

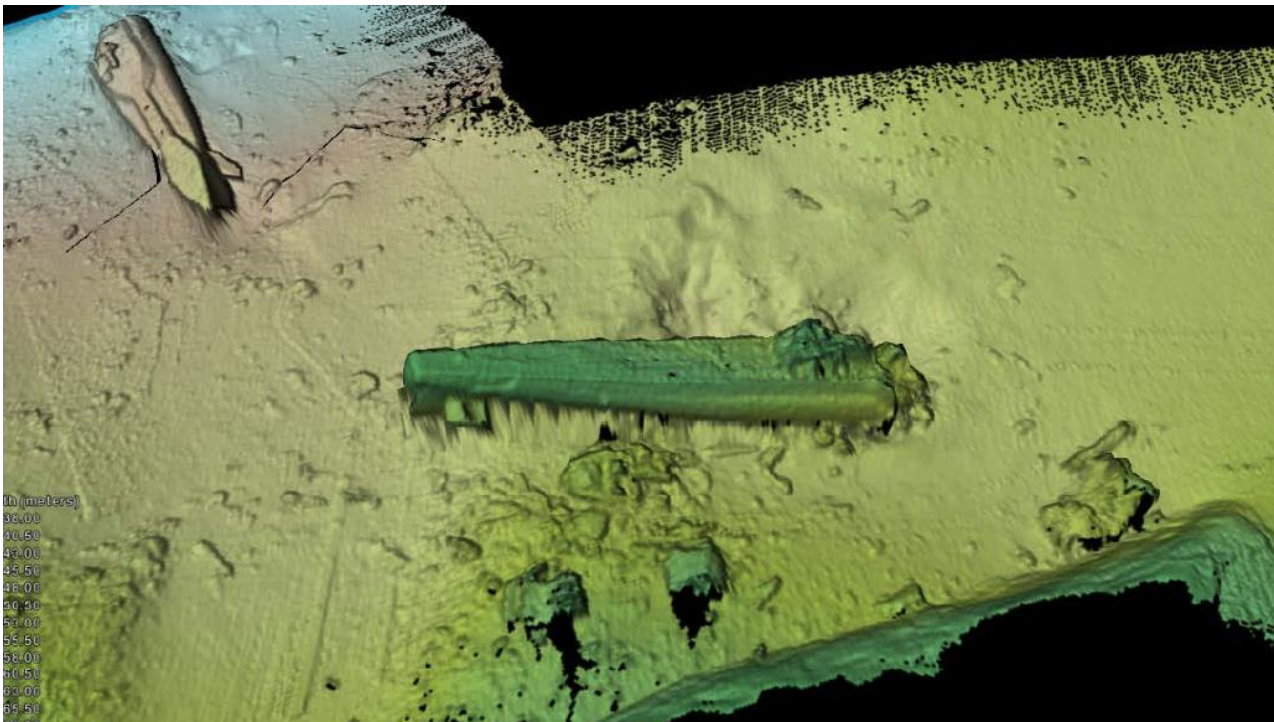
Beregnet til  
**Kystverket**

Dokument type  
**Rapport**

Dato  
**Mars, 2019**

# U864

## NY INFORMASJON OM KVIKKSØLV OG NY TEKNOLOGI FOR HEVING AV LAST



## **U864 NY INFORMASJON OM KVIKKSØLV OG NY TEKNOLOGI FOR HEVING AV LAST**

Oppdragsnavn **U864 Ubåten ved Fedje – ekstern vurdering av ny informasjon og teknologi**  
Prosjekt nr. **1350033092**  
Mottaker **Kystverket**  
Dokument type **Rapport**  
Versjon **001**  
Dato **27.03.2019**  
Utført av **Eivind Dypvik, Søren Knudsen, Marte Braathen, Jetmund Hanssen og Geir Morten Sivertsen**  
Kontrollert av **Aud Helland**  
Godkjent av **Tom Øyvind Jahren**  
Beskrivelse **Denne rapporten inneholder en gjennomgang av tidligere utredninger av forurensning og miljøtiltak i forbindelse med vraket av U864 utenfor Fedje. I tillegg inneholder rapporten en vurdering av ny informasjon om kvikksølv egenskaper og ny teknologi for håndtering av ubåtens kvikksølvholdige last.**

Rambøll  
Hoffsveien 4  
Postboks 427 Skøyen  
0213 Oslo  
  
T +47 22 51 80 00  
F +47 22 51 80 01  
<https://no.ramboll.com>

## INNHALDSFORTEGNELSE

<b>Forord</b>	<b>3</b>
<b>Ordliste</b>	<b>4</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>5</b>
<b>1. Bakgrunn</b>	<b>7</b>
1.1 Om U-864	7
1.2 Utredningshistorikk U-864	9
1.3 Alternative miljøtiltak	12
1.3.1 Alternativ 1. Kun tildekking	12
1.3.2 Alternativ 3 Heving av last og tildekking	13
1.4 Kystverkets anbefaling i 2014	14
1.5 Status i 2019	15
<b>2. Mandat</b>	<b>16</b>
<b>3. Materiale og metode</b>	<b>17</b>
3.1 Litteratursøk	17
3.2 Møter og informasjonsinnhenting	17
3.3 Metodisk gjennomgang med risikoanalyse	18
3.4 Rapportering	18
<b>4. Resultater og diskusjon</b>	<b>19</b>
4.1 Tildekking	19
4.1.1 Informasjonsinnhenting fra eksterne aktører knyttet til tildekking og kvikksølv	20
4.1.2 Kvikksølvforurensning ved ubåten.	22
4.1.3 Utforming av tildekkingslaget over U-864	23
4.1.4 Tildekkingsmaterialer og tildekkingskomponenter	25
4.1.5 Geotekniske problemstillinger	26
4.1.6 Oppsummering	26
4.2 Kvikksølvkjemi	26
4.2.1 Redokskjemi i sedimentene	26
4.2.2 Ferskvann versus sjøvann	27
4.2.3 Metylering av kvikksølv	28
4.2.4 Gassdannelse	31
4.2.5 Oppsummering	31
4.3 Heving av last	32
4.3.1 Informasjonsinnhenting fra eksterne aktører	32
4.3.2 Tilgang til lasten gjennom mudring	40
4.3.3 Mengden kvikksølv fortsatt lagret i kjølen	42
4.3.4 Identifisering av kvikksølv	42
4.3.5 Operasjonelle modifiseringer og endringer	43
4.3.6 Ytterligere utredninger knyttet til alternativ 3. Heving av last	43
4.4 Momenter som berører både tildekking og heving av last	45
4.4.1 Risikoanalyse	45

<b>5.</b>	<b>Konklusjoner</b>	<b>48</b>
5.1	Tildekking	48
5.2	Kvikksølvegenskaper	48
5.3	Foreslåtte metoder for heving av last	48
5.4	Teknologi	49
5.4.1	Utvikling rundt mudring,	49
5.4.2	Instrumentering/survey	49
5.5	Ammunisjon	49
5.6	Risikoanalyse	49
<b>6.</b>	<b>Referanser</b>	<b>51</b>

## FORORD

Rambøll har fått i oppdrag av Kystverket å gjøre en ekstern vurdering av om det er kommet ny informasjon eller teknologi siden Kystverkets anbefaling fra 2014 som tilsier en endret miljørisikovurdering av heving av hele eller deler av lasten til U-864 sammenlignet med tildekking av vrak og kvikksølvforurensning.

I prosjektet har Rambøll inngått et samarbeid med Semar AS som har bred kompetanse innen marine operasjoner/subsea operasjoner.

Rambøll og Semar har gjennomgått tidligere utredninger, gjennomført litteratursøk og innhentet informasjon fra eksterne aktører og fagpersonell. Funnene som er identifisert, presenteres i denne rapporten. Vi poengterer imidlertid at dette prosjektet har blitt gjennomført med et begrenset mandat og tidsramme. Det kan derfor foreligge momenter ved prosjektet som vi ikke har belyst eller identifisert.

Representant for oppdragsgiver er Hans Petter Laahne Mortensholm (Kystverket). Prosjekteier i Rambøll er Tom Øyvind Jahren, mens prosjektleder i Rambøll er Eivind Dypvik. Denne rapporten er skrevet av Søren Knudsen, Marte Braathen og Eivind Dypvik (Rambøll), og Jetmund Hanssen og Geir Morten Sivertsen (Semar). Prosjektgruppa har for øvrig også bestått av Victor Magar, Alison O'Connor og Grete Kirkeberg Mørk (Rambøll). Rapporten er kvalitetsikret av Aud Helland (Rambøll) og godkjent av Tom Øyvind Jahren (Rambøll).

## ORDLISTE

Beskrivelse av faguttrykk	
Ord	Beskrivelse
Aerob/anaerob	Aerob, oksygenkrevende. Dyr, planter og mikroorganismer som omsetter organisk stoff ved hjelp av oksygen, kalles aerobe. Organismer, som kan leve uten oksygen, kalles anaerobe.
Adveksjon	Transport via væskefase. Transportmekanisme innenfor hydrodynamikk, hvor stoff føres i en bestemt retning i væskefasen.
Diffusjon	Tilfeldig bevegelse av molekyler eller partikler fra et område med høy konsentrasjon til et område med lav konsentrasjon.
Bathymetri	Havets dybdeforhold, som f.eks. ses av sjøkart.
Bioturbasjon	Onmrøring av sjøbunnen som følge av bunndyrs aktivitet.
Elektronakseptorer	Under nedbrytningsprosesser av organisk materiale i f.eks. bunnsedimenter kreves en tilgjengelighet av forbindelser som mottar elektroner (elektronakseptorer), dette kan f.eks. være sulfat fra havvann.
ENVST	Risikostyringsmål for <i>miljø, kort sikt</i> i gjennomført risikoanalyse
ENVLT	Risikostyringsmål for <i>miljø, lang sikt</i> i gjennomført risikoanalyse
Hydrodynamikk	Hydrodynamikk beskriver væskers bevegelser ved noen få fysiske størrelser: massetetthet, trykk, temperatur og hastighet.
In situ	In situ er latin og betyr 'på (oppholds)stedet', dvs. direkte på lokaliteten, motsatt i laboratorier.
MeHg / Metylkvikksølv	Metylkvikksølv er et organometallisk kation med formelen $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , som er den største kilden til organisk kvikksølv i organismer. Metylkvikksølv tas lettere opp i organismer enn uorganisk kvikksølv og bioakkumuleres i større grad.
Metanogenese	Nedbrytning av organisk materiale uten oksygen, men hvor elektronakseptoren er karbon, med lav molekylvekt, f.eks. $\text{CO}_2$ eller eddiksyre.
Metylering/Demetylering	Her: De kjemiske prosesser hvor hhv. $\text{Hg}^{2+}$ omdannes til MeHg (metylering) og MeHg omdannes tilbake til $\text{Hg}^{2+}$ (demetylering).
OSAFE	Risikostyringsmål for <i>operasjonell risiko</i> i gjennomført risikoanalyse
PSAFE	Risikostyringsmål for <i>personellsikkerhet</i> i gjennomført risikoanalyse
Redoks	Dette henviser til redokskjemien, som i sedimenter og tildekningsmateriale har stor betydning for tilstanden og dermed stabiliteten av kvikksølv.
Resuspendering	Den fornyede suspensjonen av et nedfelt sediment, for eksempel omrøring av slam nedfelt på havbunnen.
Sorpsjon	Sorpsjon er en fysisk og kjemisk prosess hvor det ene stoffet blir festet til et annet.
Sulfatreduserende bakterier (SRB)	Anaerob nedbrytning av organisk materiale med sulfat hvor SRB'er er utbredt i havbunnsedimenter og er av særlig betydning for kvikksølvkjemien.
Sulfid/ $\text{H}_2\text{S}$	Hydrogensulfid ( $\text{H}_2\text{S}$ ) benevnes typisk som sulfid. Formen av hydrogensulfid i vannmiljø avhenger av pH. I havvann er typisk ca. 10% på $\text{H}_2\text{S}$ formen og 90% som $\text{HS}^-$ .

## SAMMENDRAG

Den tyske ubåten U-864 ble senket av den britiske ubåten HMS Venturer den 9. februar 1945. Om bord i ubåten var det ca. 67 tonn metallisk kvikksølv, lagret i totalt 1857 stålbeholdere. I all hovedsak var disse lagret i kjølen. I 2003 ble vraket av ubåten funnet like utenfor Fedje i Hordaland. Siden den tid har Kystverket gjennomført en rekke utredninger for å finne frem til en måte å håndtere vraket og dets kvikksølvholdige last på best mulig måte.

Siden 2003 er det utredet flere ulike alternativer for tiltak for å håndtere vraket, lasten og kvikksølvforurensingen i de omkringliggende sedimentene. I 2014 ble det gjennomført forprosjektering av to alternative tiltak. Disse alternativene omfatter;

- Alternativ 1. Tildekking
- Alternativ 3. Heving av last og tildekking

I denne rapporten har Rambøll og Semar gjennomført en ekstern vurdering av hvorvidt det foreligger ny informasjon om kvikksølvsegenskaper eller ny teknologi for å gjennomføre operasjoner knyttet til heving av last, som vil medføre en endring i de miljørisikovurderingene som er gjort tidligere i prosjektet. Dersom det identifiseres områder der det er nødvendig med ytterligere forskning eller detaljering, fremkommer også dette i rapporten.

Rambøll og Semar har gjennomgått tidligere utredninger, gjennomført litteratursøk og innhentet informasjon fra eksterne aktører og fagpersonell. Funnene som er identifisert, presenteres i denne rapporten. Vi poengterer imidlertid at dette prosjektet har blitt gjennomført med et begrenset mandat og tidsramme. Det kan derfor foreligge momenter ved prosjektet som vi ikke har belyst eller identifisert.

### *Tildekking*

Det foreslåtte tildekkingslaget er vurdert som godt begrunnet og den foreslåtte oppbyggingen av tildekkingslaget anses å være i henhold til normal praksis. Vi påpeker imidlertid at detaljprosjekteringen av tildekkingslaget må utarbeides før endelig vurdering kan gjøres. Vi har identifisert noen faktorer som må tas hensyn til i denne detaljprosjekteringen. Dette omfatter utfordringer som at den spesifikke funksjonen til adveksjonslaget og det kjemiske isolasjonslaget kan forringes dersom disse blandes i for stor grad. Videre presiseres det at advektive prosesser i tildekkingslaget bør beregnes eller modelleres. Utlegging av finkornede materialer i et tildekkingslag er utfordrende på store dyp, og denne operasjonen bør derfor planlegges nøye.

Av øvrige funn mener vi at en skade på tildekkingslaget som følge av et jordskjelv bør vurderes nærmere med tanke på mulig endring av tildekkingslagets bæreevne. Utover dette, har vi ikke gjort noen store funn som kan endre konklusjonen som tilsier at tildekking er en egnet måte å håndtere kvikksølvforurensningen på.

