesti kuin PEM-elektrolyysissä, mutta kaasujen puhtaus ja paine ovat usein hieman alhaisemmat.

Emäksinen elektrolyysi on hyväksi todettu tekniikka, joka on ollut markkinoilla jo pitkään, jopa suuressa mittakaavassa. Teknologian kehitys on optimoinut suunnittelua, ja korkea hyötysuhde on mahdollista, mutta suhteellisen kapealla toiminta-alueella ja pidemmällä vasteajalla kuin PEM-järjestelmässä.

2.4.3 Elektrolyysitekniikoiden vertailu

I Taulukko 1 tuodaan esiin alkalielektrolyysin ja PEM:n edut ja haitat. Polargrund Offshore -hankkeessa tutkitaan elektrolyysitekniikkana pääasiassa PEM:ää, koska tuulivoima on ajoittainen energialähde ja sen tuotantoprofiili on dynaaminen, mihin PEM soveltuu hyvin. Toinen etu on se, että PEM-järjestelmän rakenne on kompakti, mikä on edullista, kun turbiinialustojen tila on rajallinen.

Alkalielektrolyysin hyötysuhde on korkea, mutta sen dynamiikka on alhainen, ja se edellyttää sähkönsyötön tiettyä vakautta, johon tuuliturbiinit eivät sovellu optimaalisesti. Alkalielektrolyysin elektrolyytti vaatii hyvin suunniteltua huoltoa ja varasuunnitelmia vuodon varalta. Alkalielektrolyytin alhaisemman käyttöpaineen vuoksi voidaan tarvita myös lisäkomponentteja, kuten kaasun puhdistus ja puristus, jotka voidaan jättää pois, jos tekniikaksi valitaan PEM.



Taulukko 1 Elektrolyysitekniikoiden vertailu

	Alkalielektrolyysi	PEM-elektrolyysi
Edut	Korkeampi teknologinen kypsyyss Suhteellisen alhaiset pääomakustannukset Ei-jalot katalyytit/elektrodit Pitkän aikavälin vakaus Korkea hyötysuhde koko käyttöajan ajan	Suuri virrantiheys Laaja toiminta-alue Kompakti järjestelmärakenne Kemikaaleja ei tarvita käytön aikana Dynaaminen toiminta CAPEX:n ja tehokkuuden odotetaan paranevan nopeasti
Haitat	Kapea toiminta-alue Alhainen dynamiikka Syövyttävä elektrolyytti Edellyttää pakkaamista	Suhteellisen korkeat pääomakustannukset Alhaisempi teknologinen kypsyyss Tuntematon pitkän aikavälin kestävyys

Vetyä voi vuotaa elektrolyysereissä hyvin vähän. Vedyn vuotamisen täydellinen estäminen on kuitenkin vaikeaa, koska molekyylit ovat hyvin pieniä ja läpäisevät helposti useimmat materiaalit, mutta jotkin materiaalit ovat vastustuskykyisempiä kuin toiset. Esimerkiksi joihinkin metalleihin, kuten teräkseen, vetymolekyylien tunkeutuminen metalliristikon läpi voi vaikuttaa, jolloin hauraus ja halkeiluriski lisääntyvät. Tämä huomioon ottaen materiaalivalinnat tehdään siten, että vuotoja rajoitetaan (4.1.3 Putkiston materiaali), ja turvajärjestelmät suunnitellaan siten, että vuotojen aiheuttamat riskit havaitaan ja rajoitetaan.

Jos elektrolyysit huolletaan tai pysäytetään hätätapauksessa, käytetään tyyppikaasujärjestelmää inertoimaan yksiköt ja estämään räjähdyskelpoisen koostumuksen kertyminen vedyn ja ilman tai hapen välille.

2.4.4 Sähkönjakelu

Vedyntuotannon energiankulutus on pääasiassa elektrolyysirakennusten sähkön tarve, mutta myös osajärjestelmät, kuten kompressorit, vesipumput, vedenpuhdistus ja kaasunpuhdistus, muodostavat osan vedyntuotantojärjestelmien energiankulutuksesta. Polargrund Offshore -yhtiön vedyntuotantojärjestelmien asennettu kokonaiskapasiteetti on enintään noin 3 GW tuulivoimaloiden asennetun kokonaiskapasiteetin suuruinen. Koska vedyntuotantojärjestelmät sijoitetaan kunkin yksittäisen tuulivoimalan yhteyteen, kunkin yksittäisen vedyntuotantojärjestelmän kapasiteetti on enintään 20-30 MW kunkin yksittäisen tuulivoimalan asennetusta kapasiteetista. Vedyntuotantojärjestelmän energiankulutus on ajan mittaan verrannollinen tuulivoimaloiden tuotantomalliin.

Elektrolysaattori on sellaisenaan komponentti, jonka hyötysuhde heikkenee sen elinkaaren aikana. Elektrolysaattoripinojen hyötysuhteen heikkeneminen johtaa lämpöhäviöiden asteittaiseen kasvuun yli teknisen käyttöajan. Tämä tarkoittaa, että yhä suurempi osa energiankulutuksesta haihtuu vähitellen lämpönä teknisen käyttöajan lopussa. Arvioiden mukaan jopa noin 25 prosenttia vedyntuotantojärjestelmän asennetusta tehosta haihtuu lämpöhäviönä teknisen käyttöajan alussa ja kasvaa jopa 40 prosenttiin pinojen teknisen käyttöajan lopussa. Piiput voidaan siis joutua vaihtamaan 8-10 vuoden kuluttua, jotta välttyään liiallisilta lämpöhäviöiltä.



2.5 Kompressio

Koska vedyn tiheys on alhainen, kaasu voidaan joutua paineistamaan kompressoreilla ennen sen syöttämistä putkistoon. Jotkin elektrolyysityypit voivat tuottaa korkeamman kaasun lähtöpaineen, jolloin lisäkompressiotarve jää mahdollisimman pieneksi, mutta tämä riippuu putkistojärjestelmän rakenteesta ja loppukäytön painevaatimuksista. Tarvittava painetaso riippuu pääasiassa putkistojärjestelmän mitoista ja pituudesta. Tämä johtuu siitä, että sekä pituus että ulottuvuus vaikuttavat siihen, kuinka suuri kitkakerroin putkessa on, mikä aiheuttaa painehäviöitä, jotka puolestaan vaikuttavat virtausnopeuteen.

Kun vetyä paineistetaan, vedyn lämpötila nousee. Siksi vetyä on jäähdytettävä lämmönvaihtimella jokaisen paineistusvaiheen jälkeen, jotta järjestelmän komponentit ja prosessin osat eivät vahingoittuisi. Kun kaasu jäähdytetään, vetyvirtauksessa oleva jäännösvesi tiivistyy, tiivistetty vesi kerätään poistoastioihin ja kierrätetään sitten takaisin vedenkäsittelyyksikköön. Paineistus voi siis olla tarpeen, jotta vesipitoisuusvaatimukset täyttyvät maalla tapahtuvassa loppukäytössä. Lisäkompressiota voidaan tarvita myös sisäisen putkistojärjestelmän ja hankealueen rajalla olevan vientiputkiston välisessä liitoksessa.

Yleisimmät vedyn kompressorityypit ovat kalvo- ja mäntäkompressorit. Molemmissa käytetään sähköä kaasun paineen nostamiseen, mikä pienentää kaasun tilavuutta. Usein käytetään pientä kaasun puskurisäiliötä, jolla varmistetaan kaasun tasainen virtaus kompressoreihin ja vältetään siten toimintahäiriöt. Tämä voi olla tarpeen, jos puristus tapahtuu elektrolyyserien vieressä, mutta ei silloin, kun puristus tapahtuu vientiputkiston liitoskohdassa ja liitosputkisto toimii puskurina. Puskurisäiliön koko voi vastata muutamaa minuuttia elektrolyyserien enimmäistuotannosta.

2.5.1 Kompressorin alusta

Kaikki kompressorit sijoitetaan alustalle. Tuulipuiston sisällä saatetaan tarvita kompressorialusta (joka vastaa kooltaan suunnilleen offshore-aseman alustaa). Kunkin hajautetun elektrolyyserin lähtöpaineeksi kussakin voimalassa arvioidaan 35 baaria. Taulukko 2 esitetään esimerkkejä kompressorialustan perustamisvaatimuksista ja merenpohjaan kosketuksissa olevien alustan osien mitoista, kun se perustetaan ristikkoperustoilla.

Taulukko 2. Kompressorialustan mitat ja pohjan vaatimus

Numero	1 alusta
Alustan mitat (L x S x K)	30 x 30 x 20 [m]
Jalkojen lukumäärä	4 kpl
Jalan halkaisija	Noin 6 metriä jalkaa kohti
Perustuksen halkaisija eroosiosuojauksella	4 x 34 [m]
Pohjavaatimus perustusta kohti	120-170 [m ²]
Pohjavaatimus perustusta kohti, mukaan lukien eroosiosuojaus.	25 500 [m ²]



Kuva 4 - Esimerkki kompressorialustasta (lähde [WPD](#)).

