

POLARGRUND
OFFSHORE AB



Polargrund Offshore

Bilaga C.1: Teknisk beskrivning
decentraliserad vätgasproduktion



AFRY
Å F P Ö Y R Y

Handläggare
Alice Karlsson
Danial Farvardini
Laura Malek
E-post
Alice.karlsson@afry.com

Datum
2024-03-14

Kund
Skyborn renewables

Polargrund Offshore

Teknisk beskrivning

Decentraliserad vätgasproduktion



Innehållsförteckning

1.	Introduktion	5
1.1	Projektsammanfattning.....	5
1.2	Utformning och layout	6
2.	Processbeskrivning	7
2.1	Vätgasproduktion.....	7
2.2	Transformator och likriktare.....	8
2.3	Vattenrening.....	8
2.3.1	Omvänd osmos.....	8
2.3.2	Vakuumdestillation.....	8
2.3.3	Jonbytarmembran	9
2.4	Elektrolys	9
2.4.1	PEM.....	9
2.4.2	Alkalisk elektrolys	10
2.4.3	Jämförelse av elektrolystekniker.....	10
2.4.4	Eltillförsel	11
2.5	Kompression	12
2.5.1	Kompressorplattform	12
2.6	Gasrening.....	13
2.7	Stödsystem	14
2.7.1	Kylsystem	14
2.7.2	Kvävgastillförsel.....	15
2.7.3	Tryckluft.....	15
2.8	Byggnad.....	15
3.	Förbrukning, utsläpp och produktion	17
3.1	Vattenförbrukning.....	17
3.2	Kemikalier	17
3.3	Utsläpp till vatten och luft	18
3.3.1	Utsläpp till luft.....	18
3.3.2	Utsläpp till vatten	18
3.4	Sammanfattning vatten, vätgas och syrgas.....	19
4.	Rörledningssystem.....	20
4.1	Teknisk utformning	20
4.1.1	Generellt	20
4.1.2	Tekniska specifikationer och dimensionering.....	21



4.1.3	Rörledningsmaterial	22
4.1.4	Skydd av rörledningar.....	22
4.1.5	Erosionsskydd och stöd vid ojämn batymetri	23
4.1.6	Korsning av befintlig havsbotteninfrastruktur	23
4.2	Materiallogistik	23
4.3	Rörläggning.....	24
4.4	Rörledningsunderhåll	26
4.4.1	Invändig rörinspektion.....	26
4.4.2	Utvändig rörinspektion.....	26
4.5	Kommunikationskablar	26
4.1	Gas- och branddetekteringssystem och nödavstängning	28
5.	Anläggning, drift och avveckling.....	29
5.1	Anläggning	29
5.2	Drift	29
5.3	Avveckling.....	29
6.	Underhåll och service	30
6.1	Underhåll allmänt	30
6.2	Kran på turbinplattformen mellan fundament och torn.....	31



Definitioner och terminologi

Alkalisk elektrolys	En elektrolysörtyp med flytande lutvätska som elektrolyt.
CTV	Crew Transport Vessel
Elektrod	Elektronledare som skapar elektrisk kontakt mellan elektrolyt. En positiv elektrod kallas anod och en negativ elektrod kallas katod.
Elektrolysör	En processenhet där vätgas och syrgas produceras genom spjälkning av vattenmolekyler
Elektrolyt	Jonledande substans som tillåter kemisk reaktion. Används i elektrolysörer.
Kylvatten	Vatten som används till kylning i de olika processtegen.
PEM	Proton Exchange Membrane. En elektrolysörtyp med fast elektrolyt.
Processvatten	Avser det reade vattnet som används inom tillverkningsprocessen.
Rejektvatten	Avser resterna från rening av råvatten.
Råvatten	Avser vattnet som renas till processvatten och rejektvatten.
SOV	Service Operation Vessel



1. Introduktion

Syftet med tekniska beskrivningen ”Decentraliserad vätgasproduktion” är att beskriva de tekniska förutsättningarna som gäller för vätgasproduktion inom vindkraftsparken Polargrund Offshore. Den innehåller en beskrivning av de komponenter, inklusive rörledningssystem och tillhörande infrastruktur, som behövs för produktion av vätgas på respektive vindkraftsverk. Vidare redogörs för de komponenter och metoder som kan komma att användas vid byggnation, drift och avveckling av den föreslagna verksamheten.

Handlingen utgör en bilaga till Teknisk beskrivning för vindkraftsparken som i sin tur innehåller en beskrivning av vindkraftsparkens layout, vindkraftverkens utformning, fundament, transformatorstation och omriktarstation.

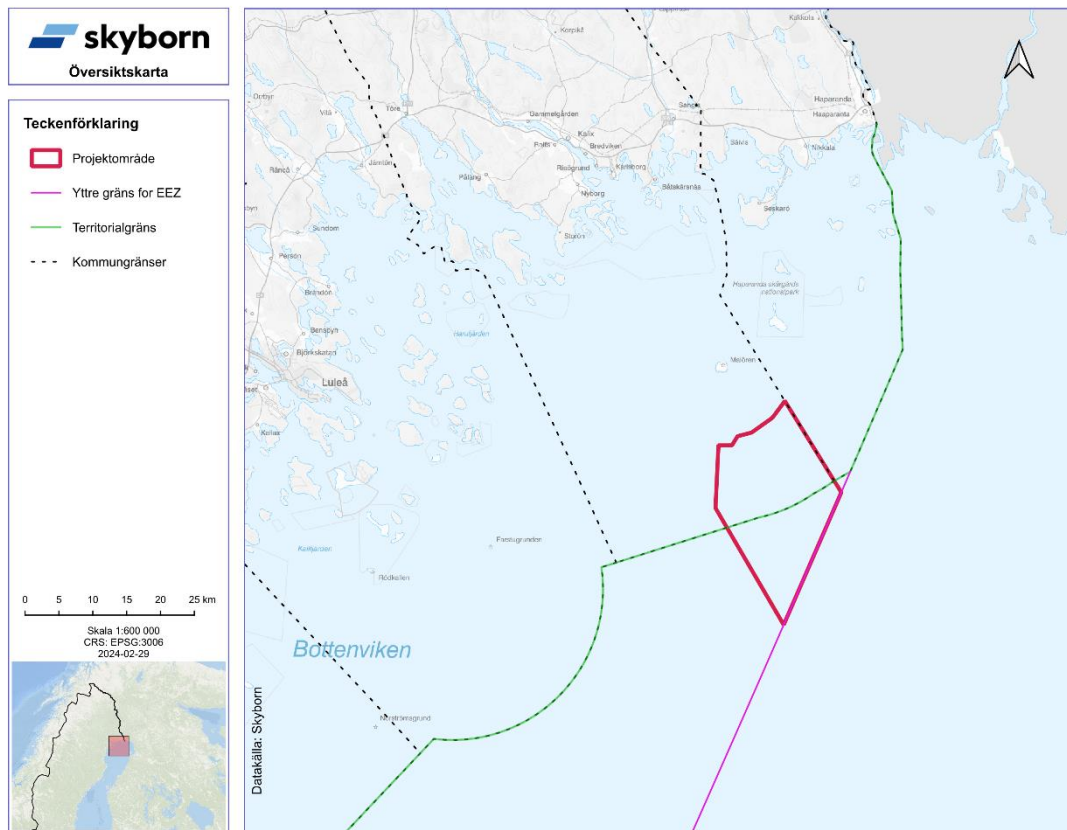
De tekniska beskrivningarna utgör underlag för miljöprövning av vindkraftsparken.

1.1 Projektsammanfattning

Denna tekniska beskrivning redogör för en utformning av verksamheten där vätgas produceras i vindkraftsparken och exporteras in till land.

Det kan även bli aktuellt att delar av parken utformas för export av el till land och delar för export av vätgas. Dvs att både elenergi och vätgas tillverkas inom olika delar av parken och exporteras till land i exportledning respektive exportrörledningar. Inom vindkraftsparken Polargrund planeras vätgasproduktionen ske decentraliserat. Ett decentraliserat system innebär att elektrolysörer för vätgasproduktion anläggs vid varje turbin. Vätgasen leds från elektrolysörerna ut i ett nät av rörledningar till en eller flera samlingspunkter för att slutligen transporteras till land via rörledning.

Vindkraftsparken Polargrund planeras att omfatta 120 vindkraftverk med en totalhöjd om maximalt 350 m och rotordiameter om ca 330 m. Den planeras ha en installerad effekt om ca 3 000 MW och en potential att årligen producera ca 9–10 TWh förnybar el. Den möjliga vätgasproduktionen inom vindkraftsparken Polargrund bedöms kunna uppgå till ca 400–700 kg vätgas per timme och turbin (baserat på en märkeffekt om 20–30 MW per turbin). Det ger en total vätgasproduktion om ca 50–70 ton varje timme, baserat på ca 120 turbiner. Den planerade elproduktionen om upp till 10 TWh skulle innebära en vätgasproduktion om upp till ca 200 000 ton vätgas årligen. I årsproduktion av vätgas motsvarar det ca 20–25 % av Energimyndighetens föreslagna planeringsmål till 2030 i deras förslag till nationell vätgasstrategi (Energimyndigheten, 2021). Polargrundsläge i Bottenviken innebär att verksamheten kan anslutas till eventuella etableringar av storskaliga rörledningar för vätgas längs kusten och på så vis nå ut till ett större geografiskt område.



Figur 1 - Översikt över projektområdet.

1.2 Utformning och layout

Vindkraftverkens positioner kommer vid detaljprojektering att utformas för optimal drift baserat på bland annat vindkraftverkens dimensioner, möjliga vakeffekter och separationsavstånd mellan verken. För beskrivning av övriga tekniska aspekter av vindkraftparken, såsom layout och fundamentstyper, se den Tekniska beskrivningen för vindkraftparken (Skyborn, 2024, Teknisk beskrivning Polargrund offshore, bilaga C till ansökan om tillstånd).