### *Kvikksølv*

Igjennom vår utredning av kvikksølvkjemi i dette prosjektet, har vi fokusert på kunnskap som er direkte relevant for prosesser på sjøbunnen og i et mulig fremtidig tildekningslag. Vi har ikke funnet ny informasjon som tilsier en endring av den miljørisikovurderingen som ble gjort i 2014 for tildekking som tiltaksalternativ.

Oppsummert er det lite sannsynlig at etablering av det forprosjekterte tildekningslaget gir geokjemiske og fysiske forhold som vil understøtte dannelsen og transporten av metylkvikksølv til overflatevannet. Vi har også vurdert potensialet for gassdannelse under tildekkingslaget, og ikke funnet informasjon som tilsier noen endring av den miljørisikoen som ble vurdert i 2014

Det anbefales imidlertid at det i detaljprosjekteringsfasen undersøkes:

- Om det er mulig å opprettholde en aerob sone i den øverste delen av tildekkingslaget, som vil begrense migrasjon av eventuelt dannet metylkvikksølv ut av tildekkingslaget, fordi de aerobiske forhold kan sikre demetylering av metylkvikksølv.
- Om det kan utformes et tildekkingslag med spesifikke redoksforhold. F.eks. kan tilførsel av masser med høyt jerninnhold i teorien begrense potensialet for metylering av kvikksølv ytterligere. Dette må imidlertid undersøkes i detalj for å sikre at det er relevant på denne lokaliteten.

#### *Teknologi*

Vår vurdering av tidligere utredninger og innhenting av kunnskap om teknologi for heving av last indikerer at det foreligger kunnskap og teknologi som ikke har vært med i tidligere vurderinger, inkludert risikovurderinger.

Når det gjelder de faktiske metodene for heving av last under oppdraget, har det i liten grad fremkommet ny informasjon. Vi har imidlertid identifisert en del momenter som sannsynligvis kan bidra til at risikovurderinger som er lagt til grunn for tidligere avgjørelser, påvirkes i relativt stor grad:

- Det har fremkommet flere muligheter for bruk av eksisterende teknologi knyttet til mudring (særlig punktmudring) som ikke er inkludert i tidligere vurderinger, og som kan gi en redusert miljørisiko sammenlignet med tidligere vurderinger.
- Det er identifisert kartlegging og overvåkingmetoder som kan identifisere kvikksølvbeholdere og kvikksølv i sjøbunnen. Dette bør sjekkes ut videre for potensielt å kartlegge bedre hvor ansamlinger av kvikksølv og beholdere befinner seg. Dette vil blant annet gi en bedre forståelse av mulig måloppnåelse.

Nye metoder knyttet til heving av last gjennom heving av vrakdelar har også blitt vurdert i dette prosjektet. Dette er metoder som bl.a. består av å lage en hydraulisk løfteramme (noe tilsvarende det Mammoet foreslo i sitt kontraktsforslag fra 2008, (Kystverket, 2008)) eller lage festepunkter på toppen av trykkskroget på U-864, tilsvarende det som ble foreslått av LOC i deres rapport datert 7. Januar 2011, (Kystverket, 2011). Begge metodene fjerner nødvendigheten av mudring før heving og kan derfor medføre mindre spredning av forurensning enn de tidligere foreslåtte metodene for heving av last. Dette bør vurderes i det videre arbeidet i prosjektet.

#### *Ammunisjon*

Det har fremkommet at det er noe usikkerhet rundt vurderingen av risiko for selvdetonering av ammunisjon. Basert på de innspillene Rambøll og Semar har mottatt og de utredningene som er gjort tidligere, mener vi at det er grunn til å tro at den ammunisjonen som ligger i vraket av U864 kan medføre ytterligere risiko enn det som tidligere er presentert i dette prosjektet. Dette bør vurderes nærmere før et eventuelt tiltak igangsettes.

#### *Risikoanalyse*

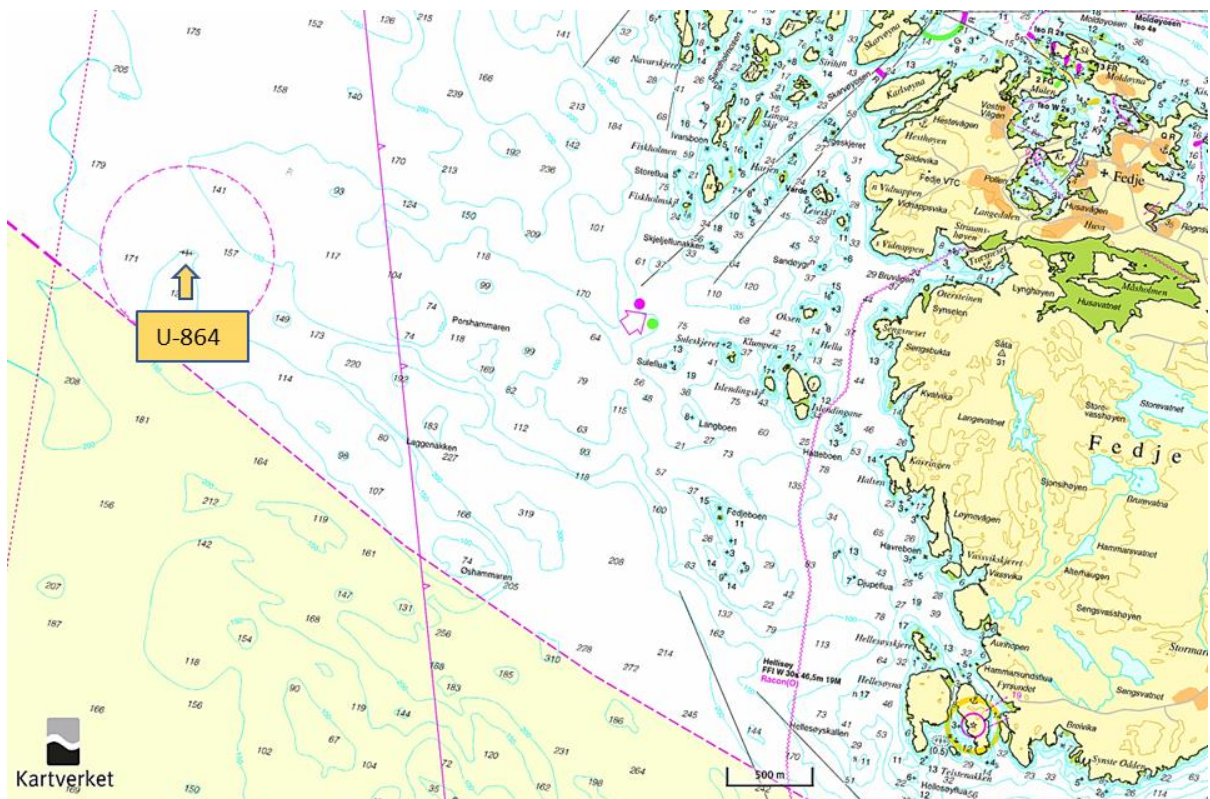
Risikoanalysene som tidligere har blitt gjennomført i prosjektet danner et viktig grunnlag for den endelige avgjørelsen som ble tatt i forbindelse med forprosjekteringen i 2014. Samlet sett mener Rambøll at det er flere usikkerheter ved disse risikoanalysene. Det er imidlertid uklart i hvilken grad disse svakhetene utgjør en forskjell for de beslutningene som ble tatt basert på forprosjekteringen i 2014.



# 1. BAKGRUNN

## 1.1 Om U-864

Den tyske ubåten U-864 ble senket av den britiske ubåten HMS Venturer den 9. februar 1945, ca. 2 nautiske mil vest for øya Fedje i Hordaland (Figur 1-1). Ubåten var på vei fra Tyskland via Norge med krigsmateriell til Japan. I følge historiske dokumenter kan U-864 ha fraktet ca. 67 tonn metallisk kvikksølv, lagret i totalt 1857 stålbeholdere i kjølen. Deler av denne lasten befinner seg fortsatt inne i vraket, mens øvrige deler av lasten er spredt ut på sjøbunnen omkring vraket og fører til utlekking av kvikksølv til vannmassene omkring vraket.



Figur 1-1. Tiltaksområdet hvor vraket av U-864 ligger er ca. 2 nautiske mil (3,7 km) utenfor Fedje.

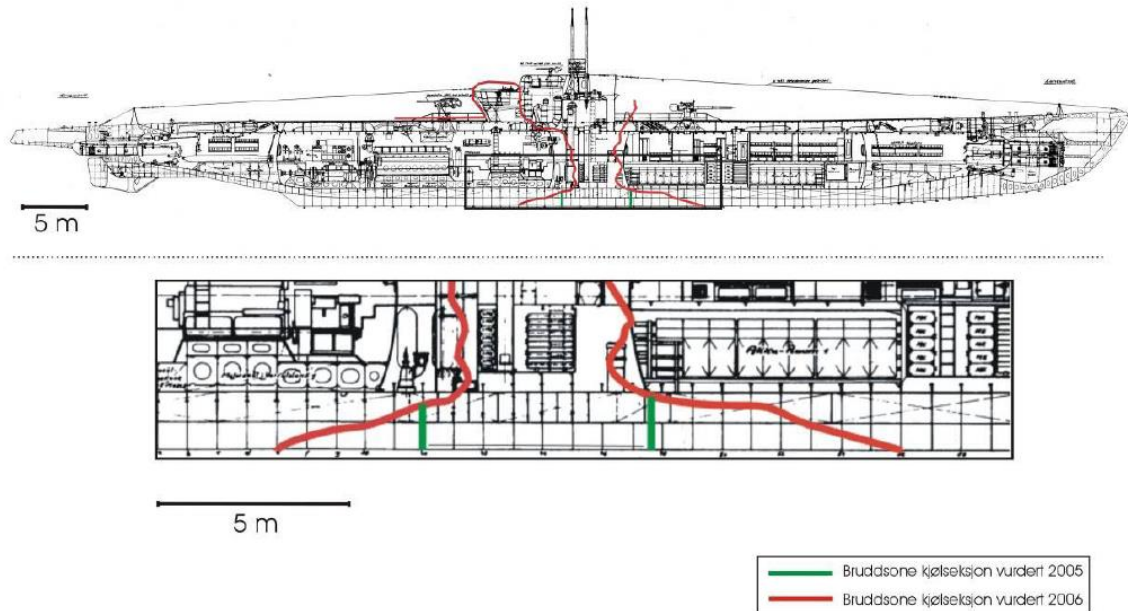
Under andre verdenskrig ble det fraktet en vesentlig mengde råvarer mellom aksemaktene Japan og Tyskland/Italia. Mesteparten av denne transporten ble gjennomført ved bruk av ubåter grunnet blokade og at overflatefartøy var mer utsatt for angrep. Utsvekslingen var i hovedsak militært nødvendige råvarer og militær teknologi.

En vesentlig mengde kvikksølv til militært bruk ble fraktet til Japan fra Europa. Kvikksølv ble for det meste benyttet i sprengstoff som tennsatser i bomber, granater og torpedoer.

Det har vært spekulert i ulike miljøer hvorvidt U-864 var lastet med uranoksid. Statens strålevern har analysert sedimenter fra vrakposisjon for U-864 og det er ikke funnet spor etter uran og målinger viser kun normal bakgrunnsstråling.

U-864, som ble brukket i to hoveddeler som følge av torpedotreffet (Figur 1-2 & Figur 1-3), ble funnet på 150-175 meters dyp av Sjøforsvaret i mars 2003.

Skadene som er observert på skroget viser at profilskroget på babord side er revet bort mens det på styrbord side er tegn til at eksplosjonen har presset vrakdelene oppover. Dette indikerer at torpedoen traff nær kjølen og dens retning bekrefter den visuelle dokumentasjonen fra fase 1 i 2005 og fase 2 i 2006 som tilsier at forskipet ble hardest rammet.

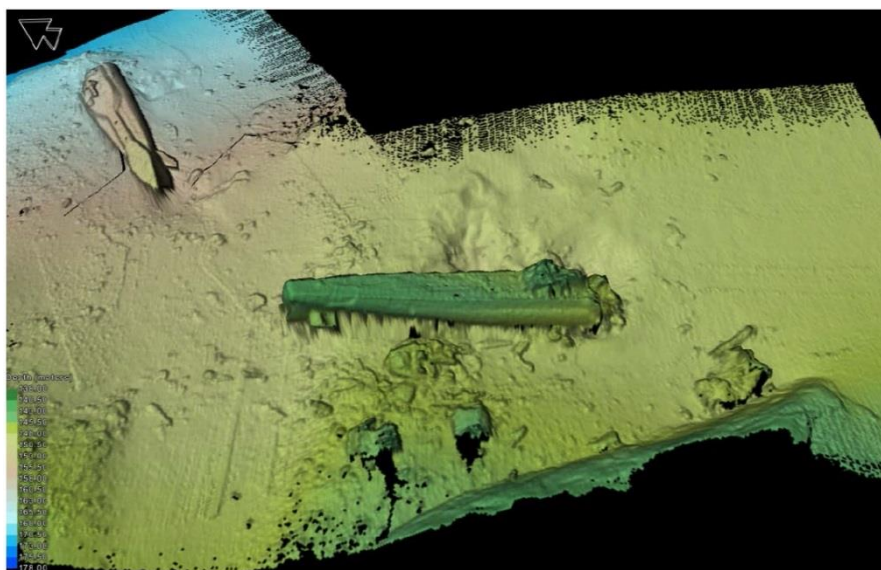


**Figur 1-2. Antatt bruddsone for vraket av U-864 som følge av torpedering. Det er stor usikkerhet knyttet til vinkel på bruddsone ned mot kjølen. Figur er hentet fra (Kystverket, 2014c).**

Ut fra beregninger for treffpunkt kan en konservativ antakelse tilsi at omtrent 25 % av kjølen er borte eller sterkt skadet, men dette er ikke påvist og det er usikkerhet rundt hvor stor del av kjølen som ble ødelagt i selve eksplosjonen. Det kan virke sannsynlig at lasten som befant seg i denne delen av kjølen ble fragmentert eller sterkt skadet under eksplosjonen fra torpedoen (Figur 1-2 & Figur 1-3).

Det er foretatt oppmålinger i foregående faser av prosjektet og Tabell 1-1 viser data for forseksjonen og akterseksjon.

Informasjon i dette kapitlet er hentet fra *Sentralt styringsdokument for Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Alt.1 Tildekking av vrak og forurenset havbunn* og *Sentralt styringsdokument for Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Alt. 3 Heving av last og tildekking av vrak og forurenset havbunn* (Kystverket, 2014c).