2.6 Kaasun puhdistus

Riippuen elektrolysaattorin tyypistä ja kaasun puhtausvaatimuksista maalla tapahtuvaa loppukäyttöä varten vetyä voidaan joutua puhdistamaan ennen sen johtamista putkistoon ja kompressoriin. Tärkeimmät epäpuhtaudet, joita voi esiintyä, ovat vesi ja pienet määrät happea. Jos käytetään emäksistä elektrolyysiä, kaasuun voi jäädä myös lipeäjäämiä, jotka on poistettava. Laadultaan heikempi puhdistamaton vety voi aiheuttaa materiaalien korroosioriskejä, mutta myös heikentää hyötysuhdetta, koska järjestelmään kertyy vettä.

Erittäin korkean kaasupuhtauden (> 99,999 tilavuusprosenttia) saavuttamiseksi happi ja jäännöskosteus voidaan poistaa katalyyttisen hapenpoistopedin ja adsorptiojärjestelmän avulla. Happi poistetaan eksotermisessä reaktiossa, jossa vety reagoi jäännöshapen kanssa muodostaen vettä.

Kosteus voidaan erottaa kaksoistornikuivaimella, jossa vetykaasu kulkee adsorbenttivuoteen yli. Molemmat tornit toimivat vuorotellen, koska adsorbenttien kapasiteetti on rajallinen ja niitä on regeneroitava, jotta ne voivat adsorboida lisää kosteutta. Kaasun kuivauksessa syntyvä vesilauhde voidaan kerätä ja kierrättää raakaveden kanssa takaisin vedenkäsittelylaitokseen tai palauttaa mereen.

Tarvittaessa kaasunpuhdistuslaitteistot asennetaan elektrolyyserien yhteyteen turbiinalustojen päälle tai kompressorien yhteyteen kompressorialustalle.



2.7 Tukijärjestelmät

Tärkeimmät vedyntuotantoon tarvittavat tukijärjestelmät ovat jäähdytysvesi, typpikaasu ja paineilma.

2.7.1 Jäähdytysjärjestelmä

Jäähdytystä tarvitaan useissa kuvatuissa prosessivaiheissa. Suuri osa elektrolyyserien kapasiteetista menetetään lämpöhäviöiden muodossa, jotka on jäähdytettävä elektrolyyserin käyttölämpötilan ylläpitämiseksi.

Jokaisella turbiinalustalla on erillinen jäähdytysjärjestelmä. Prosessivaiheet, jotka tuottavat lämpöä ja tarvitsevat jäähdytystä itse elektrolyysipinon lisäksi, ovat tasaus ja muuntaminen, kaasun jäähdytys, kaasun puhdistus ja mahdollisesti kompressio. Vetyjärjestelmän jäähdyttämiseen voidaan käyttää ilmajäähdytystä, vesijäähdytystä ja/tai passiivista vesijäähdytystä. Koko vetyjärjestelmää ei tarvitse jäähdyttää samalla tekniikalla, vaan se voi olla erilainen järjestelmän eri prosessivaiheissa.

Ilmajäähdytys saadaan aikaan tuulettimilla, jotka poistavat lämpöä lämmitetystä yksiköstä. Tämä ratkaisu on energiaintensiivisempi kuin vesijäähdytys. Ilma- ja vesijäähdytystä voidaan yhdistää, jolloin ilmajäähdytystä voidaan käyttää prosessiosiin, joiden jäähdytystarve on pienempi.

Vesipohjaisessa jäähdytyksessä käytetään ensisijaista suljettua jäähdytysjärjestelmää yhdessä toissijaisen järjestelmän kanssa. Ensisijainen järjestelmä on yleensä suljettu järjestelmä, jossa jäähdytysliuos kiertää jäähdytettävän komponentin ja lämmönvaihtimen välillä. Lämmönvaihdin puolestaan jäähdytetään toissijaisella järjestelmällä, jossa käytetään merivettä. Merivesi otetaan yhden tai useamman vedenottoaukon kautta ja suodatetaan hiekasta ja muista hiukkasista. Lämmönvaihtimessa kiertämisen jälkeen lämmitetty merivesi palautetaan mereen. Poistetun veden lämpötila on arviolta noin 15 astetta korkeampi kuin vedenottoon käytetyn meriveden lämpötila. Putkistoissa voi olla järjestelmiä, joilla estetään biologista likaantumista. Jäähdytysveden käyttöä koskeva alustava määrälaskelma on esitetty Taulukko 3 ja Taulukko 4 kunkin turbiinin ja koko puiston osalta tuntitasolla ja vuositasolla.

Passiivinen vesijäähdytys saavutetaan sijoittamalla suljetun kierron lämmönsiirtoyksikkö suoraan mereen, jossa se jäähdytetään meriveden luonnollisen konvektion avulla. Suljetun silmukan virtaus on jaettu useisiin pienempiin putkiin, jotta meriveden pinta-ala kasvaisi ja lämmönvaihto tehostuisi. Mitä alhaisempi lämpötila ja suurempi veden virtausnopeus, sitä parempi jäähdytys saadaan aikaan. Tämän tekniikan etuna on se, että se vaatii vähemmän pumppausta eikä vie yhtä paljon tilaa laivalla kuin perinteinen vesijäähdytys, mutta haittapuolena on se, että se on uusi tekniikka. Tämän tekniikan edellyttämä pohjapinta-ala olisi noin 5000 m² koko puiston jäähdyttämiseen eli yksi yksikkö turbiinia kohti.



Kuva 5 - Esimerkkikuva passiivisesta vesijäähdytysmoduulista (Lähde: [Future technology](#)).

2.7.2 Typpikaasun syöttö

Vety on räjähdysaltis laajalla pitoisuusalueella ilmassa ilman happipitoisuuden vuoksi, mutta se ei reagoi typen kanssa. Typpikaasua käytetään siksi turvallisen ympäristön varmistamiseksi useissa vedyntuotannon prosessiosissa, pääasiassa elektrolyyserien ja mahdollisesti kompressorien käynnistys- ja pysäytysvaiheessa. Tekniikan valinnasta riippuen typpeä saatetaan tarvita myös kompressoreissa käytön aikana järjestelmän tiivistämiseksi.

Typpikaasua kuljetetaan ja varastoidaan nestemäisessä muodossa jokaisella alustalla vetytoimituksia varten. Inertisoinnin jälkeen typpikaasu poistetaan ilmakehään poistoputkien kautta. Ilma koostuu suurelta osin tpeestä (78 %), joten typpipäästöillä ei ole vaikutusta normaalissa ilmakehän paineessa ja avoimessa tilassa.

2.7.3 Paineilma

Paineilmaa käytetään pneumaattisten laitteiden, kuten säätöventtiilien ja muiden toimilaitteiden käyttämiseen elektrolyysiprosessin ja siihen liittyvien järjestelmien useissa eri osissa. Paineilmajärjestelmään kuuluu sähkökäyttöisiä ilmakompressoreita, jotka ovat yhteydessä muihin vedyntuotantoprosessin komponentteihin.

2.8 Rakennus

Vedyntuotantojärjestelmät asennetaan pääasiassa modulaarisina konttiratkaisuina turbiinalustojen päälle (ks. myös jakso 6.1 Yleinen kunnossapito). Elektrolysaattoripinot ja oheislaitteet asennetaan erillisiin konttimoduuleihin, joiden vakiokoko on 20 tai 40 jalkaa. Riippuen siitä, mitä prosessilaitteita katsotaan tarpeelliseksi asentaa turbiinalustojen päälle yksityiskohtaisen suunnittelun aikana, konttien määrä, muut laitteet ja niiden rakenne voivat vaihdella.



Kuva 6 - Esimerkki turbiinalustan pohjapiirroksista, jossa vedyn tuotanto tapahtuu (Lähde: [AquaVentus Förderverein e. V. / Jakob Martens Studios](#)).

Rakenteet, jotka on rakennettu käsittelemään vetyä millään tavoin, varustetaan kaasunilmaisimilla ja kaasuhälyttimillä, ja elektrolyysit voidaan myös kytkeä niin, että ne sulkeutuvat automaattisesti, jos onnettomuus johtaa suureen vuotoon. Suljettuihin tiloihin asennetaan tarvittaessa ilmanvaihtojärjestelmiä kaasun poistamiseksi, jos suuria pitoisuuksia kerääntyy, mikä yhdessä korkealla sijaitsevien tuuletusaukkojen ja vedyn alhaisen tiheyden kanssa mahdollistaa kaasun nopean nousun ylöspäin ja ulos näistä tiloista. Tämä minimoi räjähdyskelpoisten pitoisuuksien syntymisen riskin. Vedyn ja hapen tuuletusputket sijoitetaan riittävän etäälle tuuletusaukoista, jotta vety tai happi ei pääse kiertämään takaisin tiloihin. Suurin osa turbiinalustan rakennuksista koostuu todennäköisesti konttipohjaisista moduuleista.