Exempel på utformningen av de interna och externa rörledningarna för vätgas redovisas i ett senare avsnitt i detta dokument. Den faktiska utformningen av rörledningsnätet tas fram i senare utredningsskede.

2. Processbeskrivning

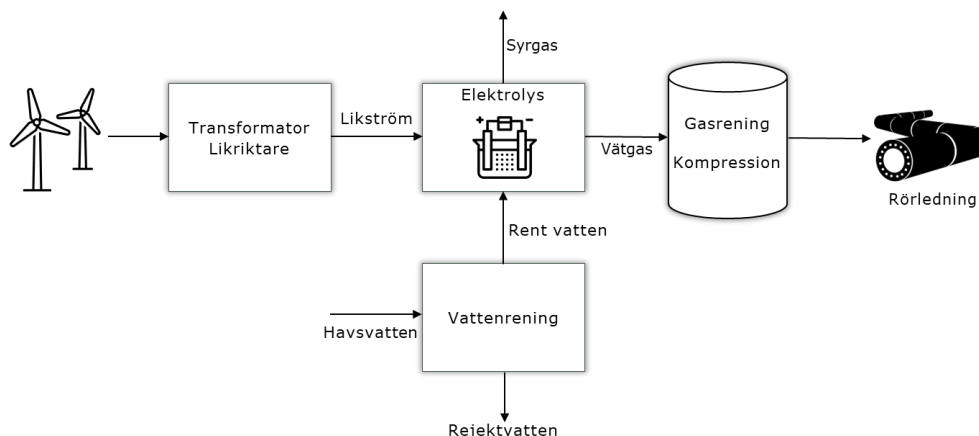
I detta kapitel beskrivs de olika teknikerna som idag anses relevanta för vätgasproduktion och andra tillhörande delsystem, såsom transformering och likriktning, vattenrening, kompression och gasrening.

2.1 Vätgasproduktion

Decentraliserad vätgasproduktion kommer att ske genom elektrolys på utvalda turbinplattformar i den planerade vindkraftparken. Elektriciteten som genereras av dessa specifika vindturbiner kommer att användas direkt för att driva elektrolysörer och annan utrustning kopplad till vätgasproduktion. Detta innebär att ingen eldistribution eller nätanslutning till och från land kommer att förekomma från dessa specifika verk. Utrustningen för vätgasproduktion kommer främst att placeras ovanpå de utvalda turbinplattformarna, men viss utrustning såsom elektrolysörer kan även komma att placeras i turbintornen på dessa plattformar.

Samtidigt kan en del av vindturbinerna komma att användas för elproduktion. Exakt hur många vindturbiner som kommer att användas för vardera ändamål, är för närvarande ej definitivt.

För produktion av vätgas genom elektrolys krävs rent vatten och elektricitet. Elektrolysen spjälkar vatten (H_2O) till vätgas (H_2) och syrgas (O_2) med hjälp av elektricitet. I gasreningen, beroende på slutanvändningens begärda kvalitet, elimineras eventuella rester av vatten och syrgas från vätgasen. Beroende på vätgasens tryck vid utlopp från elektrolys och erforderliga tryck vid slutanvändning kan vätgasen behöva komprimeras ytterligare med hjälp av högtryckskompressorer. Efter detta planeras vätgasen transporteras med rörledning till slutanvändning på land. En övergripande schematisk bild av processen för vätgasproduktion visas i Figur 2.



Figur 2 - Schematisk bild av vätgasanläggning.

Mängden vätgas som produceras kommer att vara proportionerlig till vindturbinernas produktionsmönster och elektrolysörernas effektivitet. Elektrolysens verkningsgrad är olika vid olika effektuttag och varierar längsmed den tekniska livslängden, vilket innebär att mängden vätgas som produceras kommer att variera.



2.2 Transformator och likriktare

Elektrolysörer drivs av likström. För att erhålla likström med rätt spänningsnivå för systemen kan likriktare och transformatorer behövas efter att elektriciteten genererats av vindturbinerna. En transformators syfte är att ändra spänningsnivån i en växelströmskrets till den efterfrågade nivån för olika applikationer och utrustningar i systemet. Likriktare används för att omvandla växelström (AC) från varje vindkraftverk i matningen till likström (DC), som behövs för varje elektrolysör.

Beroende på turbintyp och typ av elektrolysör kommer behovet av transformering och likriktning att optimeras för att minska förluster och antal komponenter, vilket kan innebära att likriktning och transformering inte är nödvändigt.

På grund av värmeförluster i eventuella transformatorer och likriktare behöver enheterna kylas under drift. Detta kan göras med kylvatten från havet eller med luftkylning, se avsnitt 2.7.1.

2.3 Vattenrening

Utöver likström behövs rent vatten för att producera vätgas genom elektrolys. Råvattenintaget kommer att bestå av havsvatten, vilket medför att vattnet måste renas från salter, mineraler, organiska föreningar och andra ämnen för att kunna användas som processvatten i elektrolyprocessen. Det görs för att inte skada elektrolysörerna och minska risk för degenerering. Både råvatten och kylvatten tas upp vid varje fundament.

Renhetskraven på vattnet varierar beroende på leverantör och vilken typ av elektrolysteknik som används. Oavsett teknik kommer filtreringar krävas för att rensa bort större partiklar och föremål, till exempel grenar, sjögräs och andra mikroorganismer. Beroende på vilka ämnen och halter som finns i råvattnet kan flera kombinationer av vattenreningsystem och filtreringar bli aktuella.

Vattenreningen ger upphov till ett rejektvatten som består av vatten med högre halter av de ämnen, främst salt, som redan finns i råvattnet. Rejektvattnet från processen kommer att släppas ut tillbaka till havet vid varje turbinplattform. De vattenreningsprocesser som utreds är omvänd osmos, vakuumdestillation och jonbytarmembran.

2.3.1 Omvänd osmos

Omvänd osmos är en fysisk separationsprocess där tryck appliceras på systemet för att föra vattenmolekyler genom ett halvgenomsläppligt membran som är ogenomträngligt för salter. Rejektvattenmängden kan uppgå till ca 20–50 % och tekniken är därför lämplig i applikationer med god vattentillgång. Fördelar med omvänd osmos är att energiåtgången för vattenreningen är relativt låg och att inga kemikalier används för att rena vattnet.

2.3.2 Vakuumdestillation

Vakuumdestillation är en process som genom termisk energi destillerar rent vatten ur saltvatten. Processen är utformad för att minimera värmebehovet eftersom vatten förångas vid en lägre temperatur vid undertryck (vakuum). Tekniken är lämplig för varierande drift och har inget kemikaliebehov. Systemet kan utformas så att värmeenergin som produceras i vätgasproduktionsprocessen kan användas som värmekälla till vakuumdestillationen. Det finns två olika tekniker av vakuumdestillation, vilket är flerstegs blixtdestillation (MSF) och multieffektdestillation (MED).

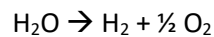
2.3.3 Jonbytarmembran

Jonbytarmembranteknologi är en fysiokemisk process där oönskade joner i råvatten extraheras med hjälp av vattenlösligt harts. Jonbytarmembran kräver mindre råvatten än de andra teknikerna och är därav fördelaktig när vattentillgången är begränsad, vilket den inte är för Polargrund.

Rejektvattenmängden är ofta omkring 2–5 % av råvattenintaget. En nackdel med tekniken är att den kräver både sura och basiska lösningar.

2.4 Elektrolys

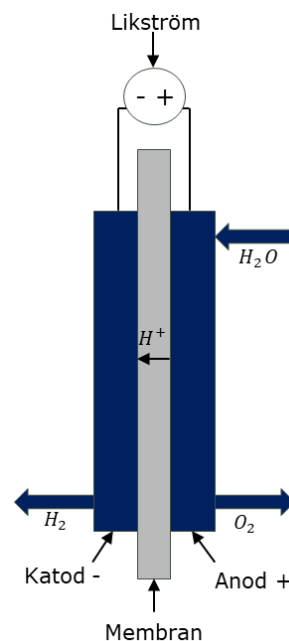
Elektrolysen används för att producera vätgas genom att spjälka vatten till vätgas och syrgas med hjälp av elektricitet. En elektrolysör är uppbyggd av ett antal enskilda elektrolysceller i vilka själva spjälkningsreaktionen sker. Elektrolyscellerna är anordnade i grupper som kallas stackar. Dessa stackar kommer att placeras som modulära enheter tillsammans med övrig processutrustning på turbinplattformarna. I elektrolysprocessen spjälkas det renade vattnet (processvatten) till syrgas och vätgas i närvaro av en elektrolyt när likström appliceras. Den totala stökiometriska reaktionen är följande:



Vätgas bildas på katodsidan och samlas upp i en ledning till en vätska/gasseparator. Syrgasen leds i en separat ledning från anodsidan till en vätska/gasseparator. Gaserna samlas upp separat och leds till gaskylare, varefter syrgasen ventileras ut till luft och vätgas leds vidare till gasrening. Dagens tekniker har en verkningsgrad mellan 58–75 %. De elektrolystekniker som kan komma att bli aktuella är PEM och alkalisk elektrolys, där främst PEM utreds som teknikval.

2.4.1 PEM

Proton Exchange Membrane (PEM) är en elektrolysortyp sammansatt av elektroder och ett membran som är protonledande och fungerar som fast elektrolyt. En schematisk bild av en PEM-elektrolyscell visas i Figur 3.



Figur 3 - Schematisk bild av en PEM-elektrolyscell.



Drifttemperaturen för PEM-elektrolys är vanligtvis 60–80 °C och drifttryck kan variera mellan 1–40 bar. Anod- och katodmaterial i PEM-elektrolysörer är oftast gjorda av platinagruppermetaller. Membranet är tillverkat av ett polymermaterial och förblir ogenomträngligt för allt utom protoner, vilket gör att den producerade vätgasen och syrgasen har en mycket hög renhet.