**Figur 1-3. Sonarbilde av vraket av U-864 på sjøbunnen (fra DOF Subsea Norway AS) der akterseksjonen er den delen som er vist til høyre i bildet, mens forseksjonen ligger oppe til venstre (baugen pekende oppover i skråningen). Figur hentet fra (Kystverket, 2014c).**

**Tabell 1-1. Vrakseksjonens lengde, dybde, orientering, trim og slagside. Tabell hentet fra (Kystverket, 2014c). Merk at slagside på akterseksjonen ligger med babord ned, ikke styrbord.**

Dimensjon	Forseksjon	Akterseksjon
Lengde (ca)	38 m	42 <sup>1</sup>
Dybde høyeste punkt	150.8 m	137.4 m
Trim	6° (baug opp)	12.7° (baug opp)
Slagside	24.2° (styrbord ned)	16.7° (styrbord ned)

<sup>1</sup> Lengden er noe redusert i dag etter at den delen av formskroget som er aktenfor trykkskroget er brukket av.

## 1.2 Utredningshistorikk U-864

Det er gjennomført omfattende utredninger knyttet til U-864 på oppdrag fra Fiskeri- og kystdepartementet og Samferdselsdepartementet. Utredningsløpet kan deles inn i følgende tre faser; A) utredninger fra 2004 – 2010 og B) KS utredning fra 2010 – 2018, samt C) øvrige relevant utredningsarbeid (Figur 1-4).

### A) Utredninger fra 2004 til 2010

Nedenfor er utredningshistorikken i perioden 2004 – 2010 presentert punktvis, som anført i Kystverkets anbudsdokumenter i dette prosjektet. Utredningshistorikken i denne tidsperioden er også presentert i Figur 1-4.

- I 2004 ble det iverksatt et prøvetagningsprogram av fisk og skalldyr i området rundt vraket. Programmet ledes av NIFES (nå HI) på vegne av Kystverket. Nye sedimentprøver ble i tillegg undersøkt av Statens Strålevern etter spekulasjoner hvorvidt uranoksid var en del av lasten. Det ble ikke detektert annet enn normal bakgrunnsstråling.
- Kystverket gjennomførte to maritime operasjoner (Geoconsult 2005 og 2006) for kartlegging av forurensingsomfanget samt undersøkelser av vrakdeler.

- Kystverket anbefalte tildekking av vrakdeler. Dette var basert på en sammenligning av en tildekkingsstudie gjennomført av NIVA og en mulighetsstudie for heving gjennomført av Smit Salvage BV. Heving av kvikksølvbeholdere ble ikke utredet ytterligere etter at akterseksjonen av vraket ble ustabil som følge av mudring, og tilkomstforsøket til kjølen i 2006 ble stoppet.
- Regjeringen vedtok i februar 2007 at vrakdeler og sedimenter skal tildekkes, men etter mange innsigelser fra lokalbefolkningen ble vedtaket opphevet samme vår og Kystverket ble gitt i oppdrag å utrede hevingsalternativet ytterligere. Et oppdatert hevingsalternativ skulle sammenlignes med tildekking og dette skulle gjennomføres av en ekstern aktør.
- Kystverket tildelte Det Norske Veritas (nå DNV GL) kontrakt for utredning av hevingsalternativet og sammenligning med tildekking. For å kunne utrede hevingsmetodikk som industrien er villig til å forplikte seg til, ble internasjonale aktører invitert til å komme med tilbud på heving av vraket av U-864.
- Kystverket med bistand fra DNV (nå DNV GL) evaluerte de mottatte hevingstilbudene og anbefalte metoden foreslått av Mammoet Salvage BV. Denne metodikken ble lagt til grunn for sammenligning med tildekking.
- Tildekking ble likevel ansett som et tryggere miljøtiltak og DNV ga Kystverket anbefaling om tildekking av vrak og sjøbunn, basert på sammenligning av de to tiltakene og 12 tilleggsstudier på sentrale usikkerhetsområder.
- I 2009 valgte Regjeringen å fortsette med hevingsalternativet, men det ble stilt krav om at metoden og forhandlet avtale med Mammoet Salvage BV skulle underlegges en ekstern kvalitetssikring før den ble presentert for Stortinget og eventuelt skulle tre i kraft.
- Dovre Consulting frarådet Regjeringen i 2009 å iverksette hevingskontrakten som følge av store kostnadsusikkerheter. Kystverket ble derfor gitt i oppdrag å gjennomføre en konseptvalgutredning der de tre alternativene tildekking, heving, og heving av last skulle inngå. Utredningen av miljøtiltak for vraket av U-864 ble med dette underlagt Statens KS ordning.



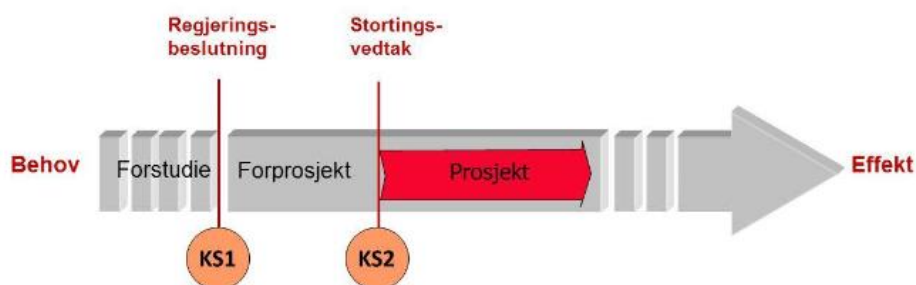
**Figur 1-4. Utredninger om U-864 i perioden 2004 – 2010 som anført i Kystverkets utlysning av dette prosjektet i 2019.**

## B) KS utredninger fra 2010 til 2018

Fra 2010 ble prosjekt U-864 underlagt Statens KS-ordning for større offentlige anskaffelser. Denne ordningen ble etablert høsten 1997 for gjennomgang av systemene for planlegging, gjennomføring og oppfølging av store investeringsprosjekter i staten.

KS-ordningen omfatter to kontrollpunkter i investeringsprosjektets planleggingsprosess (illustrert i Figur 1-5):

- KS1 - Kvalitetssikring av konseptvalg før beslutning i regjeringen om å starte forprosjekt.
- KS2 - Kvalitetssikring av styringsunderlag samt kostnadsoverslag før eventuell investeringsbeslutning i Stortinget.



Figur 1-5. Illustrasjon av KS-ordningen.

Nedenfor er utredningene som er gjennomført i perioden 2010 – 2018 presentert punktvis i kronologisk rekkefølge:

- Kystverket fikk i 2010 i oppdrag å utarbeide en forstudie (Konseptvalgutredning KVVU) for håndtering av kvikksølvforurensingen fra U-864. Forstudien ble utarbeidet med bistand fra Holte Consulting med detaljering av tre politisk valgte alternativer. Med bakgrunn i alternativanalyse av de tre tiltakene anbefalte Kystverket tildekking som det beste miljøtiltaket.
- Selskapet Metier ble engasjert av Fiskeri- og kystdepartementet som ekstern kvalitetssikrer og gjennomførte KS 1 i 2011-2012. Metier anbefalte å inkludere et fjerde alternativ der mudring skulle inngå som tiltak for å rydde opp forurenset sjøbunn.
- Basert på KVVU og KS 1, fikk Kystverket i 2012 i oppdrag av Regjeringen å forprosjekttere to alternativer. Tildekking av vrakdelar og forurenset sjøbunn (alternativ 1), samt heving av last med påfølgende tildekking (alternativ 3). Kystverket skulle i tillegg sammenligne forprosjektene etter KS 1 metodikken og på nytt gi en anbefaling om valg av miljøtiltak.
- Kystverket tildelte bistandskontrakt til DNV GL for fagbistand i forprosjekteringen og disse ble overlevert Samferdselsdepartementet i 2014. Som et ledd i forprosjekteringen ble det gjennomført nye kartleggingstokt på U-864.

### C) Annen relevant utredningsarbeid

Relevant utredningsarbeid som har blitt gjennomført parallelt med utredningene nevnt under punkt A) og B) ovenfor er listet opp nedenfor:

- Det er siden 2004 gjennomført årlige analyser av fisk og skalldyr i vrakposisjonen og referanseposisjoner. Dette arbeidet gjennomføres av Havforskningsinstituttet (HI) på vegne av Kystverket.
- Det ble i 2014 igangsatt et isotop-studie som ledes av HI. Denne studien har som formål å detektere hvorvidt det er kvikksølv fra U-864 som er kilde til den forurensning som måles i fisk og skalldyr. Resultater fra denne undersøkelsen er presentert i (Rua-Ibarz, et al., 2019).
- NIVA og University of Texas, Austin gjennomførte i 2014-2015 en analyse av sjøbunnen fra vrakposisjonen med hensyn til metylering av kvikksølv med og uten tildekking.
- I 2016 ble en støttefylling etablert ved forskipet til U-864 for å sikre sjøbunnen i området slik at videre arbeid kan gjøres uten fare for skred. Selskapet Van Oord Norway AS gjennomførte etableringen av støttefyllingen. Støttefyllingen ble etablert i det dypeste partiet i vrakområdet og består av om lag 100 000 tonn sand og stein. Støttefyllingen er ca. 7 meter høy (Kystverket.no). Rambøll utførte 3. partskontroll av miljøovervåkingen i dette prosjektet.
- Det har blitt gjennomført strømmålinger i perioden 2014 -.2015, under utleggingen av støttefyllingen i 2016 og gjennom vinteren 2018 - 2019. Oppdaterte strømdata fra sjøbunnen og 50 meter opp i vannvolumet skal blant annet benyttes for senere modellering av spredningsrisiko av forurensete sedimenter og for vurdering av erosjonslaget i en fremtidig tildekkingskappe.

### 1.3 Alternative miljøtiltak

I arbeidet med å utrede mulige tiltak for å håndtere vraket av U-864, lasten og kvikksølvforurensning i sedimentene rundt vraket har flere mulige tiltak blitt utredet. I Regjeringen Prop. 111 S (2011 – 2012) ble imidlertid to alternativer valgt til videre forprosjektering i 2013 - 2014. Disse to alternativene var tildekking av vrak og forurenset sjøbunn (alternativ 1.) og heving av last og tildekking av vrak og forurenset sjøbunn (alternativ 3.). Det er disse to alternativene som ligger til grunn for vurderingene som presenteres i foreliggende rapport (se Mandatet under kapittel 2. nedenfor). Følgelig har vi i de nedenforliggende kapitlene beskrevet i grove trekk hva som inngår i de to alternativene for håndtering av vrak, last og kvikksølvforurensning.

#### 1.3.1 Alternativ 1. Kun tildekking

I dette delkapitlet presenterer vi den overordnede beskrivelsen av dette miljøtiltaket hentet fra dokumentet *Sentralt styringsdokument for Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Alt.1 Tildekking av vrak og forurenset havbunn* (Kystverket, 2014a).

##### *Generell beskrivelse av tiltaket*

Hensikten med tiltaket Alt.1 Tildekking er å hindre spredning av kvikksølv og at organismer eksponeres for forurensingen gjennom å tildekke vrakdelene fra U-864 og all kvikksølvlast som vraket inneholder. I tillegg skal all kvikksølvforurenset sjøbunn rundt vraket tildekkes. Tykkelsen og utbredelsen av tildekkingen styres av et fastsatt krav om at sjøbunnen etter tiltaket skal ha en forureningsgrad som er lavere enn fastsatt nivå ( $< 0,63$  mg kvikksølv/kg tørrvekt).

### *Prosjektering*

Tiltaket inneholder flere faser og starter opp med en detaljprosjektering av støttefylling og tildekkingen. Det må tas stilling til valg av materialer ut fra to ulike hovedprinsipper; kun naturlige mineralske produkter som sand, grus og stein i passive tildekkingslag, eller en løsning som også inneholder et aktivt lag som består av bearbejdede materialer. Dette laget vil ha til hensikt å gi tildekkingen særlige egenskaper som god bindingsevne for kvikksølv og/eller lav gjennom-strømningsevne for vann (permeabilitet).

Det må også gjennomføres en detaljering av programmet for miljøovervåkning som skal inngå i konkurransegrunnlaget for anskaffelse av miljøovervåkingen som er planlagt som en del av kontrakten med entreprenører. I tillegg er det planlagt med en separat kontrakt med en ekstern part for verifikasjon av entreprenørens miljøovervåking. Det skal også detaljeres et program for miljøovervåking av tiltaksområdet som trer i kraft etter entreprenørens garantiperiode.

### *Forundersøkelser*

Utredningen fra 2014 bemerket at det vil være behov for nye undersøkelser knyttet til miljøovervåking for å kunne fastlegge et endelig omfang av dette.

### *Støttefylling*

Utredningen i 2014 tilrådet utlegging av støttefylling for stabilisering av skråning der forseksjonen til vraket av U-864 ligger. Støttefyllingen ble anbefalt etablert 1 – 1,5 år før tildekking for å sikre tilstrekkelig konsolidering av sjøbunnen i områdene nedenfor den ustabile skråningen der forseksjonen ligger. I samme fase ble det også anbefalt å legge ut et prøvefelt for å teste ut utlegging av en tildekking.

Støttefyllingen ble etablert i 2016 av selskapet Van Oord Norway AS (se nedenfor). Miljøovervåking var en del av operasjonen med utlegging av støttefyllingen.

### *Tildekking*

Utlegging av tildekkingslag i flere lag med tilhørende kontroller av renhet av masser og tykkelser av de enkelte lag i tildekkingen. Miljøovervåking vil være en del av operasjonen.

### *Langtidsovervåking av miljø*

Det skal gjennomføres regelmessige målinger av kvikksølvnivå i sedimenter i lang tid. I tillegg vil det gjennomføres målinger av kvikksølvinnhold i fisk og krabbe som en oppfølging av program som NIFES gjennomfører for Kystverket. Miljøovervåkningsprogrammet strekker seg ut over tiltakets varighet. Kystverket vil fortsette langtidsovervåkingen inntil ansvarsforhold for dette er endelig avklart. Etter at dette er avklart vil videre miljøovervåking, basert på det skisserte program for oppfølging av tiltaksområdet for U-864, måtte inngå i Miljødirektoratets totale program for miljøovervåking.

## **1.3.2 Alternativ 3 Heving av last og tildekking**

I dette delkapitlet presenterer vi den overordnede beskrivelsen av dette miljøtiltaket hentet fra dokumentet *Sentralt styringsdokument for Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Alt. 3 Heving av last og tildekking av vrak og forurenset havbunn* (Kystverket, 2014c).