Turvajärjestelmien, turvaetäisyyksien ja turvatoimenpiteiden suunnittelu perustuu riskianalyysiin, sammutusvesitutkimuksiin ja simulaatioihin, joissa analysoidaan erilaisia vaaratilanteita.



3. Kulutus, päästöt ja tuotanto

Tässä luvussa kuvataan odotettavissa oleva vedenkulutus, kemikaalien käsittely sekä päästöt veteen ja ilmaan. Sähkön, vedyn, hapen, rejektiveden, raakaveden ja jäähdytysveden alustavat määrälaskelmat on esitetty Taulukko 3 ja Taulukko 4 kunkin turbiinin ja koko puiston osalta tuntitasolla ja vuositasolla.

3.1 Vedenkulutus

Yhden kilogramman vedyn tuottaminen elektrolyysillä kuluttaa noin 9-10 kg puhdasta prosessivettä. Vaaditun puhtausasteen saavuttamiseksi tarvitaan kuitenkin suurempi vesivirta kuin mitä kuluu, jolloin vedenkäsittelyssä meriveden suolat, mineraalit ja orgaaniset yhdisteet tiivistetään rejektivedeksi, joka päästetään takaisin mereen. Raakaveden käyttöä koskeva alustava määrälaskelma on esitetty Taulukko 3 ja Taulukko 4 kunkin turbiinin ja koko laitoksen osalta tuntitasolla ja vuositasolla.

Elektrolyysiprosessissa käytettävän raakaveden lisäksi käytetään myös jäähdytysvettä lämpöahiöiden poistamiseen. Jäähdytysvesivirta lämmitetään noin 15 asteella ennen mereen palauttamista. Jäähdytystarve on suurin vedyntuotantojärjestelmien teknisen käyttöiän lopussa. Jäähdytysveden käyttöä koskeva alustava määrälaskelma on esitetty Taulukko 3 ja Taulukko 4. Koska vedyn tuotanto on verrannollinen tuuliturbiinien tuotantomalliin ja elektrolyyserien tehokkuuteen, vedenkulutus vaihtelee vastaavasti.

3.2 Kemialliset tuotteet

Kemiallisten tuotteiden täyttä tarvetta ei vielä tässä vaiheessa tiedetä. Sen vuoksi kaikki tai osa näistä jäljempänä esitetyistä kemikaaleista voi tulla tarpeettomiksi hankkeen myöhemmässä vaiheessa.

Jäähdytysjärjestelmien suunnittelusta riippuen jäähdytysmediaa saatetaan tarvita, jotta minimoidaan jäätymisriski, joka voi esiintyä kylmään ilmastoon sijoitettaessa. Tällöin kaikki jäähdytysmedia on suljettuihin jäähdytyspiireihin, eikä prosessissa kuluteta jäähdytysmediaa. Jäähdytysjärjestelmät on suunniteltu siten, että jäähdytysmedian vuotoriski on mahdollisimman pieni. Jäähdytysnesteet koostuvat yleensä glykolipohjaisista seoksista vedessä. Jäähdytysaineiden määrät riippuvat jäähdytysjärjestelmien teknisestä suunnittelusta, ja ne määritetään siksi myöhemmin yksityiskohtaisen suunnittelun aikana.

Joihinkin vedenkäsittelytekniikoihin liittyy emäksisten ja happamien liuosten käsittelyä. Ioninvaihtomembraanit vaativat jatkuvaa happamien ja emäksisten liuosten syöttöä ioninvaihtimen regeneroimiseksi. Käänteisosmoosi tarvitsee happamia ja emäksisiä liuoksia muutaman kerran vuodessa, jotta kalvoille tietyn toiminta-ajan jälkeen muodostunut kalkki saadaan pestyä pois. Kalvot voidaan joko puhdistaa paikan päällä tai vaihtaa ja lähettää puhdistettavaksi. Jos kalvot vaihdetaan, lavalla ei tarvita kemikaaleja, ja jos kalvot puhdistetaan paikan päällä, lavalla voidaan joutua varastoimaan 80-400 kg:n määrä kemikaaleja. Lipeä (NaOH) ja sitruunahappo ovat esimerkkejä pesuliuosten aktiivisista aineista. Nämä ovat heikkoja liuoksia, joissa kemikaaleja on muutama painoprosentti. Näitä vedenkäsittelytekniikoita kuvataan luvussa 2.3. Jos valitaan tekniikoita, joihin liittyy happamien ja emäksisten liuosten käsittelyä, se tehdään mahdollisimman paljon ympäristöä säästäen.



Jos elektrolyysiteknikaksi valitaan emäksinen elektrolyysi, elektrolyysiprosessissa käsitellään lipeää. Lipeää ei kuluteta prosessissa, mutta sitä voidaan joutua täydentämään, koska järjestelmästä häviää pieniä määriä lipeää tuotetun kostean kaasun mukana. Kaikki lipeän käsittely suoritetaan vakiintuneiden huoltomenetelmien mukaisesti, jolloin vuotojen riski ja mahdolliset vaikutukset ympäristöön ovat mahdollisimman vähäiset.

Järjestelmän liikkuvat osat saattavat tarvita voitelu- ja/tai jäähdytysöljyä. Jos öljyvuodon vaara on olemassa, asennetaan erilaisia passiivisia ja aktiivisia järjestelmiä sen varmistamiseksi, ettei öljyä pääse vuotamaan ympäristöön. Tällaisia järjestelmiä voivat olla esimerkiksi öljynerottimet, vuotojen keräysastiat ja erityyppiset hälytyslaitteet.

3.3 Päästöt veteen ja ilmaan

3.3.1 Päästöt ilmaan

Jokaista vetykiloa kohden tuotetaan noin 8 kg happea. Elektrolysaattoreissa tuotettu happi johdetaan ilmaan elektrolysaattorijärjestelmien vieressä olevien ilmanvaihtoputkien kautta noin 40 asteen lämpötilassa. Tuotetun hapen määrä on vedyntuotannon tavoin verrannollinen tuuliturbiinien tuotantomalliin ja elektrolyyserien käyttöikänsä. Ilmakehään vapautuvan hapen vuotuinen kokonaismäärä on esitetty Taulukko 4.

Typrikaasua käytetään puhdistamaan järjestelmä ilmasta, hapesta ja vedystä sisäisen ympäristön turvallisuuden valvomiseksi huollon ja hätäsulkemisen aikana. Tämän jälkeen kaasu poistetaan ilmakehään poistoputkien kautta. Kunkin huoltoseisokin aikana käytettävän typrikaasun määrän arvioidaan olevan noin 2 000 Nm³ (2 500,7 kg) elektrolyyserijärjestelmää kohti. Typen käyttötiheys järjestelmässä riippuu käyttötavoista sekä suunnitelluista ja suunnittelemattomista huolloista.

Vedyn poisto tai soihdutus on olennainen osa vedyn tuotantolaitosten turvajärjestelmää. Se suoritetaan suunnitellun tai suunnittelemattoman huollon ja hätäseisokin aikana. Soihdutuksessa vety sytytetään ulostuloaukossa, kun taas kaasunpoistossa vety päästetään suoraan ilmakehään ilman, että sitä sytytetään. Kyseisen järjestelmän koon ja laajuuden vuoksi vedyn soihduttamista ei pidetä tarpeellisena. Sen sijaan hyvin suunniteltua ilmanvaihtojärjestelmää pidetään riittävänä turvallisuuden varmistamiseksi.

Komponentit ja prosessiyksiköt valmistetaan siten, että vuotoriski on minimoitu, mutta järjestelmässä voi silti esiintyä pieniä vuotoja. Jos vety pääsee ulos tai vuotaa, se nousee nopeasti ilmakehään alhaisen tiheydensä vuoksi, minkä vuoksi vety ei kerääny maanpinnan tasolle.