En teknisk fördel hos PEM-tekniken är dess förmåga att operera i ett effektmässigt brett driftintervall med snabb responstid vilket lämpar sig för den tänkta applikationen i direkt anslutning till vindkraftverk med fluktuerande elproduktion. Stackdesignen är dessutom kompakt och behöver en något mindre yta än andra tekniker. En fördel jämfört med andra elektrolystekniker är att ingen korrosiv lutvätska används som elektrolyt, vilket förenklar vissa underhållsförfaranden.

2.4.2 Alkalisk elektrolys

Alkalisk elektrolys kännetecknas av att två elektroder är nedsänkta i en flytande alkalisk elektrolytlösning såsom natriumhydroxid (NaOH) eller kaliumhydroxid (KOH) vanligtvis i en koncentration på 20–30 %. Elektrolyten som är basisk och frätande förbrukas inte i processen, men ingår i ett slutet system som katalysator.

En alkalisk elektrolyscell är sammansatt av elektroder (anod/katod), elektrolyt och ett membran som är genomträngligt för hydroxidjoner. Drifttemperaturen ligger ofta runt 70–90 °C och trycket är vanligtvis något över atmosfärstryck. Vätgas och syrgas produceras enligt samma övergripande reaktion som vid PEM-elektrolys, men gaserna har ofta något lägre renhet och tryck.

Alkalisk elektrolys är en välbeprövad teknik som har funnits länge på marknaden även i stor skala. Teknisk utveckling har optimerat designen och en hög verkningsgrad är möjlig, men i ett relativt snävare driftintervall och med längre responstid än PEM.

2.4.3 Jämförelse av elektrolystekniker

I Tabell 1 belyses för- och nackdelarna för alkalisk elektrolys och PEM. Främst PEM utreds som elektrolysteknik inom Polargrund Offshore eftersom vindkraft är en intermittent energikälla och kommer ha en dynamisk produktionsprofil, vilket PEM lämpar sig väl för. En annan fördel är att PEM har en kompakt systemdesign vilket är fördelaktigt då utrymmet på turbinplattformarna är begränsat.

Alkalisk elektrolys har hög effektivitet men låg dynamik och kräver en viss stabilitet i eltillförseln som vindkraftverk inte är optimalt lämpade för. Elektrolyten i en alkalisk elektrolysör ställer krav på välplanerat underhåll och planer för åtgärder vid eventuellt läckage. På grund av det lägre drifttrycket i alkalisk elektrolyt kan det också behövas fler komponenter, såsom gasrening och kompression, som eventuellt kan uteslutas om PEM väljs som teknik.



Tabell 1 Jämförelse av elektrolystekniker

	Alkalisk elektrolys	PEM elektrolys
Fördelar	Högre teknologisk mognad Relativt låg kapitalkostnad Icke ädla katalysatorer/elektroder Långsiktig stabilitet Hög effektivitet över livslängden	Hög strömtäthet Brett driftintervall Kompakt systemdesign Inga kemikalier behövs under drift Dynamisk drift Snabba förbättringar av CAPEX och effektivitet förväntas
Nackdelar	Smalt driftintervall Låg dynamik Frätande elektrolyt Kräver kompression	Relativt hög kapitalkostnad Lägre teknikmognad Okänd långsiktig hållbarhet

Risken för betydande läckage av vätgas i elektrolysörerna är mycket liten. Att helt förhindra läckage av vätgas är dock svårt på grund av att molekylerna är mycket små och benägna att tränga genom de flesta material, men vissa material är mer motståndskraftiga än andra. Exempelvis kan vissa metaller, såsom stål, bli påverkade genom att vätgasmolekyler tränger genom metallgittret vilket resulterar till ökad sprödhet och risk för sprickor. Med detta i åtanke kommer materialval att göras för att begränsa läckage (4.1.3 Rörledningsmaterial), och säkerhetssystemen kommer att vara utformade för att upptäcka och begränsa risker som läckage kan innebära.

Vid underhållsstopp eller nödstopp av elektrolysörerna används ett kvävgassystem för att inertera enheterna och hindra att en explosiv sammansättning mellan vätgas och luft eller syrgas kan ansamlas.

2.4.4 Etilförsel

Energiförbrukningen för vätgasproduktionen utgörs i huvudsak av elbehovet för elektrolysrstackarna, men även delsystem såsom kompressorer, vattenpumpar, vattenrening och gasrening utgör en del av vätgasproduktionssystemens energiförbrukning. Den totala installerade effekten för vätgasproduktionssystemen inom Polargrund Offshore kommer att maximalt uppgå till vindturbinernas totala installerade kapacitet om ca 3 GW. Eftersom vätgasproduktionssystemen kommer att vara lokaliserade i anslutning till varje enskild vindturbin kommer varje enskilt vätgasproduktionssystem att maximalt uppgå till varje enskild vindturbins installerade effekt om 20–30 MW. Energiförbrukningen för vätgasproduktionssystemet över tid kommer att vara proportionerlig till vindturbinernas produktionsmönster.

En elektrolysör som sådan är en komponent vars effektivitet minskar över livslängden. Försämringen av effektivitet i elektrolysrstackarna medför en gradvis ökning av värmeförlusterna utöver den tekniska livslängden. Detta innebär att en allt större andel av energiförbrukningen gradvis kommer att avgå som värme i slutet av den tekniska livslängden. Upp till omkring 25 % av vätgasproduktionssystemets installerade effekt beräknas avgå som värmeförlust i början av den tekniska livslängden, för att öka till upp emot 40 %, i slutet av stackarnas tekniska livslängd. Stackarna kan därför behöva bytas ut efter 8–10 år för att inte erhålla för höga energiförluster i form av värme.



2.5 Kompression

Då vätgasen har en låg densitet så kan gasen behöva trycksättas med kompressorer innan den leds vidare i rörledningen. Vissa typer av elektrolysörer kan leverera ett högre utgående gastryck och minimerar på så vis behovet av ytterligare kompression, detta är dock beroende på utformning av rörledningssystemet och krav av trycknivå vid slutanvändning. Hur högt tryck som krävs beror främst på dimension och längd på rörledningssystemet. Detta eftersom både längd och dimension påverkar hur stor friktionsfaktor röret ger upphov till vilket skapar tryckfall som i sin tur påverkar flödes hastighet.

När vätgasen komprimeras ökar temperaturen på vätgasen. Därför behövs vätgasen kylas med en värmeväxlare efter varje kompressionssteg för att inte skada systemets komponenter och processdelar. När gasen kyls kondenserar kvarvarande vatten som finns i vätgasflödet, vattnet som kondenseras samlas upp i s.k. knock-out-kärl och recirkuleras sedan tillbaka till vattenreningsenheten. Kompression kan därför vara nödvändig för att uppfylla kraven vatteninnehåll vid slutanvändning på land. Det kan även erfordras ytterligare kompression vid inkopplingen mellan det interna rörledningssystemet och export-pipeline som ansluts vid projektområdets gräns.

De vanligaste kompressortyperna för vätgas är membran- och kolvkompressorer. Båda använder elektricitet för att öka gasens tryck, vilket minskar volymen. Ofta används en mindre gasbufferttank för att säkerställa ett jämnt gasflöde till kompressorer och därmed undvika driftstörningar. Detta kan komma att behövas om komprimering sker i anslutning till elektrolysörerna, men inte i fallet där komprimering sker vid anslutningspunkten till exportrörledningen och anslutningsrörsystemet verkar som buffert. Storleken på en bufferttank kan motsvara några minuters maxproduktion från elektrolysörerna.

2.5.1 Kompressorplattform

Eventuella kompressorer placeras på en plattform. En kompressorplattform (storleken är ungefär ekvivalent med en plattform för en transformatorstation till havs) kan komma att behövas inom vindparken. Då utgående tryck från respektive decentraliserade elektrolysör, vid respektive kraftverk, estimeras till 35 bar. Tabell 2 visar exempel på kompressorplattformens bottenanspråk och dimensioner av de delar av plattformen som berör havsbotten, vid grundläggning med fackverksfundament.

Tabell 2. Kompressorplattformens dimensioner och bottenanspråk

Antal	1 plattform
Plattformens dimensioner (L x B x H)	30 x 30 x 20 [m]
Antal ben	4 st
Diameter ben	Cirka 6 m per ben
Fundamentdiameter med erosionskydd	4 x 34 [m]
Bottenanspråk per fundament	120–170 [m ²]
Bottenanspråk per fundament inkl. erosionskydd	5 500 [m ²]



Figur 4 - Exempel på en kompressorplattform. (källa [WPD](#)).

2.6 Gasrening

Beroende på typ av elektrolysör och krav på gasens renhet vid slutanvändning på land kan vätgasen behöva renas innan den leds vidare till rörledningssystemet och eventuell kompressor. De främsta orenheterna som kan finnas är vatten och små mängder syre. Om alkalisk elektrolys används kan även lutrester finnas kvar i gasen som behöver avlägsnas. Orenad vätgas som har lägre kvalitet kan ge upphov till risker relaterade till korrosion på material men även minska effektiviteten på grund ut av vatten ansamlas i systemet.

För att uppnå mycket hög gasrenhet (>99,999 vol-%) kan syre och kvarvarande fukt avlägsnas med en katalytisk bädd för deoxygenering och ett adsorptionssystem. Syre avlägsnas i en exoterm reaktion där vätgas reagerar med kvarvarande syre för att bilda vatten.

Fukt kan separeras genom en tvillingtornstork, där vätgas passerar över en adsorbentbädd. De två tornen alternerar i drift, eftersom adsorbenterna har en begränsad kapacitet och behöver regenereras för att adsorbera mer fukt. Vattenkondensat från gastorkning kan samlas upp och cirkuleras tillbaka tillsammans med råvattnet till vattenbehandlingen eller återföras till havet.