### *Generell beskrivelse av tiltaket*

Hensikten med tiltaket Alt.3 Heving av last er å få hevet så stor del av kvikksølvbeholdere fra kjølen i vrakseksjonene av U-864 som mulig, og å hindre spredning av kvikksølv og at organismer eksponeres for forurensingen gjennom å tildekke vrakdelene fra U-864 og resterende

kvikksølvlast som vraket inneholder og som det ikke er mulig å få opp. I tillegg skal all kvikksølvforurenset sjøbunn rundt vraket tildekkes.

Tykkelsen og utbredelsen av tildekkingen styres av fastsatt krav om at sjøbunnen etter tiltaket skal ha en forureningsgrad som er lavere enn fastsatt nivå ( $< 0,63$  mg kvikksølv/kg tørrvekt).

#### *Prosjektering*

I likhet med alternativ 1. inneholder tiltaket flere faser og starter opp med en detaljprosjektering av støttefylling og tildekkingen, som vil være tilsvarende det som er nevnt under kapittel 1.3.1 ovenfor.

Det må også gjennomføres en detaljering av programmet for miljøovervåkning som skal inngå i konkurransegrunnlaget for anskaffelse av miljøovervåkingen som er planlagt som en del av kontrakten med entreprenører. I tillegg er det planlagt med en separat kontrakt med en ekstern part for verifikasjon av entreprenørens miljøovervåkning. Det skal også detaljeres et program for miljøovervåkning av tiltaksområdet som trer i kraft etter entreprenørens garantiperiode.

#### *Forundersøkelser*

Samme som under alternativ 1 (se ovenfor).

#### *Støttefylling*

Samme som under alternativ 1 (se ovenfor).

#### *Heving av last*

Heving av kvikksølvbeholdere som er plassert i kjølen i vrakseksjonene av U-864 er definert som en trinnsvis prosess med inndeling i 6 steg; forberedelser, etablere tilgang til kjøle, åpne kjøle, ta ut kvikksølvbeholdere av kjølen, flytte kvikksølvflasker til mellomlager, og stabilisering av vrakseksjonene før tildekking. Miljøovervåking vil være en del av operasjonen.

#### *Kvikksølv til deponi*

Frakt av kvikksølvbeholdere i forsvarlig transportcontainer frem til endelig deponi.

#### *Tildekking*

Samme som under alternativ 1 (se ovenfor).

#### *Langtidsovervåkning av miljø*

Samme som under alternativ 1 (se ovenfor).

### **1.4 Kystverkets anbefaling i 2014**

I 2014 ga Kystverket følgende anbefaling i rapporten *Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Konklusjon og faglig anbefaling fra forprosjektering av Alt. 1 Tildekking av vrak og forurenset havbunn* og *Alt. 3-Heving av last og tildekking av vrak og forurenset havbunn* (Kystverket, 2014b):

Kystverkets vurdering er at både alternativ 1 «tildekking av vrak og forurenset havbunn» (Alt.1 Tildekking) og alternativ 3 «heving av last og tildekking av vrak og forurenset havbunn» (Alt.3 Heving av last) vil gi de ønskede langsiktige miljøeffekter ved U-864 dersom gjennomføringen blir vellykket.



Ønskede miljøeffekter er beskrevet gjennom samfunns mål og effektmål for tiltaket.

Risikoanalysen viser imidlertid at risikoen for økt spredning av forurensede sedimenter utenfor tiltaksområdet på kort sikt (under en operasjon) er vesentlig større ved alternativ 3 (heving av last) sammenlignet med alternativ 1 (tildekking). Dette er i all hovedsak den utslagsgivende faktoren for at miljørisiko på kort sikt har blitt vurdert som større for alternativ 3 enn alternativ 1. For miljørisiko på lang sikt, ble spredning av forurensede sedimenter ut av tiltaksområdet vurdert som en vesentlig større risiko for alternativ 3 enn alternativ 1. Ingen øvrige risikomomenter ble vurdert som kritiske (rød sone) for alternativ 1 og alternativ 3 med hensyn til miljørisiko.

Ut fra mottatt mandat fra Fiskeri- og kystdepartementet (i etterkant har det overordnede ansvaret for saken blitt flyttet til Samferdselsdepartementet) for forprosjektene, legger Kystverket til grunn at prosjektet er et miljøprosjekt der det viktigste formålet er å redusere forurensningsfaren på kort og lang sikt. Derfor har Kystverket i sine faglige vurderinger lagt avgjørende vekt på miljørisiko, og at dette er ivarettatt gjennom oppnåelse av samfunns mål og effektmål, og overholdelse av krav som settes til tiltaket.

Rangeringen av alternativene basert på prissatte, så vel som for ikke-prissatte effekter, er entydig og klar i favør av Alt.1 Tildekking.

Med bakgrunn i mandatet, vurderer Kystverket Alt.1 Tildekking å være både det minst risikofylte tiltaket, og det alternativ som klart best imøtekommer kravene til tiltaket. Derfor anbefales en innkapsling av kvikksølvforurensningen gjennom tildekking av vrak og forurenset havbunn med rene masser.

### **1.5 Status i 2019**

Siden Kystverkets anbefaling i 2014 har det blitt etablert en støttefylling i områdene ved forskipet til U-864. Dette ble gjort i 2016 for å sikre sjøbunnen i området slik at videre arbeid (både i alternativ 1 og alternativ 3) kan gjøres uten fare for ras. Selskapet Van Oord Norway AS gjennomførte etableringen av støttefyllingen. Støttefyllingen ble etablert i det dypeste partiet i vrakområdet og består av om lag 100 000 tonn sand og stein. Den er ca. 7 meter høy. I årene etter 2016 ble det gjennomført en overvåkning av støttefyllingen for å undersøke hvordan støttefyllingen ville stabilisere seg på sjøbunnen. Overvåkningen er presentert i (VanOord, 2016) og (NGI, 2018).

I 2019 har Samferdselsdepartementet gitt Kystverket et nytt oppdrag i prosjektet. Oppdraget innebærer en ekstern vurdering av om det er kommet ny informasjon eller teknologi som tilsier en endret miljørisiko siden Kystverkets anbefaling fra 2014. Denne bestillingen danner grunnlaget for Rambølls mandat i dette prosjektet.

## 2. MANDAT

Samferdselsdepartementet har gitt Kystverket i oppdrag å innhente en ekstern vurdering av om det er kommet ny informasjon eller teknologi siden Kystverkets anbefaling fra 2014 som tilsier en endret miljørisikovurdering av heving av hele eller deler av lasten sammenlignet med tildekking.

Aktører med innspill om ny informasjon og om ny teknologi skal involveres i arbeidet med den eksterne vurderingen. Den eksterne vurderingen og Kystverkets faglige tilråkning om oppfølging av denne skal oversendes Samferdselsdepartementet innen 29. mars 2019.

Rambøll og Semar skal på oppdrag fra Kystverket utføre følgende tjenester;

- Ekstern vurdering av de konsepter som hevder at heving av last kan gjennomføres med en lavere miljørisiko på kort sikt enn det Kystverket har vurdert i konseptvalgutredningen (2011) og i forprosjekt av alternativ 3 (heving av last, 2014)
- Ekstern vurdering av om det foreligger ny informasjon om metylering av kvikksølv under en tildekkingskappe ved vrakposisjonen som vil innebære en endring av Kystverkets risikovurderinger for miljørisiko på lang sikt for alternativ 1 (tildekking) og alternativ 3 (heving av last)

Sluttprodukt for tjenesten skal være en rapport der vurdering av ny informasjon og ny teknologi skal sammenlignes med de vurderinger Kystverket har utført i sitt utredningsarbeid for U-864. Dersom det identifiseres områder der det er nødvendig med ytterligere forskning eller detaljering, skal dette fremkomme tydelig i rapporten.

Sluttrapport skal overleveres Kystverket innen 26.mars 2019.

### 3. MATERIALE OG METODE

For å gjennomføre prosjektet på en ryddig og effektiv måte ble gjennomføringen av prosjektet inndelt i tre hoveddeler; 1) litteratursøk og kartlegging av faktagrunnlag, 2) møter med eksterne og utveksling av informasjon om kvikksølvegenskaper og relevant teknologiutvikling og 3) vurdering av funn og rapportering. Nedenfor er det gitt en nærmere beskrivelse av de forskjellige hoveddelene av vår fremgangsmetode i prosjektet.

#### 3.1 Litteratursøk

Kystverket opprettet tidlig i prosjektet et prosjekthotell (Projectplace) der alle tidligere utredninger og rapporter i oppfølgingen av U-864 ble lastet opp og delt med prosjektgruppa fra Rambøll og Semar. Tidlig i prosjektets gjennomføringsfase ble alle disse utredningene gruppert og kategorisert for å identifisere de enkelte utredningenes relevans sett i lys av prosjektets mandat.

Prosjektgruppa ble tidlig inndelt i to grupper, der en gruppe hadde ansvar for å gå gjennom vurderinger av kvikksølv og dets egenskaper i tidligere utredninger i prosjektet, innhente ny kunnskap om kvikksølv, og identifisere om det foreligger ny kunnskap om kvikksølvegenskaper som ikke er vurdert tidligere i prosjektet. Den andre gruppen hadde ansvar for å gå igjennom tidligere utredninger knyttet til teknologiske løsninger, innhente informasjon om nye relevante teknologiske løsninger de siste årene og identifisere om det foreligger ny teknologi som ikke er vurdert tidligere i prosjektet.

Funn fra litteraturgjennomgangen ble benyttet til å vurdere om det foreligger grunn til å endre de miljørisikovurderingene som ble gjort i konseptvalgutredningen (2011) og forprosjekteringen (2014) slik som det fremkommer av mandatet presentert i kapittel 2. Dette er beskrevet nærmere nedenfor.

#### 3.2 Møter og informasjonsinnhenting

Som del av kunnskapsinnhenting i dette prosjektet har Rambøll og Semar gjennomført møter og samtaler med en rekke interessenter som enten har vært involvert i prosjektet tidligere eller som har vist interesse til å dele sin kunnskap om prosjektet. Vi har også tatt kontakt med fagpersoner som er spesialister på fagfelt som berøres gjennom prosjektet.

Møter eller kommunikasjon som er gjennomført med følgende aktører:

- Kompetanseteamet fra Bergen og Fedje (inkl. fagpersoner fra Univ. i Bergen, ordføreren i Fedje kommune, en stortingsrepresentant fra Høyre Hordaland og en ansatt i folkehelseavdelingen i Bergen kommune) – møte gjennomført 26. februar 2019.
- DNV GL og NGI – møte gjennomført 27. februar 2019
- Unitech – møte gjennomført 21. mars 2019
- Stinger – møte gjennomført 4. mars 2019
- Scanwaste/Argentum Vivum Solutions – møte gjennomført 13. mars 2019
- Svein Tore Bjelland – møte gjennomført 28. februar 2019
- Reidar Ulvøy – løpende telefon og epostkontakt gjennom prosjekt-perioden
- Pneuma pump – informasjonsutveksling pr. epost 25. februar 2019
- NUI v/Rolf Røssland - telefonkontakt
- Aquadyne – telefonsamtale 15. mars 2019, Aquadyne deltok også i møte med Unitech 21. mars 2019
- Miljøvernforbundet – telefonsamtaler og epost mottatt 21. mars 2019
- Karl J. Rockne (University of Illinois Chicago) –informasjonsutveksling om relevante artikler/forskning

Prosjektteamet til Rambøll/Semar tok også kontakt med NIVA (Norsk institutt for vannforskning) med forespørsel om å gjennomføre et møte, men fikk ikke i stand et slikt møte. Deretter ble NIVA forespurt om å besvare spørsmål/kommentarer på epost. NIVA svarte imidlertid ikke på disse spørsmålene.

For hvert møte ble det enten utarbeidet et møtereferat eller en oppsummering av informasjonen som ble delt i møtet. Oppsummeringer, møter eller øvrig kontakt med eksterne aktører/interessenter er presentert i resultatkapittelet i denne rapporten. Informasjon, kunnskap og påstander som kom frem av møtene ble vurdert etter relevans. Ny informasjon og påstander som ikke har vært vurdert tidligere eller indikerte mangelfulle utredninger tidligere i prosjektet ble undersøkt og belyst i resultatdelen av denne rapporten.

### **3.3 Metodisk gjennomgang med risikoanalyse**

I utgangspunktet hadde Rambøll/Semar planlagt å gjennomføre en revidering av den allerede gjennomførte risikoanalysen basert på funn fra litteratursøket og møter med eksterne aktører. I løpet av prosjektet ble det imidlertid avdekket svakheter ved foreliggende risikoanalyse (dette er belyst i resultatkapittelet nedenfor), og tiden for prosjektgjennomføring var for begrenset til å gjøre en fullstendig revidering av risikoanalysen. Følgelig ble funnene heller presentert og beskrevet i detalj som del av rapporteringsdelen av prosjektet.

### **3.4 Rapportering**

Rapporteringsfasen i prosjektet ble igangsatt i etterkant av litteraturgjennomgangen og mot slutten av fasen med møter og informasjonsinnhenting fra eksterne aktører/interessenter.

Rambølls del av prosjektgruppa var ansvarlig for den delen av oppdraget som omhandlet kvikksølvegenskaper, tildekking og risikoanalyse. Semars del av prosjektgruppa var ansvarlig for den delen av oppdraget som omhandlet vurdering av teknologi og ammunisjon.

Funn fra litteraturgjennomgangen og de gjennomførte møtene med eksterne aktører/interessenter er vurdert i lys av de tidligere utredningene som er gjennomført i prosjektet.

Hovedfokus i rapporteringsfasen var som mandatet fra Kystverket legger opp til;

- Ekstern vurdering av de konsepter (ny teknologi) som hevder at heving av last kan gjennomføres med en lavere miljørisiko på kort sikt enn det Kystverket har vurdert i konseptvalgutredningen (2011) og i forprosjekt av alternativ 3 (heving av last, 2014)
- Ekstern vurdering om det foreligger ny informasjon om metylering av kvikksølv under en tildekkingskappe ved vrakposisjonen som vil innebære en endring av Kystverkets risikovurderinger for miljørisiko på lang sikt for alternativ 1 (tildekking) og alternativ 3 (heving av last)

Rapporteringsfasen var imidlertid ikke begrenset til punktene ovenfor, og øvrige funn blir også belyst og diskutert i denne rapporten. Disse momentene inkluderer bl.a. vurdering av tidligere gjennomførte risikoanalyser, tidligere vurderinger knyttet til risiko for detonerings av ammunisjon i/ved ubåt-vrak og heving av skip.

Vi poengterer imidlertid at dette prosjektet har blitt gjennomført med et begrenset mandat og tidsramme. Det kan derfor foreligge momenter ved prosjektet som vi ikke har belyst eller identifisert.