3.3.2 Päästö veteen

Elektrolyysereissä mädätetty prosessivesi käsitellään ennen käyttöä, jolloin syntyy rejektivettä, joka palautetaan mereen. Rejektivesi sisältää enemmän suoloja, mineraaleja ja orgaanisia yhdisteitä kuin raakavesi, kun se nautitaan. Useimmissa tekniikoissa tuotetaan 25-80 prosenttia puhdasta vettä prosessia varten ja 20-75 prosenttia rejektivettä, joka palautetaan mereen. Pienempi rejektiveden osuus tarkoittaa, että raakavettä tarvitaan vähemmän, mutta se tarkoittaa myös korkeampaa suolojen, mineraalien ja orgaanisten yhdisteiden pitoisuutta palautettavassa rejektivessä. Pohjanlahden suolapitoisuus on 0,3-0,5, mikä vastaa raakaveden tulopitoisuutta. Jos oletetaan, että 30 prosenttia raakavedestä muuttuu rejektivedeeksi ja loput 70 prosenttia prosessivedeksi, rejektiveden suolapitoisuus on 1-1,7 prosenttia ennen sen palauttamista meriveteen.



Jäähdytysvesi lämmitetään jäähdytysjärjestelmässä. Jäähdytysveden lämpötila nousee enintään noin 15 °C korkeammaksi kuin ympäröivän meriveden lämpötila. Prosessin rejektivesi lasketaan takaisin mereen yhdessä jäähdytysveden kanssa, ja sen osuus on noin 5 prosenttia mereen palautettavan veden kokonaismäärästä täydellä kapasiteetilla. Jäähdytys- ja rejektiveden alustava määrälaskelma on esitetty Taulukko 3 ja Taulukko 4 kunkin turbiinin ja koko laitoksen osalta tuntikohtaisesti ja vuositasolla.

3.4 Yhteenveto vesi, vety ja happi

Taulukko 3 esitetään vedyn tuotannon, vedenkulutuksen sekä ilmaan ja veteen joutuvien päästöjen odotetut enimmäisvirrat tunneittain kunkin yksittäisen turbiinin ja koko tuulipuiston osalta. Annetuissa vaihteluväleissä on otettu huomioon piippujen tekninen heikkeneminen niiden elinkaaren aikana ja erilaiset vedenkäsittelyn tekniset ratkaisut.

Lasketut virtaukset perustuvat täyteen kuormitustuntiin, kun asennettu kapasiteetti on 30 MW turbiinia ja elektrolyysijärjestelmää kohti. Arvot on laskettu 60-75 prosentin elektrolyyserin hyötysuhteella. Turbiinien asennetusta kapasiteetista riippuen laitoksen lopullinen koko voi olla alle 30 MW, koska muut prosessivaiheet ja tukipalvelut tarvitsevat energiaa.

Taulukko 3 Sähkö, vesi, vety ja happi täyttä kuormitustuntia kohti

Parametri	Turbiini- ja elektrolysaattorijärjestelmää kohti	Koko hankealue	Kommentti
Sähkönsyöttö:	30 MW	3 GW	
Vedyn tuotanto:	0,54 - 0,68 [tonnia/h]	54 - 68 [tonnia/h]	Putkistojärjestelmään
Happi:	4,3 - 5,4 [tonnia/h]	430 - 540 [tonnia/h]	Päästetään ilmaan 40 °C:n lämpötilassa
Hylkää vesi:	3 - 18 [m ³ /h]	300 - 1 800 [m ³ /h]	Palautetaan mereen jäähdytysveden kanssa
Raakavesi:	8 - 25 [m ³ /h]	800 - 2 500 [m ³ /h]	Meriveden saanti
Jäähdytysvesi:	400 - 700 [m ³ /h]	40 000 - 70 000 [m ³ /h]	15 °C:n lämpötilan nousu meriveden imeytymisestä johtuen.

Taulukko 4 esitetään vedyn, ilma- ja vesipäästöjen sekä vedenkulutuksen odotetut määrät keskimääräisenä vuotena. Määrät perustuvat tuulivoimaloiden odotettuun tuotantomalliin.

Taulukko 4 Sähkö, vesi, vety ja happi vuodessa

Parametri	Turbiini- ja elektrolysaattorijärjestelmää kohti	Koko hankealue	Kommentti
Sähkönsyöttö:	0,1 TWh	10 TWh	
Vedyn tuotanto:	1,9 - 2,3 [kton/vuosi].	190 - 235 [kton/vuosi]	Putkistojärjestelmään
Happi:	15 - 19 [kton/vuosi]	1 500 - 1 900 [kton/vuosi].	Vapautetaan ilmaan 40 °C:ssa
Hylkää vesi:	11 - 64 [tuhatta m ³ /vuosi]	1 100 - 6 400 [tuhatta m ³ /vuosi].	Palautetaan mereen jäähdytysveden kanssa
Raakavesi:	28 - 85 [tuhatta m ³ /vuosi]	2 800 - 8 500 [tuhatta m ³ /vuosi].	Meriveden saanti



Jäähdytysvesi:	1,5 - 2,5 [miljoonaa m ³ /vuosi].	150 - 250 [miljoonaa m ³ /vuosi]	15 °C:n lämpötilan nousu meriveden imeytymisestä johtuen.
-----------------------	--	---	---



4. Putkistojärjestelmä

Tässä jaksossa kuvataan putkistojärjestelmä, jolla vetyä kuljetetaan Polargrund Offshore -merivoimalaitoksen jokaisen tuulivoimalan yhteydessä sijaitsevista hajautetuista elektrolyysereistä sisäisen putkistojärjestelmän kautta maihin johtaviin vientiputkistoihin. Tuulivoimapuiston teknisessä kuvauksessa esitetään tuulivoimapuiston pohjapiirustus eli se, minne hankealueella turbiinit voidaan sijoittaa, sekä esimerkkejä siitä, miltä sähköntuotannon sisäinen putkistoverkko ja muuntamot voivat näyttää (Skyborn, 2024, Technical description Polargrund Offshore, lupahakemuksen liite C). Vetyputkisto voidaan olettaa rakennettavan samalla tavalla sekä kaapeleiden/putkien reitityksen että muuntamoiden/kompressoriasemien sijainnin ja lukumäärän osalta.

Tuotettua vetyä johtavien putkistojen pohjavaatimuksen tarkka koko riippuu useista tekijöistä, erityisesti turbiinien sijainnista ja pohjaolosuhteista. ² Skenaariossa, jossa on 120 tuulivoimalaa, tuulipuiston sisäisen putkistoverkoston pohjavedenpinnan arvioidaan olevan noin 4 km (Taulukko 6).

Seuraavassa esitetään yleiskatsaus putkilinjan elinkaaren aikana toteutettaviin eri toimiin.

- Hanketta edeltävä suunnittelu
- Yksityiskohtainen suunnittelu
- Rakennusinfrastruktuuri ja logistiikka
- Putkiston asentaminen
- Testaus ja todentaminen
- Putkistojärjestelmän käyttöönotto
- Jatkuva ylläpito
- Putkistojärjestelmän käytöstä poistaminen

4.1 Tekninen suunnittelu

4.1.1 Yleisesti ottaen

Hankinnan tehnyt tekninen urakoitsija suunnittelee putkistot yksityiskohtaisesti hankkeen myöhemmässä vaiheessa. Vasta sen jälkeen määritetään putkiston rakenne ja optimaalinen putkiston sijoittelu sekä se, miten putkisto voidaan parhaiten vakauttaa merenpohjassa.

Sen varmistamiseksi, että sisäinen putkistojärjestelmä on valmistettu, asennettu ja testattu sovellettavien vaatimusten mukaisesti, käytetään AFS 2017:3 -standardin mukaista kolmannen osapuolen tarkastuslaitosta. Tämän kolmannen osapuolen elimen tehtävänä on valvoa putkistotoimia hankkeen kaikissa vaiheissa. Kun vaatimusten täytyminen hankkeen kunkin vaiheen aikana on vahvistettu, laitos antaa lausuntoasiakirjan.

Offshore-putkijohtojen asennusta koskevat kansalliset lait ja asetukset sisältävät harvoin erityisiä teknisiä vaatimuksia, vaan niissä viitataan yleensä kansainvälisesti hyväksytyihin standardeihin ja normeihin. DNV-GL:n standardi DNVGL-ST-F101-Submarine Pipeline Systems on esimerkki standardista, jota voidaan käyttää Polargrundin offshore-putkijärjestelmän suunnittelussa ja rakentamisessa. OS-F101 sisältää ohjeet ja kriteerit kaasuputkien suunnittelua, materiaaleja, valmistusta, valmistusta, asennusta, testausta ja käyttöönottoa sekä käyttöä ja kunnossapitoa varten. I Taulukko 5 luetellaan putkistojärjestelmän tekniseen suunnitteluun mahdollisesti liittyvät normit ja standardit.



Taulukko 5. Standardit ja ohjeet, joita voidaan soveltaa putkistojen suunnitteluun, rakentamiseen ja käytöstä poistamiseen.