Eventuella gasreningssystem kommer vid behov att anläggas i anslutning till elektrolysörerna ovanpå turbinplattformarna, eller i anslutning till kompressorer vid en kompressorplattform.

2.7 Stödsystem

De huvudsakliga stödsystemen som behövs för vätgasproduktion är kylvatten, kvävgas och tryckluft.

2.7.1 Kylsystem

Kylning behövs i flera av de beskrivna processtegen. En stor del av elektrolysörernas kapacitet går förlorad i form av värmeförluster som måste kylas för att hålla elektrolysörens driftstemperatur. Varje turbinplattform kommer att ha ett separat kylsystem. Processteg som genererar värme och har behov av kylning utöver själva elektrolysstacken är likriktning och transformering, gaskylning, gasrening och eventuell kompression. För att kyla vätgasset kan luftkylning, vattenkylning och/eller passiv vattenkylning användas. Hela vätgasset behöver inte kylas med samma teknik utan kan vara olika för olika processteg i systemet.

Luftkylning sker genom att fläktar för bort värmen från den uppvärmda enheten. Denna lösning är mer energikrävande än vattenkylning. Luftkylning och vattenkylning kan kombineras där luftkylning kan användas för processdelar som har lägre kylbehov.

Vid vattenbaserad kylning används ett primärt slutet kylsystem i kombination med ett sekundärt system. Det primära systemet är vanligtvis ett slutet system som cirkulerar en kylvätskelösning mellan den komponent som ska kylas och en värmeväxlare. Värmeväxlaren kyls i sin tur av ett sekundärt system som använder havsvatten. Havsvattnet tas upp via ett eller flera vattenintag och filtreras från sand och andra partiklar. Efter att ha cirkulerat i värmeväxlaren leds det uppvärmda havsvattnet tillbaka i havet. Vattnet som släpps ut uppskattas ha en temperatur om cirka 15 grader högre än det intagna havsvattnet. System för att förhindra biologisk påväxt i rörsystem kan förekomma. Preliminär mängdberäkning av kylvattennyttjande visas i Tabell 3 och Tabell 4 för varje turbin, hela parken per timme samt årsbasis.

Passiv vattenkylning sker genom att den slutna kretsens värmväxlare enhet placeras direkt i havet där den kyls med hjälp av naturlig konvektion från havsvattnet. Den slutna kretsens flöde delas upp i flera mindre rör i syfte att öka ytan mot havsvatten vilket resulterar till högre värmeutbyte. Ju lägre temperatur och högre flödes hastighet vattnet har desto bättre kylning erhålls. Fördelen med denna teknik är att den erfordrar mindre pumparbete och upptar inte lika mycket plats på plattform som konventionell vattenkylning, en nackdel är att det är en ny teknik. Den krävda totala bottenarealen för denna teknik skulle ligga på cirka 5000 m² för att kyla hela parken, dvs en enhet per turbin.



Figur 5 - Exempelbild av passiv vattenkylningsmodul (Källa: [Future technology](#)).

2.7.2 Kvävgastillförsel

Vätgas är explosivt i ett brett koncentrationsintervall i luft på grund av luftens syrenehåll men är inte reaktivt med kvävgas. Kvävgas används därför för att säkerställa en säker miljö i flera av processdelarna vid vätgasproduktion, främst vid start och stopp av elektrolysörer och eventuellt kompressorer. Beroende på teknikval kan även kvävgas behövas till kompressorer under drift för att tätas systemet.

Kvävgas kommer transporteras och lagras i flytande form vid varje plattform för att förse vätgasanläggningarna. Efter inertering ventileras kvävgasen ut till atmosfären via ventilationsrör. Luften består till stor del av kvävgas (78%) därför ger utsläpp av kvävgas ingen påverkan vid normala atmosfäriska tryck och öppet utrymme.

2.7.3 Tryckluft

Tryckluft kommer att användas för att driva pneumatisk utrustning, såsom styrventiler och andra ställdon i flera olika delar av elektrolysprocessen och tillhörande system. Tryckluftssystemet inkluderar eldrivna luftkompressorer i anslutning till övriga processdelar för vätgasproduktion.

2.8 Byggnad

Vätgasproduktionssystemen kommer huvudsakligen att anläggas som modulära containerlösningar ovanpå turbinplattformarna (se även avsnitt 6.1 Underhåll allmänt). Elektrolysrstackar och kringutrustning anläggs i separata containermoduler med en standardstorlek om 20 eller 40 fot vardera. Beroende på vilken processutrustning som under detaljprojektering bedöms vara nödvändig att anlägga ovanpå turbinplattformarna kan antalet containrar, övrig utrustning och dess utformning variera.



Figur 6 - Exempellayout på en turbinplattform varpå vätgasproduktionen kommer att ske (Källa: [AquaVentus Förderverein e. V. / Jakob Martens Studios](#)).

De konstruktionsdelar som uppförs för att på något vis hantera vätgas kommer att vara utrustade med gasdetektorer och gaslarm, och elektrolysörer kan även kopplas så att de automatiskt stängs av om en olycka som leder till ett större läckage skulle inträffa. Ventilationsystem kommer att installeras vid behov i slutna utrymmen för att ventileras ut gas om större koncentrationer ansamlas,

vilket i kombination med högt belägna ventilationsöppningar och vätgasens låga densitet gör att gasen snabbt stiger uppåt och ut från dessa inneslutningar. Detta minimerar risken för att explosiva koncentrationer kan uppstå. Ventilationsrören för vätgas och syrgas kommer att placeras på ett tillräckligt avstånd från ventilationsintag för att förhindra att vätgas eller syrgas kan cirkulera tillbaka in i utrymmena. De flesta byggnaderna på turbinplattformen kommer sannolikt bestå av containermoduler.

Utformning av säkerhetssystem, säkerhetsavstånd och säkerhetsåtgärder kommer att baseras på riskanalyser, släckvattenutredningar och simuleringar där olika riskincidenter analyseras.



3. Förbrukning, utsläpp och produktion

I detta kapitel beskrivs förväntad vattenförbrukning, kemikaliehantering samt utsläpp till vatten och luft. Preliminära mängdberäkningar av el, vätgas, syrgas, rejektvatten, råvatten och kylvatten visas i Tabell 3 och Tabell 4 för varje turbin, hela parken per timme samt årsbasis.

3.1 Vattenförbrukning

Vid produktion av ett kilo vätgas genom elektrolys förbrukas ca 9–10 kg rent processvatten. För att erhålla den vattenrenhet som krävs kommer dock ett större vattenflöde än vad som förbrukas att tas upp, där vattenreningen koncentrerar havsvattnets salter, mineraler, organiska föreningar till ett rejektvattenflöde som släpps tillbaka till havet. Preliminär mängdberäkning av råvattennyttjande visas i Tabell 3 och Tabell 4 för varje turbin, hela parken per timme samt årsbasis.

Utöver råvattenintaget till elektrolysprocessen kommer även kylvatten att användas för att leda bort värmeförlusterna. Kylvattenflödet kommer att värmas upp med cirka 15 grader innan det leds tillbaka till havet. Kylbehovet är som störst vid slutet av vätgasproduktionssystemens tekniska livslängd. Preliminär mängdberäkning på kylvattennyttjande visas i Tabell 3 och Tabell 4 för varje turbin, hela parken per timme samt årsbasis. Eftersom vätgasproduktionen är proportionerlig mot vindturbinernas produktionsmönster och elektrolysörernas effektivitet kommer vattenförbrukningen att variera på motsvarande sätt.

3.2 Kemikalier

Det fullständiga behovet av kemiska produkter är inte känt i dagsläget. Därför kan alla eller vissa av dessa kemikalier som presenteras nedan komma att bli inaktuella i senare skede av projektet.

Beroende på kylsystemens utformning kan kylmedia behövas för att minimera risk för frysning som kan uppstå vid placering i kallt klimat. Eventuell kylmedia kommer i så fall att finnas i stängda kylkretsar, och ingen kylmedia konsumeras i processen. Kylsystemen utformas för att minimera risk för läckage av eventuell kylmedia. Kylmedia består vanligtvis av glykolbaserade blandningar i vatten. Mängder av eventuell kylmedia beror på kylsystemens tekniska utformning och bestäms därför senare under detaljprojekteringen.

Vissa vattenreningstekniker medför hantering av basiska och sura lösningar. Jonbytarmembran kräver en kontinuerlig mängd sura och basiska lösningar för att regenerering av jonbytaren. Omvänd osmos har behov av sura och basiska lösningar ett fåtal gånger per år för att tvätta av beläggning som skapas på membranen efter en visstids drift. Dessa membran kan antingen rengöras på plats eller bytas ut och skickas i väg för rengöring. Vid fallet där man byter ut membranen krävs inga kemikalier på plattformen och i fallet där rengöring görs på plats kan en mängd av 80–400 kg behöva lagras på plattformen. Lut (NaOH) och citronsyra är exempel på aktiva substanser i tvättlösningarna. Det är svaga lösningar med någon enstaka viktprocent av kemikalierna. Dessa vattenreningstekniker beskrivs i kapitel 2.3. Om teknikval görs som medför hantering av sura och basiska lösningar kommer hanteringen av detta att ske med största möjliga hänsyn till omgivande miljö.

Om alkalisk elektrolys väljs som elektrolysteknik kommer lut att hanteras i elektrolysprocessen. Lut konsumeras inte i processen, men kan behöva fyllas på i och med att små mängder lut försvinner ur systemet med den fuktiga gasen som produceras. Eventuell hantering av lut kommer



att ske under väletablerade underhållsrutiner där risker för läckage och eventuell påverkan på omgivande miljö minimeras.