## 4. RESULTATER OG DISKUSJON

### 4.1 Tildekking

Tildekking er en relativt moden og velprøvd teknologi som innebærer utlegging av passende materiale over forurensede sedimenter. Materialet legges ut lagvis og varierer i kompleksitet avhengig av stedet som skal dekkes til. Et tildekkingslag skal ha typisk tre funksjoner (United States Environmental Protection Agency, 2005):

- Fysisk isolasjon: forurensningen isoleres fra det omkringliggende miljøet for å beskytte biota i området (typisk gravende organismer), fra direkte kontakt med de forurensede sedimentene.
- Stabilisering/erosjonsbeskyttelse: minimalisering av muligheten for at forurensning fra sedimentene resuspenderes i vannmassene og transporteres ut som resultat av vannstrøm, bølger under stormer eller oppvirvling fra skipspropeller.
- Kjemisk isolasjon: beskytte mennesker og miljøet og vannsøylen fra kjemisk eksponering av forurensningen i sedimentene.

Disse tre mekanismene gjør at tildekking av forurenset sediment ofte er mest relevant for lokasjoner der tiltak, som for eksempel vedlikeholdsmudring, ikke er nødvendig for å holde skipsleden åpen. Forsterkning av tildekkningen brukes for å beskytte mot erosjon av tildekkingslaget og kan tilpasses et stort spekter av hydrodynamiske forhold slik at tildekkingslaget holdes stabilt.

Tildekking er foreslått som et eget tiltak under alternativ 1 (Kystverket, 2014), men tildekking av vrak og forurenset sediment inngår også i alternativ 3 (Kystverket, 2014).

Nedenfor har vi presentert fordeler og begrensninger av tildekking av forurensede sedimenter (United States Environmental Protection Agency, 2005).

Fordeler:

- Tildekking har færre kortsiktige, økologiske virkninger enn fjerning ved mudring.
- Tildekking gir umiddelbart en ren sedimentoverflate og reduserer dermed eksponeringen til kjemikalier i overflatesedimenter.
- Potensialet for eksponering av forurensninger reduseres uten håndtering, behandling og avhending.
- Behandling og / eller avhending utenfor tiltaksområdet er ikke nødvendig.
- Tildekkingsmaterialet gir ofte et rent underlag for rask rekolonisering av bentiske organismer.
- Implementering av tildekkingslag er vanligvis raskere og rimeligere enn fjerning av sediment og er mindre forstyrrende for det lokale bunnmiljøet.

Begrensninger:

- Tildekking forårsaker en uunngåelig forstyrrelse av det bentiske miljøet og omfatter i beste fall en midlertidig ødeleggelse av vannmiljøet og habitatet innenfor tiltaksområdet. Imidlertid overkommes vanligvis dette ved naturlig sedimentering på toppen av det tildekkede området, samt naturlig bentisk rekolonisering. Lokaliteten er strømuttsatt, naturlig sedimentering er derfor liten i det aktuelle området.
- Tildekkingslag som inneholder reaktive stoffer eller syntetiske geologiske materialer, kan være utfordrende ved utlegging (utplassering, blanding av reaktive stoffer med andre tildekkingsmaterialer, etc.). For U-864 kan dette være en utfordring, ettersom lokaliteten er strømuttsatt og arbeidet vil foregå på dypt vann (~150m).

- Tildekking kan kreve vedlikehold og reparasjon dersom den skades.
- Erosjonsbeskyttelse eller andre tiltak kan kreve at det brukes materialer som ikke er kompatible med det foretrukne habitatet. Dette vil imidlertid kunne reduseres over tid via naturlig avsetning av sedimenter (merk at det er lite sedimentering i det aktuelle tiltaksområdet). Noen tildekkingsprosjekter omfatter utlegging av et habitatlag for å øke økologisk gjenoppretting.
- Forurensningen blir isolert og tatt ut av sirkulasjon, men ikke fjernet fra området

#### **4.1.1 Informasjonsinnhenting fra eksterne aktører knyttet til tildekking og kvikksølv**

I tillegg til litteratursøk og kompetanse innad i prosjektteamet, har det blitt innhentet informasjon om tildekking og kvikksølvsegenskaper fra eksterne aktører. Nedenfor har vi gitt en kort oppsummering av informasjon om tildekking og kvikksølv som vi har mottatt gjennom møter med DNV GL og Kompetanseteamet fra Bergen og Fedje. Relevante momenter er diskutert nærmere i nedenforliggende kapitler.

##### *Kompetanseteamet fra Bergen og Fedje*

Nedenfor har vi listet opp de momentene som omhandler tildekking og kvikksølv, som ble løftet av Kompetanseteamet i møtet:

- Kompetanseteamet mener at det foreliggende beslutningsgrunnlaget i denne saken er ufullstendig og at det foreligger stor langsiktig miljørisiko ved å velge tildekking som løsning i denne saken.
- Erosjon av tildekkingslaget fra bunnstrøm (adveksjon) vil kunne gi utlekking av kvikksølv og påfølgende metylering i vannfasen. Anaerobt miljø i sedimentene kan øke metyleringen, men krever organisk materiale. Det er lite organisk materiale i sedimentene ved Fedje. Dette tilsier lite metylering i sedimentene.
- Kompetanseteamet er kritiske til Kystverkets vurdering av metylering i dette prosjektet, da de mener underliggende rapporter kun har vurdert metylering i ferskvann, ikke sjøvann.
  - Samtidig er det heller ikke tatt med vurdering av metylering i pelagiske vannmasser, som er vist å gi et større bidrag til metylkvikksølv i næringskjeden enn metylering i sedimenter.
- Torpederingen i 1945 medførte ingen (registrert) miljøkatastrofe. Følgelig vil det lite trolig bli en miljøkatastrofe som følge av den spredningen som vil skje under heving av last og/eller mudring. Spredning under mudring vil også være minimal sammenlignet med bakgrunnsnivåer av kvikksølv.
- Det må gjøres mer avansert modellering av spredning og utlekking enn det som er gjort tidligere. I tillegg er det også registrert en datafeil i NIVAs modellering fra 2006.
- Tildekking må overvåkes til evig tid og vil aldri ta slutt. I realiteten blir dette en irreversibel løsning, uten mulighet til å angre senere. Dette er et usikkerhetsmoment i seg selv, og i strid med en Føre-var-praksis.
- Det ble stilt spørsmål om det kan være verre å dekke til kvikksølvforurensede sedimenter enn å la være.
- Tildekking i dype havområder kan være vanskelig, og et tildekkingsprosjekt på store dyp i California var mislykket (referanse ble ikke gitt i møtet).
- Konsekvenser for et eventuelt tildekkingslag ved et jordskjelv er vurdert, men bør vurderes nærmere/på nytt.
- Konsekvenser av Worst-case scenarioer bør tillegges større vekt
- Andre påstander som omhandlet aspekter som både berører tildekking og heving av last. Herunder:

- Risikoanalysene som er gjort er svake, uten verste-fall analyse, og vurderingene for forskjellige risikofaktorer står ikke i stil med hverandre og må vurderes på nytt.
  - Risikovurderingen av Alt. 3 er overdimensjonert
  - Risikovurderingen av Alt. 1 er underdimensjonert
- Det vil være en fare knyttet til sprengning av eksplosiver dersom dette ikke fjernes. Sprengning kan skje ved tildekking og etter tildekking. Dette kan ødelegge tildekkingslaget og forårsake spredning av kvikksølv til vannmassene.

#### *DNV GL og NGI*

Nedenfor har vi listet opp de momentene fra møterefateret som omhandler tildekking og kvikksølv (momenter som omhandlet teknologi er nevnt senere i rapporten):

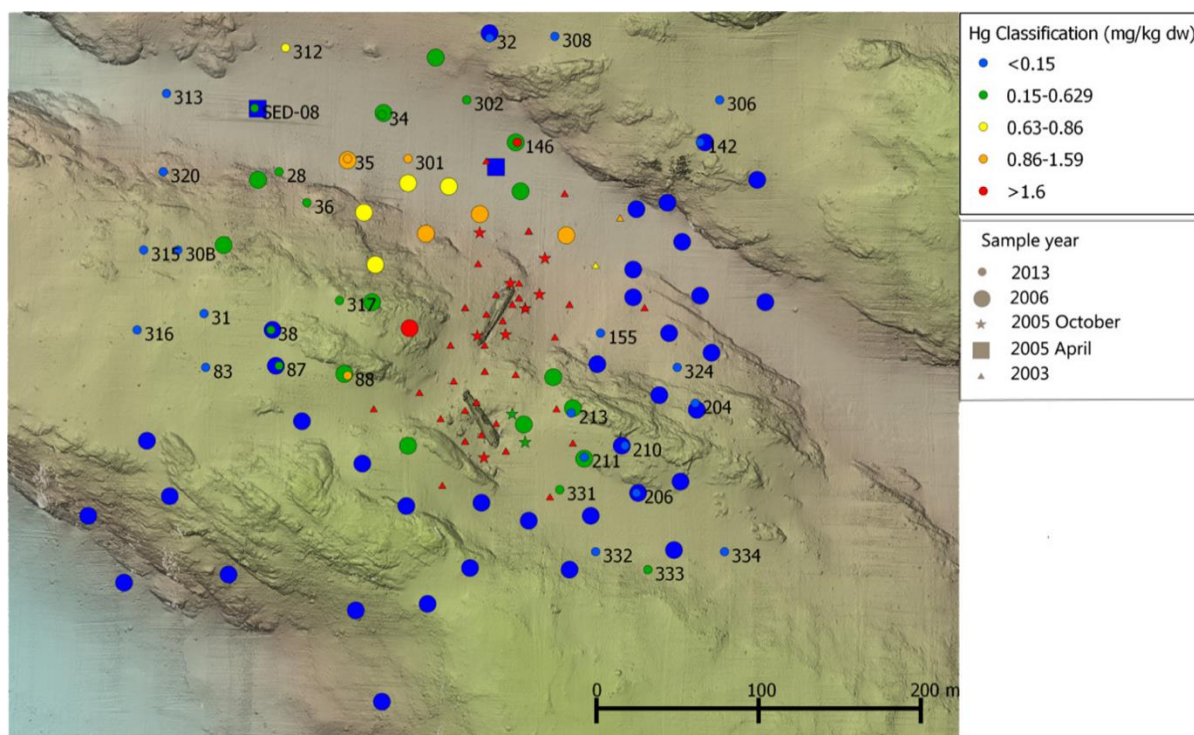
- Det er mye metallisk kvikksølv umiddelbart rundt vraket. Det rant bl.a. perler av kvikksølv ut av sugemudreren når det ble forsøkt å få tilgang til kjølen. Kun én av kvikksølvbeholderne som er tatt opp har vært intakt.
- Tildekkingslaget
  - Erosjonssikring og utforming er beskrevet tidligere i U-864-prosjektet av NGI
    - Tradisjonell tildekking ligger til grunn for design
    - Tildekkingslaget inkluderer et erosjonssikrende lag for å beskytte tildekkingen i tillegg til lag som forhindrer transport med vannbevegelse (adveksjon) og transport med bioturbasjon.
    - Adveksjonslaget er det som det er jobbet mest med i utformingen av tildekkingslaget.
  - Massebehov vil tilsvare ca. 135 000 – 155 000 m<sup>3</sup> (støttefyllingen er ca. 106 000 m<sup>3</sup>)
  - Detaljprosjektering er ikke gjort, så endelig design av tildekkingslag er ikke utformet
    - Endring i strømmønster er ikke modellert, men trolig begrenset. Strømmer overvåkes imidlertid som følge av støttefyllingen som er etablert.
- Metylering
  - Ved tildekking vil det etableres et anaerobt miljø, men grunnet lite karbon vil metylering i sedimentene begrenses.
  - Forskere fra Texas Tech. University og NIVA har i en studie «provosert» frem metylering under tilsvarende «tildekkingsforhold» ved å tilsette karbon i form av algepulver – resultatene var iht. kjent kunnskap om metyleringsprosesser. Disse testene viste som forventet en initiell økning i metylering før metyleringen avtok når tilgjengelig organisk materiale ble brukt opp.
  - Ubåten skal være tømt for olje (så godt det lar seg gjøre), så en potensiell karbonkilde fra olje fra ubåten er svært begrenset
  - Tildekkingen vil både hindre tilførsel av organisk materiale til kvikksølv under tildekkingen (og dermed hindre metylering) og hindre utlekking av eventuelt metylkvikksølv som er dannet under tildekkingen.
  - DNV GL og NGI er ikke kjent med noe ny kunnskap om kvikksølv og metylering som endrer de vurderingene som er gjort tidligere.

#### 4.1.2 Kvikksølvforurensning ved ubåten.

I dette kapittelet gir vi en oppsummering av foreliggende informasjon om kvikksølvforurensning i sedimenter og biota ved ubåten.

##### *Kvikksølvnivåer i sedimentene*

Sedimentprøver er analysert i 2003, 2005, 2006 og 2013. Undersøkelsene viser at sedimentet i umiddelbar nærhet av ubåten er i tilstandsklasse V, sterkt forurenset i henhold til Miljødirektoratets veileder TA2225 (NIVA, 2013). Merk at tilstandsklassene for kvikksølv er noe endret i Miljødirektoratets oppdaterte veileder M-608 (Miljødirektoratet, 2016). Forurensningen avtar med avstanden fra ubåten og det er anslått at et område på >47 000m<sup>2</sup> er i tilstandsklasse III eller høyere (>0,63 mg Hg/kg) (DNV GL, 2014b). I noen av sedimentprøvene ble det observert dråper av elementært kvikksølv (NIVA, 2013). De målte kvikksølvnivåene i sedimentene rundt ubåten er vist i Figur 4-1. I 2016 ble det etablert en støttefylling som dekker den nordlige delen av det kontaminerte området. Vi har ikke kommet over ny informasjon vedrørende kvikksølv i sedimentene som avviker fra analysene som har blitt gjort forut for vurderingene i 2013.



**Figur 4-1. Oversikt over konsentrasjoner av kvikksølv i overflatesediment inndelt i tilstandsklasser i henhold til Miljødirektoratets veileder TA2229 (NIVA, 2013). Merk at tilstandsklassene for kvikksølv er noe endret i Miljødirektoratets oppdaterte veileder (Miljødirektoratet, 2016).**

##### *Kvikksølvnivåer i biota*

Siden 2004 er kvikksølvkonsentrasjonen i brosme og krabbe fra området rundt vraket av U-864 overvåket. Overvåkingen har vist at kvikksølvkonsentrasjonene ikke er høyere ved vraket av U-864 enn ved referanselokalitetene fire nautiske mil sør og nord for vraket eller høyere enn bakgrunnsnivå av kvikksølv i fisk fra kysten av Vestlandet. Det ble ikke observert noen økning i kvikksølvkonsentrasjon i brosme tatt før støttefyllingstiltaket ble satt i gang, sammenliknet med nivåene etter tiltaket.