Kansainvälisesti tunnustetut standardit ja ohjeet
AFS 2017:3 Paineistettujen laitteiden käyttö ja valvonta
ASME B31.12 Vetyputkistot ja -putkistot
EIGA IGC Doc 121/12 (2004,2014): Vedyn kuljetusputkistot.
DNVGL-ST-F101 , vedenalaiset putkijärjestelmät
DNV-RP-F102 Putkistojen kenttäsaumojen pinnoitus ja putkistojen pinnoituksen korjaaminen kentällä
DNV-RP-F103 Vedenalaisten putkistojen katodinen suojaus galvaanisilla anodeilla
DNV-RP-F105 Vapaasti ulottuvat putkistot
DNV-RP-F106 Tehdasmaisesti levitettävä putkiston ulkopuolinen pinnoite korroosionestoon.
DNV-RP-F107 Putkistojen suojauksen riskinarviointi
DNV-RP-F110 Sukellusveneiden putkistojen maailmanlaajuinen vääntyminen
DNV-RP-F111 Troolikaluston ja putkistojen välinen häiriö
DNV-RP-E305 Sukellusveneiden putkistojen pohjan vakauden suunnittelu

4.1.2 Tekniset eritelvät ja mitoitus

Putkistot koostuvat yleensä muoviputkista ja hitsatuista teräsputkista, joissa molemmissa on jonkinlainen ulkoinen mekaaninen suojaus. Hankealueen suunnittelua koskevan alustavan ehdotuksen ja arvioidun vuotuisen vedyn tuotannon perusteella on tehty alustava arvio putkiston ominaisuuksista, ks. Taulukko 6.

Taulukko 6. Putkistojen alustavat eritelvät

Komponentti	Tietoa ohjelmasta
Rakennusmateriaalit	Muovi tai teräs
Eristysmateriaali	Muovi
Mekaaninen suojaus	Ulkoinen teräs- ja betoniteräsvahvistus
Putken halkaisija	70-600 [mm]
Suunnittelulämpötila	-10/+40 [°C]
Putken arvioitu pituus, 120 tuulivoimalaa	400 [km]
Arvioitu putkilinjan pohjakorvaus, mukaan lukien kaivannot, soratuki, 120 tuulivoimalaa.	4 000 000 [m ²]
Vedyn määrä, sisäinen putkistojärjestelmä, 120 tuuliturbiinia.	12 500 [m ³]
Vedyn paino, sisäinen putkistojärjestelmä, 120 tuuliturbiinia.	33.6 [tonnia]

Rakentamisvaiheessa voidaan esimerkiksi käyttää putkiauraa putkien asentamiseen. Merenpohjan luonteesta riippuen sillä voidaan aurata 500 metriä tunnissa ja luoda jopa 2,5 metriä syvä kaivanto. Merenpohjan leveys, johon rakentamisvaiheessa vaikutetaan fyysisesti, on arviolta 15 metriä, ja valmiin putkiston leveys suojaukset mukaan luettuina on arviolta 10 metriä.

Tuotantoputkisto on vedenalainen rakenne, joka koostuu venttiileistä ja putkista, jotka on suunniteltu sekoittamaan ja ohjaamaan tuotettua vetyä tuulipuiston sisällä yhteen tai useampaan virtausputkeen tuulipuiston ulkopuolelle. Tuulipuiston sisällä voidaan käyttää yhdestä kahteen



tuotantoputkea. Jakeluputken ulkomitat ja merenpohjan pinta-ala, johon valmis asennus vaikuttaa, on esitetty Taulukko 7.

Taulukko 7. Haaraputken ulkomitat ja merenpohjaa koskevat vaatimukset

Numero	1-2
Halkaisija	10-15 m
Pohjan väite	160-360 m ²

4.1.3 Putkiston materiaali

Jotta putkistot kestävät vetyyn ja siten putkistojärjestelmään kohdistuvan paineen, niiden on saavutettava tietyt toivotut fyysiset ominaisuudet, kuten sitkeys, sitkeys ja hitsattavuus. Tähän tarkoitukseen soveltuva materiaali on lujatekoinen matalaseosteinen teräs, joka koostuu raudasta (98-99 painoprosenttia), hiilestä, mangaanista ja muista seosaineista, kuten titaanista (Tsiklios C., et., al. 2022).

Taulukko 8 esitetään asiaankuuluvat standardit ja materiaalinimitykset, joita voidaan soveltaa vetyputkistojen teräsmateriaalien suunnittelussa ja tuotannossa. Taulukossa teräslaadun kohdalla olevat numerot vastaavat teräksen vähimmäismuotolujuutta, jota voidaan käyttää osoittamaan pienintä vetojännitystä, jonka putkisto voi kestää ennen kuin materiaali muuttuu pysyvästi.

Taulukko 8. API 5L:ssä X:n jälkeen oleva kaksinumeroinen arvo edustaa teräksen vähimmäismuotolujuutta kilopuntina neliötuumaa kohti. Vastaavasti ISO/EN-standardissa L:n jälkeen oleva kolminumeroinen arvo edustaa teräksen vähimmäismuotolujuutta megapascalina.

Organisaatio	Standardi/eritelmä	Teräksen laatu				
API	API 5L	X42	X46	X52	X56	X60
ISO	ISO 3183	L290	L320	L360	L390	L415
FI	FI 10, 208	L290	L320	L360	L390	L415

4.1.4 Putkistojen suojele

Teräsputkien suojaamiseksi korroosiolta käytetään ulkoista korroosiosuojausta. Tämä suojaus koostuu muovipinnoitteesta, esimerkiksi polyeteenistä, ja putkien valmistaja levittää pinnoitteen. Jotta putket voidaan hitsata rakentamisen aikana, noin 240 mm putken päistä jätetään käsittelemättä. Kun hitsaustyö on valmis, hitsausliitokset suojataan korroosiosuojalla.

Kun putkisto varustetaan betonista koostuvalla ulkokerroksella, putkiston paino kasvaa ja sitä painotetaan. Tämä vahvistaa putkistoa ulkoisten kuormitusten, kuten vedenalaisten virtausten, aiheuttamaa epävakautta ja väliaineen aiheuttamaa sisäistä kuormitusta vastaan käytön aikana. Betonipinnoite levitetään aiemmin levitetyn korroosiosuojauksen päälle. Myös tässä tapauksessa osa putken päistä jätetään käsittelemättä, jotta hitsaus voidaan suorittaa rakentamisen aikana.

Linjaan voidaan asentaa ylimääräinen korroosiosuojaus toissijaisen katodisuojausmuodossa (galvaaniset uhrautuvat anodit) putkiston suojaamiseksi, jos ulkoinen korroosiosuojaus vaurioituu. Katodisuojaus suunnitteluun vaikuttavat useat parametrit, kuten teräsmateriaali,



pinnoitemateriaali, ympäristön elektrolyyttiset ominaisuudet, käyttöolosuhteet sekä putkiston odotettu käyttöikä.

4.1.5 Eroosiosuojaus ja tuki epätasaisessa syvyydessä.

Putket altistuvat erilaisille rasituksille, kuten aaltoliikkeille ja virtauksille. Hankealueen merenpohjan olosuhteista riippuen voidaan myös joutua ryhtymään toimenpiteisiin, jotta saadaan tasainen pohja, jolle putki voidaan asentaa, jotta vältetään merenpohjan epätasaisuudesta johtuva kuormitus. Esimerkkejä toimenpiteistä putkien pohjan ja/tai suojaamiseksi ovat betonituet, päällystäminen, kaivaminen ja kaivantojen kaivaminen.

Sora ja kalliota käytetään tietyillä osuuksilla merenpohjan tason nostamiseksi, kun putkijohdon jänneväli ei muuten olisi kosketuksissa merenpohjaan epätasaisen merenpohjan vuoksi. Vapaan jännevälin lyhentäminen vähentää riskiä putkilinjan staattisen ylikuormituksen ja väsymisrajojen ylittymisestä. Lyhyemmille osuuksille soveltuvat sora ja kiveys. Pidemmillä osuuksilla putki voidaan sen sijaan asentaa kaivantoihin. Tyypillisesti putkijohtoauran avulla merenpohjaan tehdään V:n muotoinen lovi, johon putki sitten asennetaan. ks. Kuva 7. Matalassa vedessä kaivanto voidaan myös kaivaa ennen putken laskemista. Putkiura voi olla noin 22 metriä pitkä ja painaa 200 tonnia (Nord Stream, 2011).



Kuva 7 - Ojan kaivaminen putkiauralla (lähde: [Nord Stream, 2011](#)).