Rörliga delar i systemet kan ha behov av smörj- och/eller kyloljor. Där det finns risk för oljeläckage kommer olika passiva och aktiva system installeras för att säkerställa att inget oljeläckage till miljön förekommer. Det kan till exempel röra sig om oljeavskiljare, tråg för uppsamling av spill och larm av olika slag.

3.3 Utsläpp till vatten och luft

3.3.1 Utsläpp till luft

För varje kilo vätgas produceras ca 8 kg syrgas. Syrgasen som produceras i elektrolysörerna kommer att ventileras ut till luft genom ventilationsrör i anslutning till elektrolysörsystemen vid en temperatur om cirka 40 grader. Mängden syrgas som produceras är proportionerlig till vindturbinernas produktionsmönster och elektrolysörens livslängd precis som vätgasproduktionen. Totala årliga mängden syrgas som släpps ut till atmosfären redovisas i Tabell 4.

Kvävgas kommer att användas för att rensa systemet från luft, syrgas och vätgas för att kontrollera säkerheten i den interna miljön vid underhåll och nödstopp. Gasen ventileras sedan till atmosfären via ventilationsrör. Mängden kvävgas som används vid varje underhållsstopp bedöms kunna uppgå till ca 2 000 Nm³ (2500,7 kg) per elektrolysörsystem. Hur ofta kvävgas används i systemet beror av driftmönstret samt planerat och oplanerat underhåll.

Ventilering eller fackling av vätgas utgör en integrerad del av säkerhetssystemet för vätgasproduktionsanläggningar. Det utförs vid planerat eller oplanerat underhåll samt vid nödstopp. Vid fackling antänds vätgasen vid utloppet, medan ventilering innebär att vätgasen släpps ut direkt i atmosfären utan att antändas. För det aktuella systemets storlek och omfattning anses fackling av vätgas ej vara nödvändigt. I stället bedöms ett välplanerat ventilationssystem vara tillräckligt för att säkerställa säkerheten.

Komponenter och processenheter produceras på ett sådant sätt att risken för läckage minimeras, men det kan fortfarande uppstå små läckage i systemet. Vid eventuell ventilering eller läckage stiger vätgasen snabbt upp mot atmosfären på grund av dess låga densitet vilket betyder att vätgasen ej ansamlas på marknivå.

3.3.2 Utsläpp till vatten

Processvattnet som spjälkas i elektrolysörerna kommer att behandlas innan det används, vilket ger upphov till ett rejektvatten som kommer att återföras till havet. Rejektet innehåller en högre koncentration av salter, mineraler och organiska föreningar än vad råvattnet har vid intag. De flesta teknikerna ger upphov till 25 – 80 % rent vatten till processen och 20–75 % rejektvatten som återförs till havet. En lägre andel rejekt innebär att en mindre mängd råvatten krävs, men det innebär också en högre koncentration av salter, mineraler, organiska föreningar i rejektet som återförs. Salthalten i Bottenviken ligger mellan 0,3–0,5 vilket motsvarar råvattnets inloppskoncentration. Om antagande görs att 30 % av råvattnet blir till rejektvatten och resterande 70% blir processvatten resulterar det till att rejektvattnet har en saltkoncentration på 1–1,7 % innan det återförs till havsvattnet.



Kylvatten kommer att värmas upp i kylsystemet. Temperaturökningen på kylvattenutflödet kommer att bli maximalt ca 15 °C högre än omgivande havsvatten. Rejektvatten från processen kommer att släppas ut tillbaka till havet tillsammans med kylvatten och kommer utgöra runt 5 % av den totala vattenmängden som återförs till havet vid full kapacitet. Preliminär mängdberäkning av kyl- och rejecktatten visas i Tabell 3 och Tabell 4 för varje turbin, hela parken per timme samt årsbasis.

3.4 Sammanfattning vatten, vätgas och syrgas

I Tabell 3 presenteras förväntade maximala flöden för vätgasproduktion, vattenförbrukning samt utsläpp till luft och vatten på timbasis för varje enskild turbin och hela vindkraftparken. De intervall som anges tar dels hänsyn till stackarnas tekniska degradering längsmed livslängden och till olika tekniska lösningar för vattenrening.

De beräknade flödena har baserats på fullasttimmen för en installerad effekt om 30 MW per turbin och elektrolysörsystem. Värdena är beräknat för en verkningsgrad på elektrolysören på 60–75 %. Den slutliga anläggningsstorleken kan beroende av turbinernas installerade effekt komma att bli mindre än 30 MW eftersom andra processteg och stödtjänster kräver energi.

Tabell 3 El, vatten, vätgas och syrgas per fullastimme

Parameter	Per turbin och elektrolysörsystem	Hela projektområdet	Kommentar
Eltillförsel:	30 MW	3 GW	
Vätgasproduktion:	0,54 – 0,68 [ton/h]	54 – 68 [ton/h]	Till rörledningssystemet
Syrgas:	4,3 – 5,4 [ton/h]	430 – 540 [ton/h]	Släpps ut till luft vid 40 °C
Rejecktatten:	3 – 18 [m ³ /h]	300 – 1 800 [m ³ /h]	Återförs till hav med kylvatten
Råvatten:	8 – 25 [m ³ /h]	800 – 2 500 [m ³ /h]	Havsvattenuptag
Kylvatten:	400 - 700 [m ³ /h]	40 000 – 70 000 [m ³ /h]	15 °C temperaturökning från havsvattenuptaget

I Tabell 4 presenteras förväntade mängder vätgas, utsläpp till luft och vatten samt vattenförbrukning under ett genomsnittligt år. Mängderna är baserade på vindturbinernas förväntade produktionsmönster.

Tabell 4 El, vatten, vätgas och syrgas per år

Parameter	Per turbin och elektrolysörsystem	Hela projektområdet	Kommentar
Eltillförsel:	0,1 TWh	10 TWh	
Vätgasproduktion:	1,9 – 2,3 [kton/år]	190 – 235 [kton/år]	Till rörledningssystemet
Syrgas:	15 – 19 [kton/år]	1 500 – 1 900 [kton/år]	Släpps ut till luft vid 40 °C
Rejecktatten:	11 – 64 [tusen m ³ /år]	1 100 – 6 400 [tusen m ³ /år]	Återförs till hav med kylvatten
Råvatten:	28 – 85 [tusen m ³ /år]	2 800 – 8 500 [tusen m ³ /år]	Havsvattenuptag
Kylvatten:	1,5 – 2,5 [miljoner m ³ /år]	150 – 250 [miljoner m ³ /år]	15 °C temperaturökning från havsvattenuptaget



4. Rörledningssystem

I detta avsnitt beskrivs rörledningssystem för transport av vätgas från decentraliserade elektrolysörer, placerade vid varje vindkraftverk inom Polargrund Offshore via ett internt rörledningssystem, ut till exportledningar mot land. I Teknisk beskrivning för vindkraftparken visas parklayout, dvs var inom projektområdet turbinerna kan komma att placeras, samt exempel på hur internledningsnät för elproduktion och transformatorstationer kan komma att se ut (Skyborn, 2024, Teknisk beskrivning Polargrund offshore, bilaga C till ansökan om tillstånd). Ett rörledningssystem för vätgas kan antas anläggas på samma sätt vad gäller såväl dragning av kablar/rör som placering och antal transformator-/ kompressorstationer.

Exakt storlek på bottenanspråk avseende rörledningar för den producerade vätgasen kommer att bero på flera faktorer, framför allt verkens placering och bottenförhållanden. Baserad på ett scenario med 120 installerade vindkraftverk estimeras bottenanspråket av vindparkens interna rörledningsnät vara ca 4 km² (Tabell 6).

Nedan listas en översikt över de olika aktiviteter som genomförs under rörledningens livscykel.

- Förprojektering
- Detaljprojektering
- Uppbyggnad av infrastruktur och logistik
- Rörledningsförläggning
- Avtestning och kontroll
- Idrifttagande av rörledningssystemet
- Fortlöpande underhåll
- Avveckling av rörledningssystemet

4.1 Teknisk utformning

4.1.1 Generellt

Rörledningarna kommer att detaljprojekteras av upphandlad teknisk entreprenör i ett senare skede av projektet. Först då fastställs rörledningsdesign och optimal rörledningsutformning samt hur dessa bäst stabiliseras på havsbotten.

För att säkerställa att det interna rörledningssystemet har tillverkats, installerats samt genomgått nödvändiga tester enligt gällande krav, kommer enligt AFS 2017:3 ett granskande tredjepartsorgan att anlitas. Detta tredjepartsorgan kommer att ha i uppgift att övervaka rörledningsverksamheten i projektets samtliga faser. När kravuppfyllelseerna under respektive projektfas har bekräftats kommer organet att upprätta ett redogörelsedokument.

De nationella lagar och regler som är lämpliga för rörläggning till havs omfattar sällan specifika tekniska krav utan hänvisar oftast till internationellt accepterade standarder och normer. DNV-GL:s standard DNVGL-ST-F101-Submarine Pipeline Systems är ett exempel på standard som kan komma att användas vid konstruktion och anläggning av rörledningssystemet inom Polargrund Offshore. OS-F101 innehåller riktlinjer och kriterier avseende gasledningars konstruktion, material, fabrikation, tillverkning, montage, avtestning och driftsättning samt drift och underhåll. I Tabell 5 listas de normer och standarder som kan komma att beröras i projektets tekniska design av rörledningssystemet.



Tabell 5. Standarder och riktlinjer som kan komma att appliceras i samband med rörledningssystemets projektering, konstruktion och avveckling.