Prøver av brunmat fra krabbe fisket ved vraket av U-864, viste forhøyede kvikksølvkonsentrasjoner sammenliknet med referanselokalitetene fire nautiske mil sør og fire



nautiske mil nord for vraket. Nivåene i brunmat var også forhøyet i forhold til bakgrunnsnivået for kysten. Dette støtter teorien om at krabber får i seg metallisk kvikksølv fra sedimentet og at det derfor er i fordøyelsessystemet, men at dette ikke eller i svært liten grad akkumuleres i muskulaturen (NIFES, 2017).

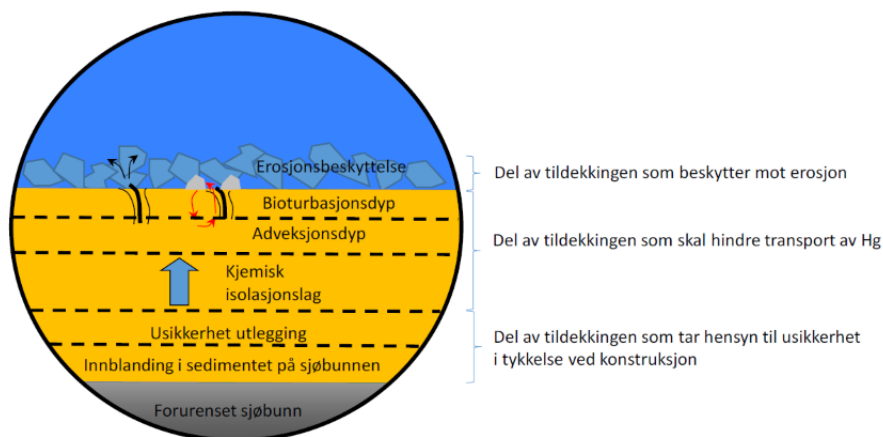
Rua-Ibarz (2019) har sett på opphavet til kvikksølv i lever og filet av brosmer fra flere lokasjoner langs norskekysten, ved hjelp av isotop-kartlegging av kvikksølv. Studiet viste at kvikksølv som ble funnet i brosme som lever ved ubåtvraket, har det samme kvikksølv-fingeravtrykk som fisk tatt andre steder langs norskekysten. Resultatene fra studiet tyder derfor på at kvikksølv som ble funnet i fisk rundt ubåten på Fedje ikke er Fedje-spesifikt og må ha et annet opphav enn kvikksølv fra U-864. Kvikksølv i krabbe inngikk imidlertid ikke i studiet til Rua-Ibarz (2019).

#### 4.1.3 Utforming av tildekkingslaget over U-864

Tildekkingslaget er på det nåværende tidspunkt ikke detaljprosjektert. Den foreløpige utformingen av tildekkingslaget består av flere lag kan ha flere funksjoner (DNV GL, 2014b):

- Erosjonsbeskyttelseslag: Tildekkingens topplag som etableres for å beskytte mot erosjon
- Bioturbasjonslag: Del av tildekkingslaget hvor dyr og planter kan etablere seg uten at de påvirker de underliggende lagene
- Adveksjonslag: Lag som reduserer væsketransport gjennom tildekkingslaget
- Kjemisk isolasjonslag: Beskyttelse mot transport av kvikksølv- og metylkvikksølv ut av tildekkingslaget
- Blandingslag: Tildekkingslagets «fundament» som utgjør kontaktflaten mellom tilførte masser og de naturlige sedimentene

En oversikt over de planlagte tildekkingslagene er vist i Figur 4-2 og Tabell 4-1.



Figur 4-2 Illustrasjon av planlagte tildekkingslag over forurensningen ved vraket av U-864 (DNV GL, 2014b).

**Tabell 4-1 Oppbygging av planlagte tildekkingslag med passiv tildekking (DNV GL, 2014b).**

	Like ved vraket (adveksjonslag: fin subbus)	Resten av forurenset område
Erosjonslag	20 cm	20 cm
Bioturbasjonslag	15 cm	15 cm
Adveksjonslag	(220 - 90 - 15 cm) = 115 cm*	(40 - 15 cm*) = 25 cm
Kjemisk isolasjonslag	90 cm	5 cm
Sum tildekking uten usikkerhet	<b>240 cm</b>	<b>65 cm</b>
Tillegg for blandingslag	10 cm	10 cm
Tillegg for å ta hensyn til usikkerhet ved utlegging	40 cm	40 cm
Total tykkelse av tildekkingen	<b>290 cm</b>	<b>115 cm</b>

\* Beregnet ved å trekke fra 90 cm tykkelse for det kjemiske isolasjonslaget og 15 cm tykkelse for bioturbasjonslaget.

#### *Bioturbasjonslag*

Bioturbasjonslaget antas å være tilpasset bentisk bioturbasjon på ca. 15 cm. Det 20 cm tykke erosjonslaget tilfører også ekstra beskyttelse mot bioturbasjon, noe som på den måten effektivt vil fordoble beskyttelsen mot bioturbasjon. Dette beskyttelsesnivået vil være tilstrekkelig til å motvirke potensialet for biologisk blanding av bentiske organismer. Det kan imidlertid forekomme dypere graving i marine miljøer. Imidlertid må man ta i betraktning at den totale tykkelsen på tildekkingslaget vil være 290 cm i nærheten av vraket og 115 cm i resten av det forurensete området. Tildekking fra 1 til 3 m vil være mer enn tilstrekkelig for å forhindre risiko for bioturbasjon.

#### *Adveksjonslag*

Adveksjonslaget er på 220 cm i nærheten av vraket og 40 cm i resten av det forurensete området. Det 220 cm tykke adveksjonslaget i nærheten av vraket, er basert på stedsspesifikke studier av NGI. Tykkelsen på 40 cm er basert på litteratur som sier adveksjonsverdier på 25 cm. En 1,5 x sikkerhetsfaktor gir derfor designtykkelsen på 40 cm.

#### *Kjemisk isolasjonslag*

Det kjemiske isolasjonslaget er 90 cm nært vraket og 5 cm i resten av området. Dette er basert på modellering av kjemisk transport i porevann gjennom tildekkingslaget. Porevannskonsentrasjoner av kvikksølv i sedimentene i området, ble antatt å være 40 µg/L nær vraket og 2 µg/L i resten av området (NIVA, 2005b). Modellen som er brukt til å beregne en tilstrekkelig tykkelse på det kjemiske isolasjonslaget, er et standardverktøy for tildekkingskonstruksjoner og anses som pålitelig.

#### *Blanding av lag*

Et 10 cm blandingslag er relativt konservativt. Hvis det legges ut forsiktig, kan dette laget bli vesentlig mindre enn 10 cm.

#### *Sikkerhetslag.*

Et 40 cm sikkerhetslag er anbefalt for å gjøre utformingen ytterligere konservativ. Sikkerhetslaget utlegges både i nærheten av vraket og i resten av det forurensete området.

#### *Total tykkelse*

Den totale tykkelsen på tildekkingslaget er 290 cm (~ 3 m) i nærheten av vraket og 115 cm (> 1 m) i resten av det forurensede området.

#### *Potensielle utfordringer ved utformingen av tildekkingslaget*

Dersom det blir for stor blanding mellom adveksjonslaget og det kjemiske isolasjonslaget kan det oppstå utfordringer knyttet til funksjonen til de spesifikke lagene. Dette må det tas høyde for i detaljprosjekteringen av tildekkingslaget.

Som del av detaljprosjekteringen bør det i tillegg gjøres en relevant modellering/beregning av advective prosesser i tildekkingslaget.

#### **4.1.4 Tildekkingsmaterialer og tildekkingskomponenter**

Materialer som vanligvis brukes i isolerende tildekkingslag, omfatter rene sedimenter, sand eller grus, samt erosjonsbeskyttende materialer (f.eks. granulært materiale som kan motstå hydrodynamiske krefter). I noen tilfeller kan tildekkingssystemet også omfatte syntetiske materialer som for eksempel geomembraner eller geotekstiler. Disse kan tilføre et filterlag mellom ulike materialer, forsterke tildekkingen, eller redusere utlekking av forurensning gjennom tildekkingslagene evt. å stabilisere fundamentet hvis tildekkingen skjer i myke sedimenter. Reaktive tildekkingslag øker spesifikke fysiske eller geokjemiske egenskaper som vannavstøtning, sorpsjon og modifisering av redoksforhold. Dette kan være ulike materialer, som organisk leire eller aktivt kull. Tykkelsen eller oppbyggingen av hvert lag bestemmes ut fra stedsspesifikke forhold som type forurensning, materialegenskaper og hydrodynamiske forhold. I dette tilfellet er materialer med god evne til å binde kvikksølv avgjørende for tildekkingslagets funksjon.

Ønskede egenskaper som fysisk isolasjon, stabilisering/erosjonsbeskyttelse og kjemisk isolasjon kan være oppfylt i ett og samme materiale, eventuelt av flere ulike lag. Den endelige utformingen av tildekkingslaget avhenger av mange faktorer som omfatter de opprinnelige sedimentenes egenskaper, forurensningstype og egenskaper, overflatevann hydrodynamikk, hydrogeologi og tilførsel av grunnvann, samt human og eller økologisk eksponering definert i en risikovurdering.

#### *Tidligere anbefalte tildekkingsmaterialer*

Seksjon 6 i tildekkingsdesignrapporten (DNV GL, 2014b) omtaler alternative materialer, inkludert lavt permeabilitetsmateriale og aktive sorbenter. Materialer med lav permeabilitet er typisk silt og leire. Plassering av disse materialene på store dyp er svært utfordrende. Dette må vurderes som en del av detaljprosjekteringen.

Den foreslåtte utformingen av tildekkingslaget anses som konservativ, fordi hvert enkelt tilleggslag vanligvis har flere funksjoner. Ved å gjøre lagtilsetningen additiv, opprettes et svært tykt lag som sikrer beskyttelse mot forurensningen.

De ulike lagene kan i realiteten ha flere funksjoner, både kjemisk isolasjon, bioturbasjon samt beskyttelse mot adveksjon.

#### 4.1.5 Geotekniske problemstillinger

Rambøll har gått gjennom de geotekniske utredningene som er gjort av området ved vraket.

Ett funn ble gjort. Scenarioet som omfatter skade på tildekkingslaget som følge av et jordskjelv (scenario  $10^{-2}$  og  $10^{-4}$  (GeoPartner AS, 2014) bør vurderes nærmere med tanke på mulig endring av tildekkingslagets bæreevne. Det anbefales derfor at det utføres en evaluering av dette som del av detaljprosjekteringen av et eventuelt tildekkingsiltak.

#### 4.1.6 Oppsummering

- Kvikksølvet i fisk (brosme) rundt ubåten på Fedje stammer ikke fra kvikksølvet fra U-864.
- Det foreslåtte tildekkingslaget anses som godt begrunnet og den foreslåtte oppbyggingen er i henhold til normal praksis. Vi påpeker imidlertid at detaljprosjektering av tildekkingslaget må utarbeides før endelig vurdering kan gjøres.
- Dersom det blir for stor blanding mellom adveksjonslaget og det kjemiske isolasjonslaget kan det oppstå utfordringer knyttet til de spesifikke lagenes funksjon. Dette må det tas høyde for i detaljprosjekteringen av tildekkingslaget.
- Som del av detaljprosjekteringen bør det i tillegg gjøres en relevant modellering/beregning av advektive prosesser i tildekkingslaget.
- Plassering av tildekkingsmaterialer som er egnet for det aktuelle området er svært utfordrende på store dyp. Dette må vurderes som en del av detaljprosjekteringen.
- Skade på tildekkingslaget som følge av et jordskjelv (scenario  $10^{-2}$  og  $10^{-4}$  (GeoPartner AS, 2014) bør vurderes nærmere med tanke på mulig endring av tildekkingslagets bæreevne.

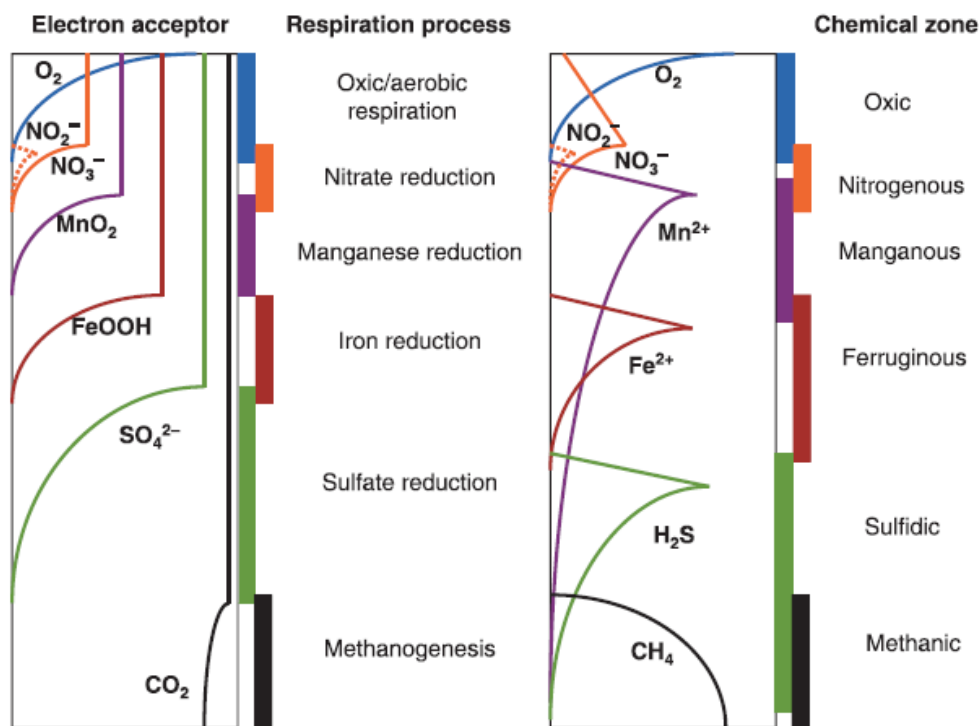
## 4.2 Kvikksølvkjemi

Metylering av kvikksølv i miljøet er svært komplekst, og helt avhengig av *in situ*-betingelser. Erfaringer fra f.eks. metylering i ferskvann er ikke spesielt relevant for kvikksølvkjemien i tiltaksområdet (saltvann). I denne utredningen har vi fokusert på å oppsummere foreliggende kunnskap med direkte relevans for prosesser i havbunnen og ved fremtidige tildekningslag ved tiltaksområdet.