4.1.6 Olemassa olevan merenpohjan infrastruktuurin ylittäminen

Hankealueella tehdään kartoitustöitä, joiden tarkoituksena on muun muassa tunnistaa ja tutkia alueen olemassa oleva infrastruktuuri. Yleisiä toimia ovat seuraavat:

- Kivivallit
- Betonipatjat
- Leikkaaminen ja poistaminen

4.2 Materiaalilogistiikka

Putkistot valmistetaan osina maissa, ja ne pinnoitetaan sisäpuolelta ruiskumaalilla ja ulkopuolelta korroosionestopinnoitteella ja betonipinnoitteella. Valmistuksen ja pinnoituksen jälkeen putket kuljetetaan valittuun satamaan, josta ne lastataan Polargrund Offshoreen. Kuljetus valitusta satamasta tuulipuiston sisällä sijaitsevalle asennusalueelle tapahtuu tavallisesti kuljetusproomuilla ks. Kuva 8.



Kuva 8 - Esimerkki putkenlaskualuksesta (lähde: [Mark J. Kaiser, 2020](#)).

Koska meriympäristössä olevat kaasuputket voivat altistua ankarille fysikaalisille ja kemiallisille olosuhteille, tarvitaan tiettyjä toimenpiteitä mahdollisten suunnitteluongelmien torjumiseksi. Alueilla, joilla merenpohja on epätasainen, kaasuputkiin voi kohdistua staattista ylikuormitusta, joka johtuu putkien omasta painosta, kun putkien jänneväli on vapaa. Tämän ylikuormituksen vähentämiseksi ja väsymisrajojen ylittämisen sallimiseksi vapaiden jännevälien kohdalla käytetään kalliomateriaalia merenpohjan tasoittamiseksi ja jänneväliden pituuden lyhentämiseksi.

Kalliomateriaalia voidaan käyttää myös kaasuputkien vakauttamiseen merenpohjassa ja niiden liittymissä muuhun merenpohjan infrastruktuuriin. Putkiston suojaamiseksi aaltojen ja virtausten vaikutukselta putkisto asennetaan joko soralla tai kivellä tai kaivetaan merenpohjaan. Kaivantoon voidaan käyttää auraa. Aura laukaistaan ja ohjataan haluttuun kohtaan merenpohjassa kauko-ohjattavan ajoneuvon (ROV) ja kaikuluotaimen avulla.

4.3 Putkien asennus

Hankkeessa voi olla mukana kahdenlaisia putkenlaskualuksia, ankkurinkäsittelyaluksia ja dynaamisesti sijoitettavia aluksia.

Ankkurinkäsittelyaluksessa käytetään ankkureita ja vaijereita, jotka on sijoitettu ennalta määrättyihin paikkoihin, pitämään alus vakaana halutuissa koordinaateissa. Ankkurit otetaan käyttöön erillisillä ankkurinkäsittelyaluksilla, jotka on varustettu erityisesti tätä tarkoitusta varten. Dynaamisesti asemoitua alusta taas ohjataan useilla erikseen ohjattavilla potkureilla, joita kutsutaan myös työntövoimalaitteiksi. Ohjauspotkureita puolestaan ohjataan tietokoneavusteisella ohjausjärjestelmällä, joka pystyy pitämään aluksen sijainnin erittäin tarkasti.



Kuljetusproomuilla toimitetut putket nostetaan putkenlaskualukseen putkienkuljetusaluksen nosturilla. Putkenlaskutoimien pitämiseksi erillään alueen muusta merenkulusta ehdotetaan turvaetäisyyttä.

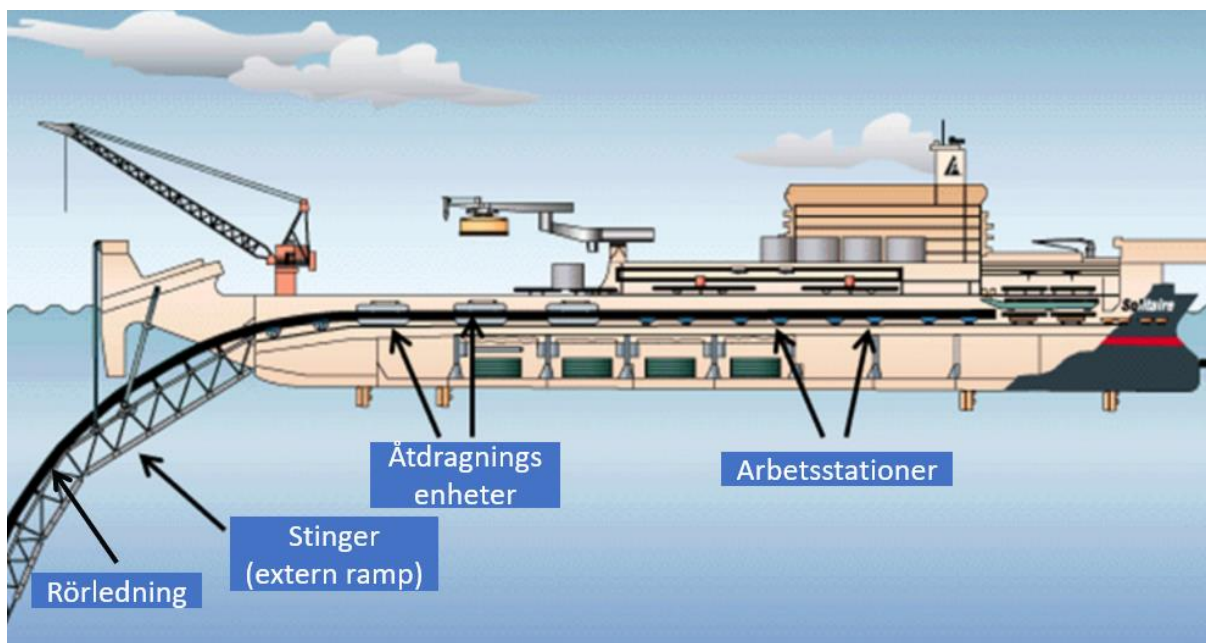
Merellä tapahtuvassa putkien asennuksessa käytetään pääasiassa kahta järjestelmää, niin sanottuja S- ja J-järjestelmiä. Polargrund Offshore käyttää todennäköisesti ensin mainittua järjestelmää.

J-lay-järjestelmässä putkiosuudet nostetaan lähes pystysuoraa ramppia pitkin ylös, jossa putkien liitokset hitsataan meressä kulkevaan putkeen. Luiskan kulma säädetään siten, että se on linjassa putken ja merenpohjan välisen kosketuksen kanssa, jotta putken taipuminen olisi mahdollisimman vähäistä. J-lay-menetelmä soveltuu syvään veteen, koska putki lähtee rampilta lähes pystysuorassa asennossa ja putki taipuu vain kerran asennusvaiheen aikana merenpohjassa. Tämä vähäinen taivutus on suotuisa väsymiselle herkkien putkien asennuksessa.

S-lay-järjestelmässä putkiliitokset hitsataan yhteen putkenlaskualuksessa vaakasuorassa tuotantolinjassa. Meriputkea tuetaan stinger-rakenteella, jolla säädellään säteen kokoa putkien kaartessa kohti merenpohjaa. Stinger-rakenne asennetaan yleensä aluksen perään, ja se voi olla yli 100 metriä pitkä riippuen kriteereistä, jotka ovat tarpeen taivutusjännityksen pitämiseksi rajoissa.

Esimerkkejä S-lay-järjestelmän komponenteista ovat kiristysyksiköt (putkien vakauttaminen hitsaustoimien aikana), ulkoinen luiska (putkiston jännityksen vähentäminen, kun se lasketaan merenpohjaan) ja paikannusjärjestelmät. Putkenlaskualus etenee likimain merenpohjaan laskettavien putkien pituutta vastaavalla etäisyydellä.

Korkean tuotantonopeuden ja betonivuorattujen putkien asennusmahdollisuuden vuoksi S-lay-menetelmää pidetään sopivana putkien asennukseen matalassa tai puolisyvässä vedessä.

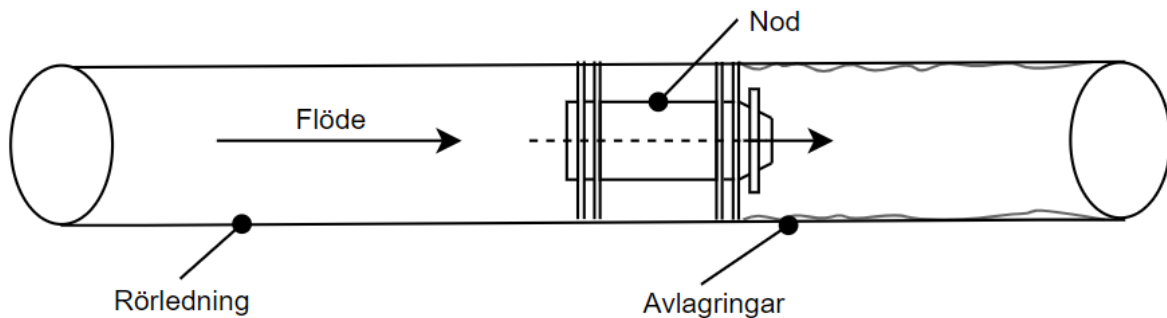


Kuva 9 - Esimerkki S-laskumenetelmää käyttävästä laskualuksesta (Lähde: [muokattu Mark J. Kaiserin mukaan, 2020](#)).