Internationellt erkända standarder och riktlinjer
AFS 2017:3 Användning och kontroll av trycksatta anordningar
ASME B31.12 Hydrogen piping and pipelines
EIGA IGC Doc 121/12 (2004,2014): Hydrogen transportation pipelines
DNVGL-ST-F101 , Submarine Pipeline Systems
DNV-RP-F102 Pipeline field joint coating and field repair of linepipe coating
DNV-RP-F103 Cathodic protection of submarine pipelines by galvanic anodes
DNV-RP-F105 Free spanning pipelines
DNV-RP-F106 Factory applied external pipeline coating for corrosion control
DNV-RP-F107 Risk assessment of pipeline protection
DNV-RP-F110 Global buckling of submarine pipelines
DNV-RP-F111 Interference between trawl gear and pipelines
DNV-RP-E305 On-bottom stability design of submarine pipelines

4.1.2 Tekniska specifikationer och dimensionering

Rörledningar består normalt av plaströr och sammansvetsade stålrör, båda med någon form av yttre mekanisk skydd. Baserat på preliminärt förslag på utformningen av projektområdet, samt uppskattad årlig produktion av vätgas har en preliminär estimering av rörledningarnas specifikationer gjorts se Tabell 6.

Tabell 6. Preliminära specifikationer för rörledningar

Komponent	Information
Konstruktionsmaterial	Plast eller stål
Isolationsmaterial	Plast
Mekaniskt skydd	Yttre armering av stål och betong
Rördiameter	70–600 [mm]
Konstruktionstemperatur	-10/+40 [°C]
Uppskattad rörlängd, 120 vindkraftverk	400 [km]
Uppskattat bottenanspråk av rörledning inkl. diken, grusstöd, 120 vindkraftverk	4 000 000 [m ²]
Volym av vätgas, internt rörledningssystem, 120 vindkraftverk	12 500 [m ³]
Vikt av vätgas, internt rörledningssystem, 120 vindkraftverk	33,6 [ton]

Under anläggningsfasen kan exempelvis en rörledningsplog användas för att lägga rör. Den kan, beroende på havsbottnens karaktär, plöja 500 meter i timmen och skapa en grop som är upp till 2,5 meter djup. Bredden på botten som berörs fysiskt under anläggningsskedet uppskattas till 15 m och bredden på den färdiga anläggningen för ledningen, inklusive eventuella skydd, uppskattas till 10 m.

Ett produktionsgrenrör är en undervattenstruktur som består av ventiler och rör som är designade för att blanda och rikta den producerade vätgasen inom vindparken ut till en eller flera flödesledningar ut från vindparken. Ett till två produktionsgrenrör kan komma att användas inom vindparken. Förgreningsrörets yttre dimensioner och havsbottenyta som berörs för färdig anläggning visas i Tabell 7.



Tabell 7. Förgreningsrörets yttre dimensioner och havsbottenanspråk

Antal	1–2
Diameter	10–15 m
Bottenanspråk	160–360 m ²

4.1.3 Rörledningsmaterial

För att klara av det tryck som appliceras på vätgasen och därmed rörledningssystemet måste rörledningarna uppnå vissa önskvärda fysiska egenskaper avseende seghet, duktilitet och svetsbarhet. Ett material som är lämpligt till syftet är låglegerat stål med hög hållfasthet bestående av järn (98–99 vikt%), kol, mangan samt andra legeringskomponenter som exempelvis titan (Tsiklios C., et., al. 2022).

Tabell 8 visar relevanta standarder och materialbeteckningar som kan appliceras för design och framtagning av stålmaterial för vätgasrörledningar. Siffrorna i tabellen under stålqualität motsvarar stålets lägsta elasticitetsgräns som kan användas för att kunna indikera den minsta dragspänningen som en rörledning kan motstå innan materialet deformeras permanent.

Tabell 8. Det tvåsiffriga värdet efter X under API 5L representerar stålets minsta elasticitetsgräns i kilopund per kvadrattum. Likaså representerar det tresiffriga värdet efter L under ISO/EN stålets minsta elasticitetsgräns i megapascal.

Organisation	Standard/specifikation	Stålqualität				
API	API 5L	X42	X46	X52	X56	X60
ISO	ISO 3183	L290	L320	L360	L390	L415
EN	EN 10, 208	L290	L320	L360	L390	L415

4.1.4 Skydd av rörledningar

För att skydda stålledningarna mot korrosion appliceras ett utvändigt korrosionsskydd. Detta skydd utgörs av en plastbeläggning, exempelvis polyeten, och beläggningen appliceras av rörtillverkaren. För att rörledningarna ska kunna svetsas under konstruktion lämnas ca 240 mm av rörets ändrar obehandlade. När svetsningsarbetet är genomfört appliceras korrosionsskyddet på svetsfogarna för att skydda dessa.

Genom att förse rörledningen med ett yttre skikt av betong ökas vikten på ledningen och därmed tyngs den ner. Detta stärker rörledningen mot instabilitet från externa laster, så som undervattensströmmar, och interna laster från mediet vid drift. Betongbeläggningen appliceras utanpå det tidigare applicerade korrosionsskyddet. Även här lämnas en del av rörets ändrar obehandlade för att svetsarbeten ska kunna genomföras vid konstruktion.

Ytterligare korrosionsskydd i form av ett sekundärt katodiskt skydd (galvaniska offeranoder) kan appliceras på ledningen för att skydda rörledningen om det yttre korrosionsskyddet skulle skadas. Flera parametrar såsom stålmaterial, beläggningsmaterial, omgivningens elektrolytiska egenskaper, driftförhållanden samt rörledningens förväntade livslängd, påverkar utformningen av det katodiska skyddet.

4.1.5 Erosionsskydd och stöd vid ojämn batymetri

Rören kommer att utsättas för olika påfrestningar såsom vågrörelser och strömmar. Beroende på vilka bottenförhållanden som råder i projektområdet kan åtgärder även behöva vidtas för att erhålla en jämn botten att anlägga ledningen på, för att undvika belastning på grund av ojämn botten. Exempel på åtgärder för att grundlägga och/eller skydda rören är betongstöd, stenläggning, schaktning och dikning.

Grus- och stenläggning används över specifika sträckor för att höja havsbottennivån där rörledningsspänn fria från kontakt med havsbotten annars skulle uppstå på grund av ojämn batymetri. Genom att korta det fria spannen minskas risken för att rörledningens gränser för statisk överbelastning och utmattning överskrids. Grus- och stenläggning lämpar sig för kortare sträckor. För längre sträckor kan man i stället förlägga rörledningen i diken. Vanligen används en rörledningsplog som skär en V-formad skåra i havsbotten där rörledningen sedan läggs ner se Figur 7. I grunt vatten kan dikningsarbetet även utföras före nedläggning av rörledningen. Storleken på en rörledningsplog kan vara ca 22 meter lång samt väga 200 ton (Nord Stream, 2011).



Figur 7 - Dikning med rörledningsplog. (källa: [Nord Stream, 2011](#)).

4.1.6 Korsning av befintlig havsbotteninfrastruktur

Undersökningsarbeten kommer att genomföras i projektområdet för att bland annat identifiera och undersöka befintlig infrastruktur i området. Vanliga åtgärder involverar följande:

- Stenvallar
- Betongmadrasser
- Kapning och avlägsning

4.2 Materiallogistik

Rörledningarna kommer att tillverkas i sektioner på land och beläggas invändigt med sprutmålning och utvändigt med rostskyddsbeläggning samt betongbeläggning. Efter tillverkning och beläggning kommer rören att transporteras till någon utvald hamn innan pålastning för uttransport till Polargrund Offshore. Transporten från utvald hamn till utläggningsfartyget inom vindparken sker normalt med transportpråmar se Figur 8.



Figur 8 - Exempel på rörläggingsfartyg (källa: [Mark J. Kaiser, 2020](#)).

På grund av att gasledningarna i marina miljöer kan utsättas för hårda fysiska och kemiska förhållanden krävs vissa åtgärder för att motverka eventuella konstruktionsproblem. Inom områden där havsbotten är ojämn kan gasledningarna påverkas av statisk överlast på grund av egenvikt där rören har fria spann. För att minska denna överbelastning och att tillåta utmattningsgränsers överskridanden vid fria spann används stenmaterial för att jämna ut botten och minska spannlängden.

Stenmaterial kan också användas för att stabilisera gasledningarna på havsbotten samt vid korsningar med annan havsbotteninfrastruktur. För att skydda ledningen från påverkan av vågor och strömmar så utförs antingen grus/stenläggning eller dikning av ledningarna i havsbotten. Vid dikning kan en plog användas. Plogen sjösätts och styrs till önskad position på havsbotten med hjälp av en fjärrmanövrerad farkost (ROV) och ekolod.

4.3 Rörläggning

Två olika typer av rörläggingsfartyg kan bli aktuella i projektet, ankarpositionerat och dynamiskt positionerat fartyg.

Ett ankarpositionerat fartyg använder ankare och vajrar, i förbestämda positioner, för att hålla fartyget stabilt på önskade koordinater. Ankarna placeras ut med hjälp av separata ankarhanteringsfartyg speciellt utrustade för detta syfte. Ett dynamiskt positionerat fartyg å andra sidan styrs med ett antal individuellt kontrollerade propellrar, även kallade Thrustrar. Propellerna styrs i sin tur av ett datoriserat styrsystem som kan hålla fartygets position med mycket stor noggrannhet.



Rören som levereras med transportpråmar lyfts över till rörlägningsfartyget med rörtransportfartygs kran. Ett säkerhetsavstånd kommer att föreslås med syftet att hålla rörlägningsarbetet skilt från övrig sjöfart i området.