Potensialet for kvikksølvmetylering avhenger av de kjemiske betingelser i bunnsedimenter og tildekningslag, hvor særlige redoksmiljøer henholdsvis fremmer og minsker potensialet for metylering av kvikksølv. I dette avsnittet gjennomgås generelle prinsipper som er relevante for risikoanalysen og vurderer konsekvensene for den foreslåtte tildekning. Nedenfor beskrives først den grunnleggende forståelse av redokskjemi i sedimentene, og før kvikksølvkjemien gjennomgås mere detaljert, belyses dessuten ulikheter i betingelser for fersk- og saltvann.

### 4.2.1 Redokskjemi i sedimentene

Sedimenter er preget av en forutsigbar vertikal sekvens av biogeokjemiske reaksjoner (Thamdrup, 2009). Mikrober krever elektronakseptorer for å konsumere og bryte ned organisk materiale (substrat). Reduksjonen av forskjellige elektronakseptorer skjer i en forutsigbar rekkefølge, i henhold til hvor energisk gunstig reaksjonen er. Oksygen (den mest energisk gunstige elektronakseptoren) er tilført fra det overliggende vann til sedimentet og forbrukes nær overflaten. Dypere i sedimentet utvikles soner dominerte av reduksjon av nitrat, manganoksider, jernoksider og sulfater (Figur 4-3).



Figur 4-3. Illustrasjonen viser redokssonene fra sedimentoverflaten og nedover i marine sedimenter, hvor ulike elektronakseptorer dominerer respirasjon med organisk materiale (Thamdrup, 2009).

Reduksjonen av elektronakseptorene som er vist overfor, resulterer i produksjon av reduserte forbindelser, f.eks. sulfid/H<sub>2</sub>S dypste nede i laget. Dybden og utbredelse av disse redokssonene er avhengig av:

- Transport av oksygen til sedimenter
  - Mer permeable sedimenter tillater dypere oksygeninntrengning i sedimenter, som forandrer redoksgrenser nedover (Sayles, 1996),
- Tilgjengeligheten og reaktiviteten til organisk materiale og næringsstoffer
  - for eksempel i sedimenter nær kyster/elver med høyt innhold av organisk materiale, da forbrukes oksygen raskt, og bare de øvre millimeter av sediment er aerobe. I motsetning til dette, inneholder havsedimenter små mengder av organisk materiale, og sedimenter kan være aerobe til større dybde (Sayles, 1996),
- Tilgjengeligheten av elektronakseptorer
  - F.eks. ferskvannssystemer har en tendens til å ha lavt sulfid, fordi de har lav sulfattilgjengelighet. Havsedimenter har derimot typisk stort innhold av sulfid og meget lave innhold av nitrat, derfor er sulfiddannelse dominerende i marine sedimenter.

Etter at en sedimenttildekning er på plass, vil redokssoner utvikles i henhold til de fysiske/kjemiske forhold i tildekningslagene (Himmelheber D.W., 2008).

#### 4.2.2 Ferskvann versus sjøvann

Ved gjennomgangen av dannelse av metylkvikksølv har vi fokusert på fysiske/kjemiske forhold som er forventet ved tiltaksområdet. Fra ferskvann finnes en del erfaringer med kvikksølvforurensning og med dannelse av metylkvikksølv, disse refereres ofte i litteraturen.

Ferskvannssystemer avviker imidlertid fra forholdene ved tiltaksområdet innenfor bl.a. følgende parameter:

- Organisk materiale: I motsetning til ved tiltaksområdet finnes det ofte store forekomster av organisk materiale i ferskvannssedimenter, hvilket øker potensialet for metylering av kvikksølv.
- Sulfat: Det finnes ikke stort innhold av sulfat i ferskvann. Sulfat har stor betydning for de anaerobe prosessene i bunnsedimenter, også for dannelse av metylkvikksølv.
- Oksygen: I ferskvann er det oftere begrenset tilgjengelighet av oksygen og dessuten ses ofte oppbygning av en termoklin som isolerer bunnvann fra oksygenholdig vann øverst i vannsøylen. I tiltaksområdet er det imidlertid god tilførsel av oksygen i vannsøylen og den øverste delen av bunnsedimentene. Oksygen er en viktig faktor for demetylering av metylkvikksølv.

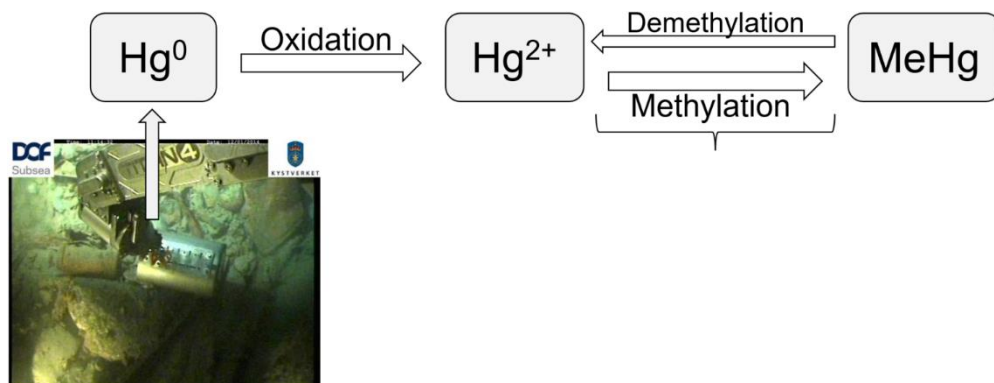
Dessuten har ferskvannssystemer lavere saltholdighet og lavere pH, og oppsummert dermed underlagt noe andre bio-/geokjemiske forhold og kan ikke direkte sammenlignes med havvannssystemer mht. kvikksølvkjemi og dannelse av metylkvikksølv.

#### 4.2.3 Metylering av kvikksølv

En bekymring er potensialet for at kvikksølv (spesielt metylkvikksølv) blir tilgjengelig i signifikante mengder for næringskjeden, og hvordan den foreslåtte tildekning påvirker dette.

Denne avsnitt gir en oversikt over kvikksølvkjemi i miljøet, med fokus på hvilke forhold som understøtter kvikksølvmetylering. Denne vurderingen fokuserer på kvikksølvkjemi i havmiljøet.

De viktigste kvikksølvreaksjonene som kan forekomme i sedimentet og porevannet er oksidasjon av elementært kvikksølv ( $\text{Hg}^0$ ) til divalent kvikksølv ( $\text{Hg}^{2+}$ ), metylering av  $\text{Hg}^{2+}$  til metylkvikksølv (MeHg) og demetylering av MeHg til  $\text{Hg}^{2+}$  (Figur 4-4).



Figur 4-4. De dominerende reaksjoner med kvikksølv i bunnsedimenter.

Akkumuleringspotensialet av metylkvikksølv avhenger av likevekt mellom metylering og demetyleringsreaksjoner. Imidlertid kan konsentrasjoner av MeHg brukes som en indikasjon for metyleringshastigheten (for eksempel (Heyes A., 2006) og (Lambertsson L., 2006)). Det er viktig å merke seg at kvikksølvmetylering ikke er relatert til produksjon av metan (dvs. metanogenese).

Kvikksølvmetylering utføres primært av sulfatreduserende bakterier (SRB) i miljøet. Under anaerobe forhold reduserer SRB sulfat til sulfid. Disse forholdene forekommer hovedsakelig i sedimenter, men kan også forekomme i soner med lavt oksygeninnhold i åpent vann, f.eks. dype

stillestående fjorder (Ullrich S.M., 2001). Akkumulering av MeHg i forurensede sedimenter er i stor grad avhengig av biotilgjengeligheten av  $\text{Hg}^{2+}$  og aktiviteten til SRB, men er bare svakt relatert til totale kvikksølvkonsentrasjoner (J.M. Benoit C. G., 2001), (Heyes A., 2006), (Drott A., 2007), (Han S., 2008). Dannelsen av sulfid har stor betydning for kvikksølvmetylering. Kvikksølvmetylering har en tendens til å være størst under forhold der SRB er aktiv, men ikke når det er en stor sulfidoppbygging. Høye konsentrasjoner av sulfid reduserer metaboliseraten for SRB, og kan også føre til utfelling av HgS-mineraler og dannelse av ladede HgS-komplekser (reduere  $\text{Hg}^{2+}$  biotilgjengelighet) (Ullrich S.M., 2001). Imidlertid er de mest biotilgjengelige formene av  $\text{Hg}^{2+}$  nøytralt ladede sulfidkomplekser som kan diffundere gjennom cellevegger. Disse forbindelsene dannes ved lave sulfidkonsentrasjoner i området 0,1 til 10  $\mu\text{M}$  sulfid (J.M. Benoit C. G., 1999), (J.M. Benoit C. G., 2001). Derfor har kvikksølvmetylering tendens til å være størst når det forekommer anaerobe forhold i nærheten av aerobe soner, hvor sulfid kan transporteres ut av porevannet (Hollweg T.A., 2010). Disse forholdene tillater SRB-aktivitet uten oppbygging av sulfid.

Prosessene som oksiderer  $\text{Hg}^0$  til  $\text{Hg}^{2+}$  er spesielt relevante for vårt tiltaksområde, da forurensningskilden er  $\text{Hg}^0$ . Selv om anaerob oksidasjon og metylering av lave (dvs. nanomolare) konsentrasjoner av  $\text{Hg}^0$  er blitt demonstrert under laboratoriebetingelser, er disse prosessene sakte og sannsynligvis krever de bestemte mikrobielle arter (Hu H., 2013), (Colombo M.J., 2013).

#### *Kjemiske forhold og potensial for kvikksølvmetylering i tildekkingslaget*

Produksjonen av metylkvikksølv i tildekkingslaget vil avhenge av redokskjemien i sedimentene. Data om gjeldende redoksforhold i tiltaksområdets sedimenter er begrenset. Totalt organisk karbon (TOC) i sedimentet er lavt (<1%) rundt vraket, noe som tyder på begrenset potensial for mikrobiell respirasjon. Den nåværende forekomsten av kvikksølv som metylkvikksølv er på den lave siden ( $\leq 1\%$ ) sammenlignet med andre sedimenter i elve- og marine sedimenter nær kyst (0,5% - 2%; (Hollweg T.A., 2010)).

NIVA utførte i 2015 laboratorieforsøk med det formål at å simulere betingelser i sjøbunnen ved tiltaksområdet i såkalte «microcosm». Denne studien undersøkte effekten av tildekning/ ikke dekning av forurenset sediment med og uten tilsetning av reaktiv organisk karbon (i form av tørkede alger), hvor fokus var på sediment grensesnittet mot overliggende sjøvann. Målet med designet av disse forsøkene var å karakterisere hvilke geokjemiske/redoks endringer som kunne skje med og uten tildekning, hvis store mengder av organiske materiale i form av petroleumsprodukter ble frigjort fra vraket. Denne studien viste at tildekning av sediment uten tilsatt substrat (alger) ikke resulterte i utvikling av sulfatreduserende forhold eller produksjon av metylkvikksølv innen seks måneder (Ndungu, 2015). Dette funnet støtter konklusjonen om at potensialet for sulfidproduksjon er begrenset og forventes nær overflaten på det forurensede sediment.

Tilsetningen av en meter eller mer av tildekkingsmateriale vil forandre redoksforholdene i det forurensede sedimentet. Det nåværende tildekkingsdesignet medfører et gjennomtrengelig øvre lag av småstein og grov sand hvor overflatevannadveksjon er sannsynlig (Kystverket, 2014a). Det grove materiale som brukes øverst i tildekkingsmaterialet er lett gjennomtrengelig, slik at det tillater tilførsel av oksygenholdig vann. I tillegg er innholdet av organisk materiale i dette tildekkingsmaterialet sannsynligvis lav, som er typisk for grovkornet materiale i området (NIVA, 2005a), mikrobiell respirasjon og dermed forbruket av elektroacceptorer (oksygen, sulfat mv.) vil derfor med stor sannsynlighet være svært begrenset. Det er sannsynlig at mye av det øverste tildekkingsmaterialet (erosjons- og bioturbasjonslaget) blir oksiderende, hvor langt ned oksygen trenger i det følgende adveksjonslaget avhenger av de endelige valgte egenskaper for dette laget, men det forventes at oksygenivået avtar sterkt nedover pga. avtagende hydraulisk

ledningsevne. Det følgende kjemiske barrierelaget forventes primært å begrense videre transport av oksygen. Anaerobe betingelser forventes derfor etablert særlig i bunnen av tildekningen og i det underliggende, forurensede sedimentet. Uten detaljert informasjon om den kjemiske sammensetningen av tildekningsmaterialet og bunnsedimentene, er det vanskelig å forutsi den vertikale utbredelsen av redokssonene som vil dannes.

En bekymring med hensyn til den foreslåtte tildekningen er at et potensielt utslipp av organisk materiale (i form av biprodukter fra petroleum) fra vraket forventes å føre til dannelse av sterkt reduserende forhold under tildekningen. NIVA's laboratoriestudie viser at hvis det blir tilført biotilgjengelig organisk materiale til den forurensede sediment overflaten, vil det resultere i sulfid og metylkvikksølvproduksjon (Ndungu, 2015). Tilstedeværelsen av en tildekning i forsøket resulterte i økt konsentrasjon av metylkvikksølv i sedimentene. Imidlertid ville eksperimentet slik det var utformet ikke ha tillatt en vesentlig akkumulering av sulfid under tildekningen da kappetykkelsen bare var 3 cm. Som beskrevet ovenfor vil en akkumulering av sulfid hemme ytterligere kvikksølvmetylering. Ved det planlagte designet av tildekning ved ubåten er formålet å redusere kjemisk transport, og sulfid kan bygges opp dypt ned i tildekningsmaterialet og øverst i det forurensede sediment. I tillegg vil  $\text{Hg}^{2+}$  som en nødvendig komponent for metylering bli begrenset under anaerobe forhold, siden oksydasjonen av  $\text{Hg}^0$  til  $\text{Hg}^{2+}$  er langsom under anaerobe forhold.