4.4 Putkiston kunnossapito

4.4.1 Putkien sisäinen tarkastus

Tarkastussolmua käytetään putkistojen sisäosien puhdistamiseen ja tarkastamiseen ja siten putkistojen sisäisten vaurioiden ehkäisemiseen ja seurantaan. Ne koostuvat elektronisista komponenteista, kuten ultraääniantureista, RF-moduuleista, mittauslaitteista halkaisijan, kaarevuuden, paksuuden, paineen, materiaalihäviön ja lämpötilan mittaamiseen. Nykyaikaisilla tarkastussolmuilla voidaan havaita putkistoissa olevat poikkeavuudet, kuten vuodot, halkeamat ja korrosio, erittäin tarkasti. Tyypillinen tarkastussolmujärjestelmä koostuu solmusta, lähettimestä ja vastaanottimesta, joita kutsutaan myös tarkastussolmuasemiksi. Itse solmu on sylinterinmuotoinen laite, joka kulkee putkistoa pitkin.



Kuva 10 - Esimerkki putkien sisäpuolisesta puhdistuksesta.

Putkistojen tarkastukset ja muut suunnitellut huoltotyöt tehdään pääasiassa vuoden jäättömänä aikana.

4.4.2 Ulkopuolisten putkien tarkastus

Tuulipuiston putkistojen ulommilla osuuksilla tehdään säännöllisiä tarkastuksia putkiston eheyden varmistamiseksi. Tarkastusten perusteella voidaan tarvita huoltotoimenpiteitä, kuten eroosiosuojauksen lisäämistä. Avomeriputkistojen ulkoiset tarkastukset tehdään kauko-ohjattavalla ajoneuvolla (ROV). Näissä laitteissa on muun muassa antureita, kameroita ja skannereita, joilla tarkastetaan putkien yleinen kunto. Suunniteltujen tarkastusten aikaväli määritetään hankkeen yksityiskohtaisen suunnitteluvaiheen aikana.

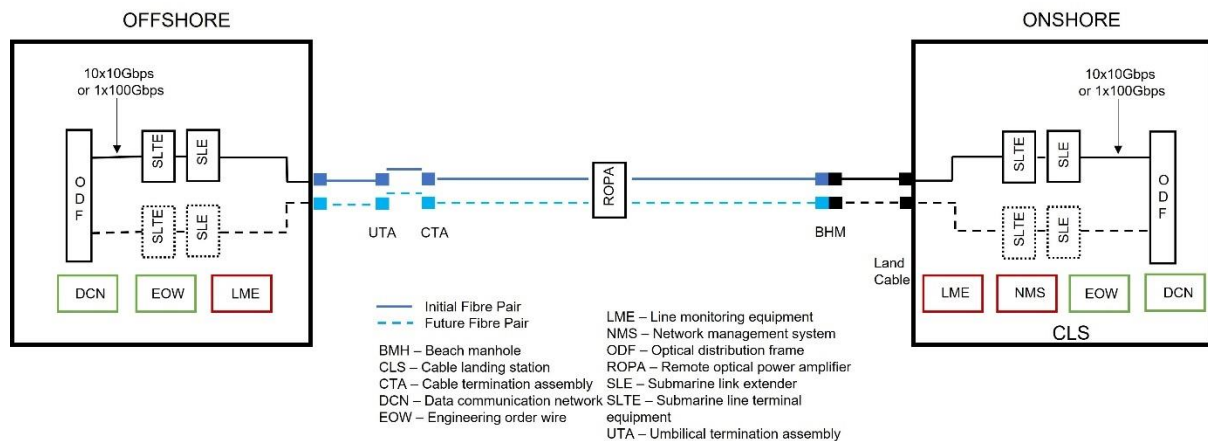
4.5 Tietoliikennekaapeli

Polargrund Offshoren tuulivoimalat, elektrolyserit ja putkisto edellyttävät etävalvontaa ja siten reaaliaikaista tiedonsiirtoyhteyttä maalla sijaitseviin laitoksiin. Hankkeen myöhemmissä vaiheissa kehitetään viestintäjärjestelmiä, jotta voidaan varmistaa asianmukainen koordinaatio eri organisaatioiden ja laitosten välillä. Tällä hetkellä on olemassa kaksi toteuttamiskelpoista vaihtoehtoa mikroaaltoradiotaajuuksien ulkopuolella: yhteys satelliittien kautta ja yhteys merenalaisten valokuitukaapeleiden kautta. Ensin mainittu tarjoaa pienemmän puhe- ja tiedonsiirtonopeuden, kun taas jälkimmäinen tarjoaa paljon suuremman kaistanleveyden, mutta kalliimpaan hintaan.

Hankkeen myöhemmässä vaiheessa suunnitellaan valokuitukaapelijärjestelmä, jossa kuvataan yksityiskohtaisemmin asennuksen odotettu suorituskyky, kaistanleveys, tila- ja teho vaatimukset sekä synergia naapurihankkeiden ja -laitosten kanssa.

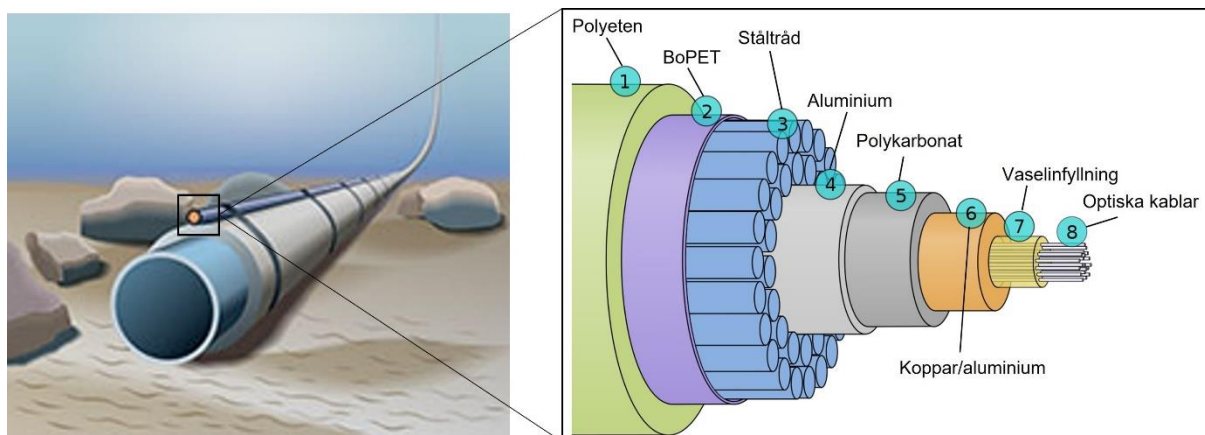
Valokuitukaapelijärjestelmä voi koostua joko niin sanotusta pisteestä pisteeseen -yhteydestä eli tuulipuiston ja minkä tahansa maalla sijaitsevan laitoksen välisestä yhteydestä, tai kaapelijärjestelmä voi tukea useita lähekkäin sijaitsevia merellä sijaitsevia laitoksia ja niiden yhteyksiä maalla sijaitseviin laitoksiin.

Alla olevassa suunnitteluesimerkissä esitetään mahdollinen skenaario, jota voitaisiin käyttää Polargrund Offshore -yhtiössä. Tässä skenaariossa järjestelmän liitännäspisteet on määritelty offshore-tuulipuiston viestintäyksiköissä ja maalla sijaitsevassa valvonta-asemassa, ks. Kuva 11.



Kuva 11 - Esimerkki valokuitujärjestelmän suunnittelusta (Lähde: [muokattu Nielsenin mukaan, 2019](#)).

Valokuitukaapelit asennetaan todennäköisesti vedensiirtoputkien ulkosivuille (Kuva 12), tuulipuiston sisälle sekä tuulipuistosta maalle päin. Näin ollen valokuitukaapeleiden asennuksessa ei käytetä merenpohjaa. Varsinainen kaapelinkasku on tässä skenaariossa koordinoitava ja suunniteltava putkiston asennuksen ja laskemisen kanssa.



Kuva 12 - Valokaapeli asennetaan todennäköisesti kaasuputkien ulkopuolelle (vasemmalla) (lähde: [Omnisens, 2023](#)). Esimerkki siitä, miten tällainen kaapeli tyypillisesti suljetaan (oikealla) (lähde: [muokattu Krause Perinin mukaan; Jose, 2018](#)).