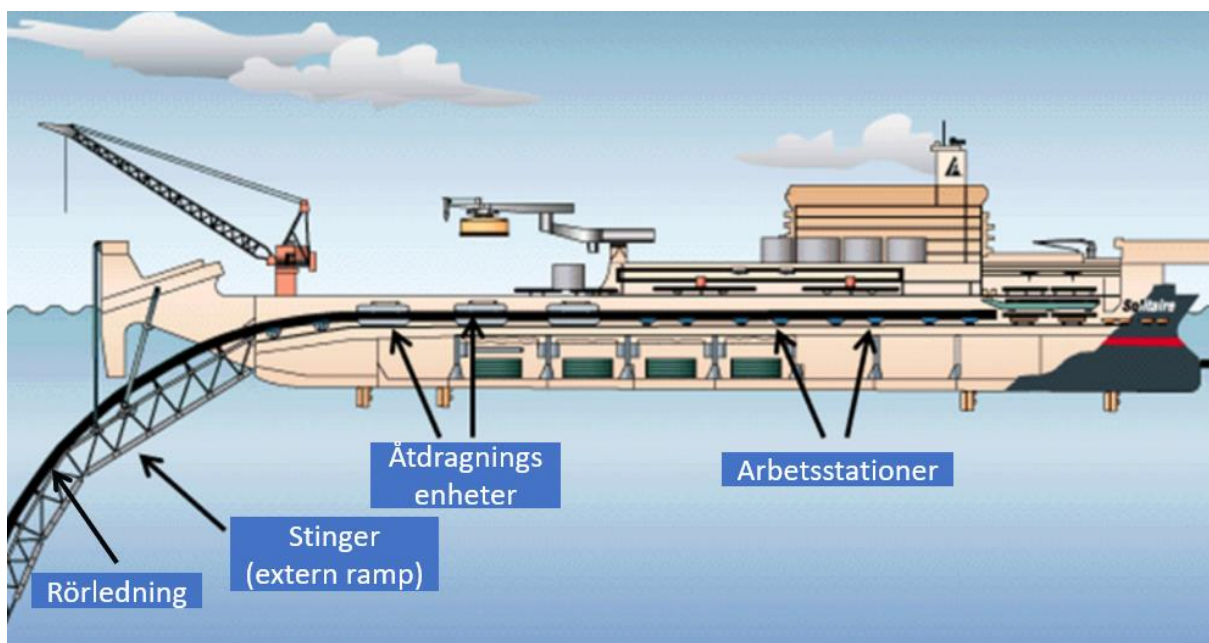
Det finns i huvudsak två system som är relevanta för rörläggning till havs, så kallade "S-läggningssystem" samt "J-läggningssystem". Det förstnämnda kommer sannolikt att användas inom Polargrund Offshore.

I ett J-läggningssystem lyfts rördelar upp i en nästan vertikal ramp, där rörskarvar svetsas till den sjöfarande röret. Rampens vinkel justeras för att vara i linje med ledningens kontakt till havsbotten för att minimera böjningen av röret. J-läggmetoden lämpar sig för djupt vatten eftersom röret lämnar rampen i en nästan vertikal position och ledningen böjs bara en gång under installationsfasen vid havsbotten. Denna minskade böjning är fördelaktig för installation av ledningar som är känsliga för utmattning.

I ett S-läggningssystem svetsas rörskarvar samman ombord på rörlägningsfartyget i en horisontell produktionslinje. Det sjögående röret stöds av en stingerkonstruktion för att kontrollera storleken på radien när rören böjer sig mot havsbotten. Stingerkonstruktionen är vanligtvis installerad i aktern på fartyget och kan vara över 100 meter lång beroende på kriterierna som är nödvändiga för att kunna hålla böjspänningen inom gränsvärdena.

Exempel på komponenter som ett S-läggningssystem består av är åtdragningsenheter (stabilisering av rören under svetsningsarbeten), extern ramp (minskning av rörledningsspänningar då de förs ner mot havsbotten), samt positioneringssystem. Rörlägningsfartyget framåtförflyttning sker med ett ungefärligt avstånd som motsvarar rörens längd som hissas ner till havsbotten.

På grund av den höga produktionshastigheten och möjligheten att installera betongbelagda rör anses S-läggningssystemet vara lämpligt för rörinstallation i grunt till semidjupt vatten.

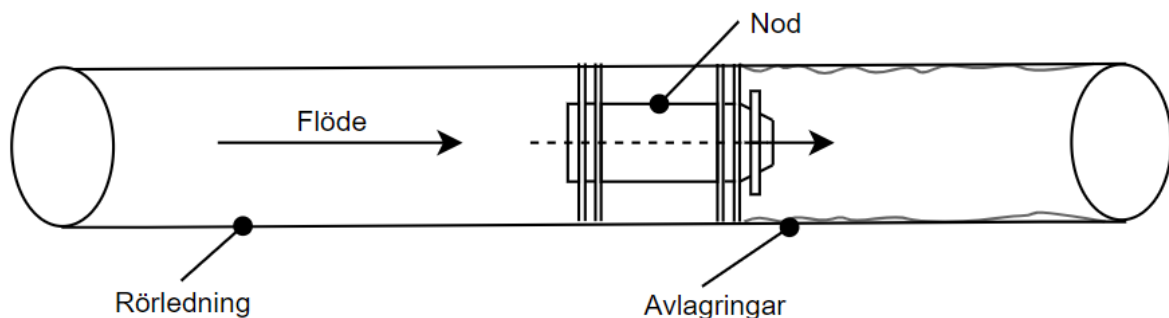


Figur 9 - Exempel på utlägningsfartyg med S-läggningssystemet (Källa: [modifierad efter Mark J. Kaiser, 2020](#)).

4.4 Rörledningsunderhåll

4.4.1 Invändig rörinspektion

För att rengöra och inspektera rörledningarnas inre delar och därmed förhindra samt kunna övervaka eventuella skador inuti rörledningarna används en inspektionsnod. Dessa består av elektroniska komponenter som ultraljudssensorer, RF-moduler, mätinstrument för mätning av diameter, krökning, tjocklek, tryck, materialförlust och temperatur. Moderna inspektionsnod kan med hög grad av noggrannhet upptäcka avvikelser i rörledningar så som läckage, sprickor och korrosion. Ett typiskt system som hanterar inspektionsnod består av nod, avsändare och mottagare, också kallade stationer för inspektionsnod. Själva nodet är en cylindrisk anordning som färdas längs rörledningen.



Figur 10 - Exempel av inre rengöring av rör.

Inspektioner och annat planerat underhållsarbete av rörledningarna kommer huvudsakligen att utföras under den isfria perioden på året.

4.4.2 Utvändig rörinspektion

Längs rörledningarnas yttre delar inom vindparken kommer regelbundna besiktningar att utföras för att säkerställa rörledningens integritet. Baserat på inspektionen kan underhållsåtgärder i form av exempelvis komplettering av erosionsskydd bli aktuellt. Yttre inspektioner av rörledningar till havs utförs med hjälp av en fjärrmanövrerad farkost (ROV, Remotely Operated Vehicle). Dessa maskiner är utrustade med bland annat sensorer, kameror och avsökare som inspekterar rörens allmänna tillstånd. Intervaller för planerade inspektioner kommer att fastställas under detaljprojekteringsfasen av projektet.

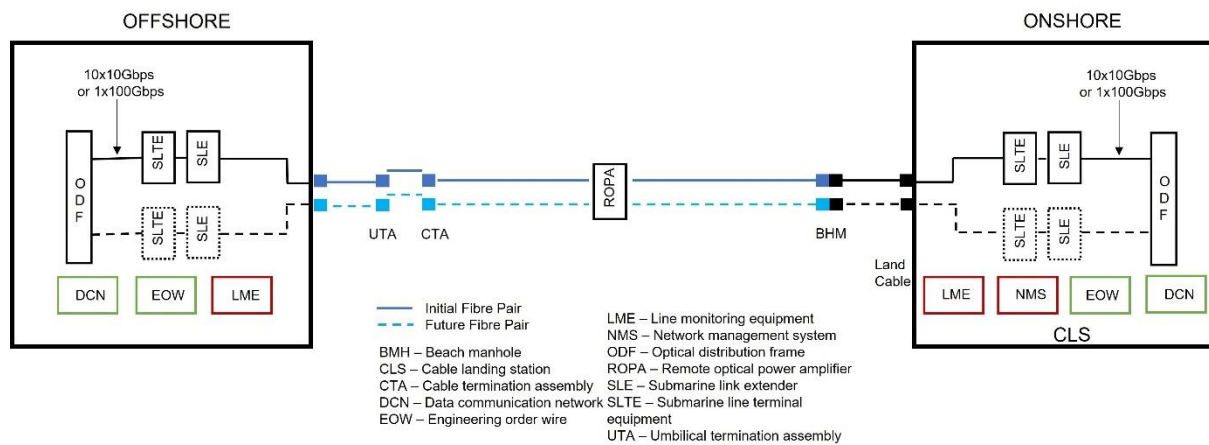
4.5 Kommunikationskablar

Vindkraftverken, elektrolysörerna samt rörledningen inom Polargrund Offshore kräver fjärrövervakning och därmed dataanslutning i realtid till anläggningarna på land. Kommunikationssystem kommer att utvecklas i projektets senare faser för att säkerställa en väl fungerande samordning mellan verksamhetens olika organisationer och anläggningar. Det finns för närvarande två genomförbara alternativ för anslutningar bortom mikrovågsradiofrekvensens horisont, nämligen anslutning via satelliter och anslutning via submarina fiberoptiska kablar. Den förstnämnda anslutningen ger en mindre röst- och datagenomströmning, medan den sistnämnda anslutningen erbjuder mycket högre bandbredd, dock till en högre kostnad.

Vid ett senare skede av projektet kommer ett fiberoptiskt kabelföringssystem att projekteras där förväntad prestanda, bandbredd, anläggningskrav avseende utrymme och effekt, samt synergier med närliggande projekt och anläggningar beskrivs mer i detalj.