Valokuitukaapeleiden käyttö ja huolto niiden elinkaaren aikana edellyttää huolto- ja korjausalusten, niihin liittyvien laitteiden, kuten ROV-laitteiden, ja koulutetun henkilöstön saatavuutta. Tärkeimmät kaapelivauriot, joita voi esiintyä ja jotka on korjattava, ovat trootista ja ankkurista johtuvat fyysiset vauriot, kaapelin katkeamiset ja kuitujen vaurioituminen.



4.1 Kaasun- ja palonilmaisujärjestelmät ja hätäsulku

Tulipalon ja kaasun havaitsemisjärjestelmät asennetaan valvomaan laitoksia ja putkistoa tulipalon, räjähdyksen ja kaasuvuodon estämiseksi. Turvallisuusjohtamisjärjestelmään integroidaan hätäpysäytysjärjestelmät, joiden avulla laitokset ja putkiston osat tai koko putkistojärjestelmä voidaan pysäyttää nopeasti ja turvallisesti. Hätäpysäytys voidaan käynnistää sekä manuaalisesti että automaattisesti.

Äärimmäisessä tilanteessa, jossa tulipalo tai kaasuvuoto alkaa, järjestelmä sulkee putkiston automaattisesti ja välittömästi. Putkistojärjestelmän yksityiskohtaisessa suunnittelussa saavutetuista tuloksista riippuen, jos järjestelmän putkistojen varrella on mahdollisesti venttiilejä, laitteita ja muita asemia, jotka jakavat järjestelmän, hätäpysäytys voi tapahtua vain järjestelmän suljetuissa osissa, joihin se vaikuttaa. Tämä tarkoittaa, että koko järjestelmää ei tarvitse sulkea samanaikaisesti.

Koko järjestelmää koskeva täydellinen riskianalyysi tehdään hankkeen yksityiskohtaisen suunnitteluvaiheen aikana.



5. Rakentaminen, käyttö ja käytöstä poistaminen

5.1 Asennus

Yksi konsepti vedyntuotantojärjestelmien rakentamiseksi on koota pino ja siihen liittyvät laitteet maalla modulaarisiin kontteihin (ks. kohta 6.1 Yleinen kunnossapito). Mahdollisimman sujuvan asennuksen ja pinojen vaihdon varmistamiseksi järjestelmä voidaan erottaa toisistaan siten, että siinä on pinokontteja ja itsenäisiä kontteja, joihin sijoitetaan oheisjärjestelmiä, kuten vedenkäsittely, kaasun puhdistus ja mahdollisesti kompressio. Näiden säiliöiden käyttöönottoon tai vaihtoon voidaan käyttää nosturilla varustettuja asennusaluksia.

5.2 Käyttö

Toimintakonsepti ja turvajärjestelmä kehitetään turvallisen toiminnan varmistamiseksi. Siihen sisältyvät paineen ja mahdollisten kaasuvuotojen seurantajärjestelmät sekä muut järjestelmät, joilla varmistetaan laitteiden turvallinen toiminta ja suojaus. Tuulipuiston toimintaa valvotaan ja ohjataan SCADA-järjestelmän (Supervisory Control And Data Acquisition) avulla. SCADA-järjestelmiä ohjaa yleensä keskitetysti valvontakeskuksessa sijaitseva operaattoriryhmä.

Käytön aikaisten valvonta- ja turvajärjestelmien lisäksi tarvitaan myös jatkuvaa huoltoa ja kunnossapitoa komponenttien pitkäikäisyyden varmistamiseksi. Käyttövaiheen aikana toimenpiteet rajoittuvat määräaikaishuoltoon ja kunnossapitoon sekä suunnittelemtomiin korjauksiin (ks. kohta 6). Suunnittelemtomat työt koskevat usein järjestelmiä tai pieniä komponentteja, jotka ovat vioittuneet. Kun tällainen vika ilmenee, se vaikuttaa yleensä vain rajoitettuun osaan laitosta. Kunnossapito- ja korjausstrategioita kehitetään ja analyysjä tehdään mahdollisista korjausskenaarioista.

5.3 Käytöstäpoisto

Tuulipuiston, sen vedyntuotantoyksiköiden ja putkiston kautta tapahtuvan vedynkuljetuksen käytöstä poistamista koskeva ohjelma laaditaan, kun tuulipuiston käyttöikä lähestyy loppuaan. Vedyntuotantojärjestelmien käytöstäpoisto koordinoidaan tuulivoimaloiden käytöstäpoiston kanssa. Tuulivoimalayksiköiden käytöstäpoistoon käytettäviä nosturialuksia voidaan käyttää elektrolysaattorijärjestelmien muodostavien moduuliyksiköiden käytöstäpoistoon. Materiaalit kierrätetään mahdollisuuksien mukaan parhaiden ja ympäristön kannalta suotuisimpien käytäntöjen mukaisesti käytöstäpoiston yhteydessä.



6. Kunnossapito ja palvelut

6.1 Yleinen kunnossapito

Koska ehdotettu puisto sijaitsee Pohjanlahden osassa, jossa jäätä esiintyy yleensä talvikuukausina, huolto suoritetaan mieluiten jäättömänä aikana. Talvella on arvioitava muita kuljetusvälineitä kuin aluksia, kuten ilmatyynyaluksia tai helikoptereita. Markkinoilla on kuitenkin kaupallisesti saatavilla SOV-ajoneuvoja, jotka pystyvät rikkomaan jäätä. Ilmatyynyalusten on sovellettava hyvin henkilöstön ja materiaalin kuljettamiseen, ja ne on sovitettava tuulivoimaloiden telakointiin. Ilmatyynyalus on myös varustettava tutkalla, jotta voidaan välttää törmäykset esimerkiksi tuulivoimaloiden kanssa, kun talvella on pimeää suuren osan päivästä. On otettava huomioon, että pääkomponenttien, kuten vaihdelaatikoiden, siipien, generaattoreiden jne. vaihtaminen talvella voi olla haastavaa, koska se edellyttää niin sanottua Jack-Up-alusta. Jäänmurtajia tarvitaan tällöin raivaamaan alue, jossa Jack-Up-alus seisoo.

Normaalioloissa henkilöstön kuljetus tuulivoimaloihin ja tuulivoimaloista tapahtuu miehistönkuljetusaluksella (Crew Transport Vessel, CTV) (Kuva 13) tai huoltotoiminta-aluksen (SOV) (Kuva 14).



Kuva 13 - Esimerkki kahdesta väritelevisioaluksesta (Lähde: [Northern Offshore Services](#), 2023).



Kuva 14 - Esimerkki SOV-aluksesta (Lähde: [VARD](#), 2023).

Logistiikan helpottamiseksi vetylaitoksen suunniteltu huolto voidaan suorittaa yhdessä tuuliturbiinin huollon kanssa. Suunnitelmallinen huoltoväli on noin 1-2 kertaa vuodessa.

Ennakoimattomia huoltotöitä tehdään tarpeen mukaan. Laajuudesta ja monimutkaisuudesta riippuen sen suorittaa tavallinen huoltohenkilöstö tai vetylaitoksen valmistajan asiantuntijat.

Pinojen odotetaan jouduttavan vaihtoon 8-10 vuoden kuluttua teknisen rappeutumisen vuoksi. Pinojen odotetaan kestävän yli 10 vuotta, mutta taloudellisesti voi olla suotavaa vaihtaa pinot ennen kuin niiden tehokkuus on laskenut liikaa. Koska vedyntuotantojärjestelmä on rakennettu modulaarisiksi yksiköiksi, joissa pinot on erotettu muusta järjestelmästä, pinojen vaihtamista voidaan tehostaa. Pinojen vaihdon aikana käytetään nosturia, jolla huonokuntoiset pinot nostetaan pois ja uudet pinot nostetaan turbiinialustoille. Myös vedenkäsittelyyksiköissä voi olla tarpeen tehdä suurempia huoltotöitä, jolloin esimerkiksi suodattimet voidaan joutua vaihtamaan tai puhdistamaan ja kalvot vaihtamaan. Näiden huoltojen aikaväli riippuu vedenkäsittelytekniikan tyypistä.

Huollon lisäksi tehdään myös tarkastuksia vuotojen tai epänormaalien melun havaitsemiseksi ja kaasunilmaisimien toiminnan varmistamiseksi. Tämä voidaan ajoittaa samaan aikaan tuulivoimaloiden tarkastusten kanssa.

6.2 Nosturi turbiinialustalla perustuksen ja tornin välissä

Vetylaitoksen huoltoa varten tarvittavien materiaalien nostamiseen ei tarvita ylimääräistä nosturia ylikulkusillalla olevan nosturin lisäksi. Normaalisti nosturin kantavuus on hieman yli 1 tonni, minkä pitäisi riittää normaalien huolto- ja korjaustöiden materiaalien nostamiseen.