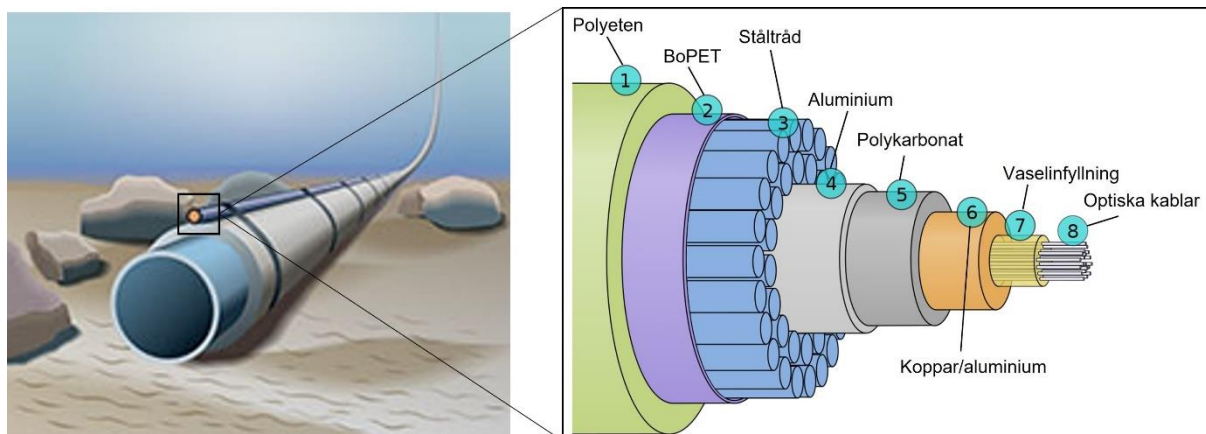
Det submarina fiberoptiska kabelföringssystemet kan antingen bestå av ett s.k. punkt-till-punkt förbindelse, det vill säga ansluten mellan vindparken och någon anläggning på land, eller så kan kabelföringssystemet stödja flera närliggande offshoreanläggningar och dess anslutningar till landbaserade anläggningar.

Designexemplet nedan visar ett tänkbart scenario som kan komma att användas för Polargrund Offshore. Gränssnittpunkterna för systemet definieras i detta scenario vid kommunikationsenheter inom den havsbaserade vindparken samt vid kontrollstationen på land se Figur 11.



Figur 11 - Exempel på fiberoptisk systemdesign (Källa: [modifierad efter Nielsen, 2019](#))

Avseende förläggningen av de fiberoptiska kablarna så kommer dessa sannolikt att monteras på yttersidorna av rörledningarna för vätgastransporten (Figur 12), båden inom vindparken men också från vindparken in mot land. Därmed kommer inte den fiberoptiska kabelförläggningen att ta någon havsbotten i anspråk. Själva kabelförläggningen måste i detta scenario samordnas och projekteras med installation och nedläggning av rörsystemet.



Figur 12 - Den fiberoptiska kablarna kommer sannolikt att monteras på utsidan av gasledningsrören (vänster) (källa: [Omnisens, 2023](#)). Exempel på hur en sådan kabel typiskt innehåller (höger) (källa: [modifierad efter Krause Perin; Jose, 2018](#)).

För att kunna driva och underhålla fiberoptiska kablar under dess livslängd krävs tillgång till underhåll- och reparationsfartyg, tillhörande utrustning så som ROV samt till syftet utbildad

personal. De huvudsakliga kabelskadorna som kan uppkomma och behöver åtgärdas är fysiska skador på grund av trål och ankare, kabelbrott och fiberskador.

4.1 Gas- och branddetekteringssystem och nödavstängning

För att kunna övervaka anläggningarna och rörledningssystemet för att förhindra brand, explosion och gasläckage kommer brand- och gasdetekteringssystem att installeras. Nödavstängningssystem kommer att integreras i säkerhetshanteringssystemet för att snabbt och säkert kunna stänga av anläggningar samt delar eller hela rörledningssystemet. Möjligheter för både manuell och automatisk initiering av nödavstängningen kommer att vara tillgänglig.

Vid det extremscenario där brand eller gasläckage är initierat kommer systemet att automatiskt stänga ner rörledningssystemet omedelbart. Beroende på resultaten som nås i detaljprojekteringen av rörledningssystemet, där eventuella ventiler, enheter och andra stationer inkluderas längs med systemets rörsträckor och därmed delar upp systemet, så kan nödnedstängningen ske i endast påverkade slutna delar av systemet. Detta innebär då att hela systemet inte behöver stängas av samtidigt.

En komplett riskanalys för hela systemet kommer att genomföras under detaljprojekteringsfasen av projektet.



5. Anläggning, drift och avveckling

5.1 Anläggning

Ett koncept för anläggning av vätgasproduktionssystemen är att på land montera stack och kringliggande utrustning modulärt i containrar (se avsnitt 6.1 Underhåll allmänt). För att anläggning och stackbyte ska kunna ske så smidigt som möjligt kan systemet separeras genom att ha stackcontainrar och självstående containrar som rymmer kringliggande system så som vattenbehandling, gasrening och eventuell kompression. För utplacering eller byte av dessa containrar kan installationsfartyg utrustat med lyftkran användas.

5.2 Drift

Ett driftkoncept och säkerhetssystem kommer att utvecklas för att garantera en säker drift av rörledningarna i samtliga driftsituationer. Detta inkluderar bland annat system för övervakning av tryck, potentiella gasläckor, samt andra system för att säkerställa säker drift och skydd av utrustning. Vindparkens drift övervakas och styrs via ett SCADA-system (Supervisory Control And Data Acquisition). SCADA-system styrs normalt sett centralt av ett operatörslag placerade i en övervakningscentral.

Utöver övervakning och säkerhetssystem under drift behövs också kontinuerligt underhåll och service för att säkerställa att komponenter håller under lång tid. Under driftfasen begränsas åtgärder till schemalagd service och underhåll, samt oplanerade reparationer (se avsnitt 6). Oplanerat arbete gäller ofta system eller mindre komponenter som har fallerat. När ett sådant fel inträffar brukar endast ett begränsat område av anläggningen påverkas. Strategier för underhåll och reparationer kommer att tas fram och analyser kommer att utföras för möjliga reparationsscenarier.

5.3 Avveckling

Ett program för avveckling av vindparken, dess enheter för vätgasproduktion samt transport av vätgas via rörledningssystemet kommer att tas fram när vindparken är nära att nå sin driftlivstid. För vätgasproduktionssystemen kommer avvecklingen att samordnas med avveckling av vindturbinerna. De kranfartyg som används för avveckling av vindturbinernas enheter kan användas för avveckling av de modulära enheter som elektrolysörsystemen består av. I den mån det är möjligt kommer materialen att återvinnas enligt de, vid avvecklingens tidpunkt, bästa och mest miljömässigt gynnsamma metoder.

6. Underhåll och service

6.1 Underhåll allmänt

Då den tilltänkta parken kommer att ligga i den del av Bottniska Viken där det normalt förekommer is under vinterhalvåret, så kommer underhåll företrädesvis att utföras under den isfria perioden. Vintertid behöver andra färdmedel än fartyg värderas, exempelvis svävare eller helikopter. Det finns dock kommersiellt tillgängliga SOV kapabla att bryta is på marknaden. Svävare måste vara väl anpassad att transportera personal och material samt vara anpassad att kunna docka mot vindkraftverken. Svävare måste även vara utrustad med radar för att undvika kollisioner med exempelvis vindkraftverk då det är mörkt stor del av dygnet vintertid. Det ska tas i beaktning att det kan bli utmanande att byta huvudkomponenter så som växellådor, vingar, generatorer etc. på vintertid då detta kräver en så kallad Jack-Up fartyg. Det kommer då att krävas isbrytare som röjer runt platsen där Jack-Up fartyget kommer att stå.

Under normala förhållanden kommer transport av personal till och från vindkraftverken att ske via ett CTV-fartyg (Crew Transport Vessel) (Figur 13) eller ett SOV-fartyg (Service Operation Vessel) (Figur 14).



Figur 13 - Exempel på två CTV-fartyg (Källa: [Northern Offshore Services, 2023](#)).



Figur 14 - Exempel på ett SOV fartyg (Källa: [VARD](#), 2023).

Planerat underhåll av vätgasanläggningen kan utföras i samband med service av vindkraftverket för att underlätta logistiken. Intervallen för planerat underhåll är ca 1–2 ggr per år.

Oplanerat underhåll kommer att utföras vid behov. Beroende av omfattning och komplexitet kommer den att utföras av ordinarie underhållspersonal eller av specialister från tillverkaren av vätgasanläggningen.

Stackarna förväntas behöva bytas ut efter 8–10 år på grund av teknisk degenerering. Stackarna anses kunna hålla längre än 10 år men ur ett ekonomiskt perspektiv kan det vara fördelaktigt att byta ut stackarna innan effektiviteten har minskat för mycket. Eftersom vätgasproduktionssystemet anläggs som modulära enheter där stackarna är separerade från övriga system kan stackbytet effektiviseras. Vid stackbyte kommer en kran att användas för att lyfta av de degenererade stackarna och lyfta på de nya stackarna på turbinplattformarna. Större underhåll kan också behövas för vattenreningsenheterna, där exempelvis filter kan behöva bytas eller rengöras och membran kan bytas ut. Intervall för detta beror på typ av teknik på vattenrening.

Utöver underhåll kommer även tillsyn utföras för att upptäcka tecken på läckage eller avvikande ljud, samt säkerställa funktionen i gasdetektorer. Detta kan samplaneras med tillsyn för vindturbinerna.

6.2 Kran på turbinplattformen mellan fundament och torn

Det kommer inte vara nödvändigt att ha en extra kran utöver den befintliga kranen på övergångsstycket för att ta upp material för underhåll av vätgasanläggningen. Normalt är kranens lastkapacitet drygt 1 ton vilket bör vara tillräckligt för att hissa upp material till normala underhåll och reparationsarbeten.