#### *Kvikksølvkjemien i vannsøylen*

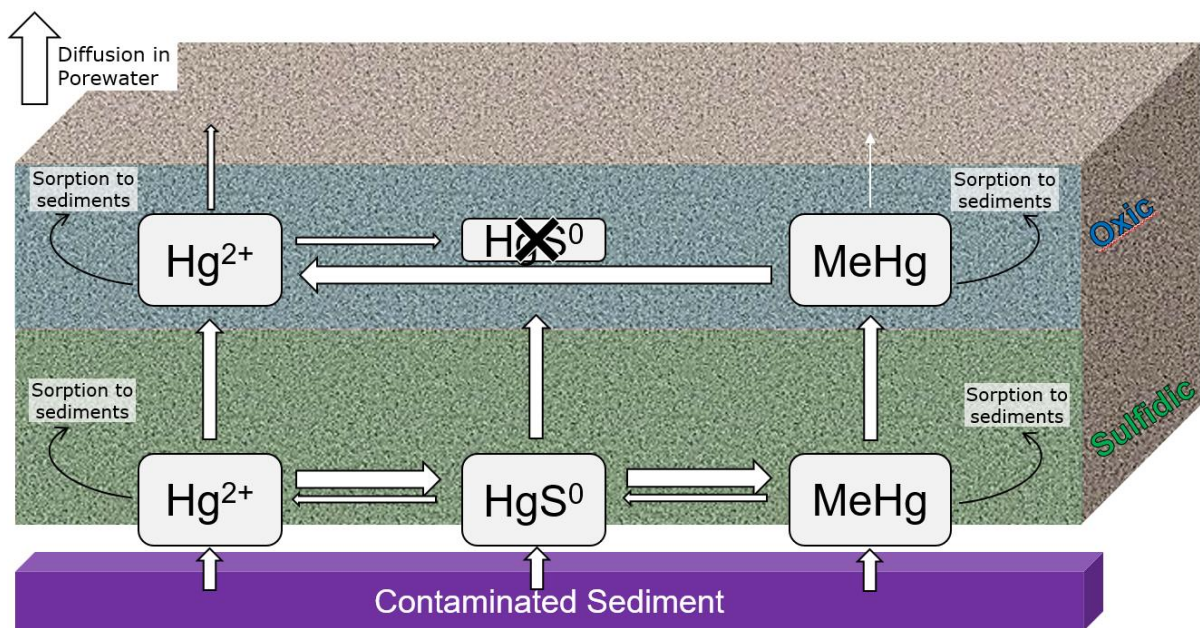
Hvis det ble dannet metylkvikksølv under tildekningen, er det en bekymring for dets potensial til å diffundere gjennom porevannet opp til overflatevannet. Basert på tildekningsdesignet, vil denne prosessen være minimal. I tillegg vil den aerobe sone som forventes dominerende i den øvre del av tildekningsmaterialet, understøtte demetyleringen (som dominerer over metylering under aerobe forhold, (Ullrich S.M., 2001)) før kvikksølv når overflaten på tildekningen.

Om kvikksølv ( $\text{Hg}^{2+}$  og  $\text{Hg}^0$ ) skulle diffundere ut i vannfasen over tildekning er kjemien for den videre skjebnen for kvikksølvet svært kompleks. Omdannelse til metylkvikksølv avhenger bl.a. av innhold av organisk materiale, pH og temperatur (Barbara Gworek, 2016). I sjøvann som ved tiltaksområdet, med lavt organisk innhold og med høyt innhold av oksygen, er kvikksølvforbindelser som  $\text{HgCl}_4^{2-}$  og  $\text{HgOH}^-$  dominerende, mens svovel- og metylforbindelser er de som typisk forekommer under anaerobe og organiske rike forhold som f.eks.:  $\text{HgS}^{2-}$ ,  $\text{CH}_3\text{Hg}^{5-}$  og  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  (Barbara Gworek, 2016). Følgelig er potensiale for metylering av kvikksølv i vannmassene ved tiltaksområdet vurdert å være begrenset.

#### *Oppsummerende konseptuell modell av kvikksølvkjemien*

I Figur 4-5 er det vist en skjematisk beskrivelse av sannsynlig transport og endringer av kvikksølvkjemien under tildekningen, hvis det er en tilgjengelig mengde av organisk materiale til å drive sulfatreduksjon. Imidlertid begrenser mangel på tilgjengelige data angående nåværende redoksf forhold på stedet muligheten for å gjennomføre kvantitative vurderinger. Dessuten vurderes den aktuelle kilden til organisk materiale i størsteparten av det tildekkede arealet å være svært begrenset, og dermed er potensialet for sulfiddannelse begrenset.





Figur 4-5. Konseptuell modell av kvikksølvreaksjoner og transport om sulfatreduserende forhold dannes i bunnsedimenter ved tiltaksområdet.

#### 4.2.4 Gassdannelse

Av prosesser med relevans for påvirkning av tildekningsmaterialer er dannelse av gassbobler nede i sedimentet. Oppløste gasser (som nitrogengass eller metan) kan dannes fra kjemiske reaksjoner i marine sedimenter. Transport av gassbobler oppstår når disse gassene danner store nok bobler til å diffundere oppover mot sedimentoverflaten. Transport av gassbobler fremmer stofftransport utover de gassene som danner boblen (Klein, 2006), (Cheng, 2013). Metan-bobledannelse forekommer typisk i kystsedimenter med høyt innhold av organisk materiale, hvor metan dannes innenfor omtrent en meter av sedimentoverflaten (Burdige, 2006). I havsedimenter med lavt organisk materiale (som ved ubåten), strekker den aerobe sonen typisk desimeter dypt (Sayles, 1996). Vurderingen er at lavt organisk innhold og stor permeabilitet øverst i sedimentet, vil undertrykke potensialet for metanogenese. Hvis det i lokale spots dypere i lagene teoretisk kan dannes gassbobler, vil den massive tildekningen begrense transporten via gassboblene, og det vil være gode muligheter for gjenutfelling av løst materiale før en gassboble uventet når sediment-/vanngrensesnittet. Følgelig har vi vurdert at der er et svært begrenset potensial for effekter relatert til gassdannelse under tildekkingslaget, og dette vil ikke medføre noen endring av den miljørisikoen som ble vurdert i 2014.

#### 4.2.5 Oppsummering

- Oppsummert er det mindre sannsynlig at tilstedeværelsen av tildekkingslaget gir geokjemiske og fysiske forhold som vil understøtte dannelsen og transporten av metylkvikksølv til overflatevannet. Det er dermed ikke fremkommet informasjon om tilsier at konklusjonene i risikovurdering ikke fortsatt er gyldige.
- Informasjon om gassdannelse under tildekkingslaget vil ikke medføre noen endring av den miljørisikoen som ble vurdert i 2014

Videre anbefales det under det endelige designet av tildekningen å undersøke:

- Om det i den øverste delen av tildekkingslaget kan opprettholdes en aerob sone, f.eks. i form av ren sand uten organisk materiale, hvor adveksjonsprosessene via trykkbølger tilfører oksygenholdig vann. Metylkvikksølv er svært ustabil under aerobe forhold, det

aerobe laget vil dermed fungere som et sluttlag for å hindre migrasjon av metylkvikksølv ut av tildekningslaget,

- Om det dypere nede tildekningslaget kan sikres innhold av kjemiske forbindelser som sikrer opprettholdelse av særlige redokssoner, vil potensialet for metyleringen av kvikksølv begrenses ytterligere. Dette vil kunne oppnås ved utlegging av et lag med høyt jerninnhold, slik at det kan dannes jernreducerende forhold. Dette vil imidlertid kreve en detaljert undersøkelse for å sikre effektiviteten.

### 4.3 Heving av last

I dette kapitlet presenterer vi informasjon og vurderinger knyttet til heving av last, herunder også heving av last gjennom å heve vraket. Det blir belyst i hvilken grad fremskaffet informasjon vil medføre endring av miljørisikoen på kort sikt, slik den ble vurdert i 2014, eller om øvrige funn kan medføre en endring på tidligere beslutningsgrunnlag i prosjektet.

#### 4.3.1 Informasjonsinnhenting fra eksterne aktører

Nedenfor gir vi en oppsummering av de innspill og den informasjonen, knyttet hovedsakelig til teknologi, som vi har mottatt fra eksterne aktører igjennom dette prosjektet. Relevante momenter er diskutert nærmere i nedenforliggende kapitler. Vi har også vært i kontakt med Miljøvernforbundet, som har oversendt sin vurdering av mandatet i dette prosjektet, samt deres vurdering av enkelte momenter i tidligere utredninger tilknyttet U-864.

##### *Kompetanseteamet Bergen*

Kompetanseteamet fra Bergen mente at det forliggende grunnlag for beslutning om tildekking var mangelfullt og heving av U-864 var eneste løsning som ivaretok den langsiktige miljørisikoen. Usikkerhet med eksplosjonsfare, jordskjelv og sannsynlighet for stor spredning av kvikksølv (herunder metylering i vannfasen) i fremtiden var deres hovedargument. De kjente ikke til noen vesentlig ny teknologi tilgjengelig for heving av vrak eller last siden siste vurdering i 2014. De mente at det finnes tilstrekkelig kompetanse innenfor marin sektor både i Norge og internasjonalt til å heve vraket på sikker måte, og at dette er godt dokumentert i de utredninger som tidligere er gjort.

##### *Møte med DNV GL*

DNV GL konkluderte med at ingen av alternativene for håndtering av forurensing, last og heving var umulige, men at risikobildet varierte. DNV GL mente at dette var grundig behandlet i deres risikovurderinger. Det fremkom imidlertid av møtet at enkeltelementer i risikovurderingene kunne utfordres, men at dette ikke ville påvirke DNV GLs endelige konklusjon om at tildekking er den beste tekniske løsningen.

De kjente ikke til noen vesentlig ny teknologi som kunne benyttes ved heving av last. Imidlertid ble det nevnt i møtet at mudringsmetoder har blitt noe forbedret, noe som kan gi mindre spredning av forurensning under en eventuell operasjon.

På surveyfronten skjer det mye på utstysfronten med utbedrete metoder å identifisere f.eks. objekter i et konkret område. Videre har også utstyr som f.eks. droner åpnet for nye survey muligheter i vraket. Dette bør sjekkes nøyere for å klargjøre i hvor stor grad dette kan hjelpe for å få bedre kunnskap om båt og last.

DNV GL sa at dykkeroperasjoner ble frarådet i 2014 grunnet sikkerhetsmessige hensyn, men at det kan ha skjedd utvikling på dette området som vil kunne endre denne vurderingen.

Vedrørende sannsynlighet for selvdetonering av ammunisjon støttet de seg på uttalelser fra sjøforsvaret angående risiko (svært lav risiko).

### *Reidar Ulvøy*

Reidar Ulvøy representerer en gruppe basert med utspring i ledende aktører innen subsea-bransjen. Disse har gått sammen for å gi innspill til det man mener er beste gjennomføring av en eventuell heving av vraket. Nokså beskrivende dokumentasjon var mottatt tidlig i oppdraget og man anså det derfor som tilfredsstillende å gjennomgå forslag i telefonsamtaler. Følgende hovedpunkter trekkes frem fra innspill og samtaler:

- Det er teknisk overkommelig å heve vraket på en grei måte med kompetanse og teknologi fra offshorebransjen
- Lasten bør heves sammen med vraket i lukket container/ramme. Det er mulig å ta opp kun lasten, men en heving av vrakdeler vil være enklere og sikrere både operasjonelt og med hensyn til utslipp.
- Det er levert et utarbeidet konsept for hvordan man ser for seg at dette gjøres (Figur 4-6).
  - Foreslått container vil inkludere hydraulisk låsing, doble tettinger og utstyr for å kunne suge ut til et lite undertrykk som sikrer mot utslipp under løft.
  - Det utstyr som man har foreslått å bruke (basket/grabb) har et kostnadsestimat på 55 millioner NOK. Utstyret kan gjenbrukes i f.eks. opprydningsarbeid i oljebransjen.
- Et hevingsprosjekt bør organiseres med kompetanse fra flere aktører og disipliner innen offshorenæringen da man vil inkludere den beste teknologi og kompetanse fra flere områder. Dette inkluderer kompetanse fra operatørene på sokkelen.
- Det finnes robust teknologi for å kunne suge forurenset masse til lukket system innen brønnteologi.
- Ulvøy foreslo å suge kvikksølv/kvikksølvforurenset sediment med «Bailer», dvs. gas-lift teknologi fra brønnteologifaget (Figur 4-7).
- Testing og optimalisering av konsept for å demonstrere gjennomførbarhet med minst mulig miljøpåvirkning er essensielt.
- Forstyrrelser av bunnsedimenter rundt vraket kan reduseres med bruk av matter, f.eks. sprengingsmatter. Det foreligger erfaring fra slik bruk innen offshore-bransjen.
- Foreslått konsept er basert på standard offshore fartøy som er i markedet pr. i dag, og derfor vil rater og rateestimat kunne baseres på gode analyser fra meglerhus.



### *Svein Tore Bjelland*

Svein Tore Bjelland ble kontaktet og et møte ble arrangert 28. februar 2019. Han var blitt kjent med prosjektet og vraket gjennom at han var om bord på et støttefartøy på tokt til ubåten i 2003 og 2013. Han var da blitt personlig engasjert og har i ettertid tenkt mye på hvordan kvikksølvforurensingen kunne løses. Møtet sammenfattes som følgende:

- Det ble demonstrert og forklart konsept rundt håndtering av kvikksølv, masser og håndtering av vrak. Konseptet er ikke veldig detaljert (på engineering nivå). Det var heller ikke dokumentert i særlig grad med tekst, men ble fysisk visualisert under møtet med modell.
- Konseptet har hovedfokus på miljøovervåkning og å hindre spredning under operasjon.
- Sammendrag konsept:
  - Installere instrument stands med «sniffer»/sensorer for kvikksølvspredning. Svein Tore har vært i kontakt med RTS (Rental Technology & Services AS) som bl.a. er leverandør av undervannsinstrumentering. De har en «kube» som passer til å ta inn data, lagre og overføre til overflate. Sensorer/«sniffere» er ikke identifisert enda.
  - Installere en vegg rundt der hvor hovedsakelig forurensing er lokalisert, f.eks. spuntvegg e.l. Dette vil redusere spredning av forurenset sediment under operasjonen og hindre spredning utover området som skal dekkes til.
  - Suge opp masse som er forurenset til lekter eller tankbåt innenfor inngjerdet område.
  - Installere en «template» over vrakdeler som har installert bl.a. vinsjer over vrakdeler. (Lignende løsning er skissert i tidligere utredning, ref. Vedlegg V3.05 Oceaneering v1.0 (Kystverket, 2014b)
  - Løfte opp vrakdeler slik at man får tilgang til kjølkasser, hente ut resterende kvikksølv i kjølkassene
  - Legge ned vrak på samme sted.
  - Bruke templater som armering/forskaling slik at vraket blir liggende i sarkofag. Dette vil ivareta forhold i krigsminneloven.
  - Støpe over vrakdeler og nærmeste forurenset område, eventuelt kan vrak heves før overdekking.
  - Eventuelt også dumpe stein over området, slik at området senere også kan tåle fiskeriaktivitet
- Videre fortalte Bjelland at han i Geoconsult var involvert i en jobb i Japanhavet som gikk ut på å suge opp 2500 tonn med «nikkelmatte» etter havariet av «White Koowa». Denne operasjonen ble utført på 525m dybde, og med meget sterke havstrømmer (opp til 3,5 knop).

### *Unitech*

Det ble avholdt møte med Unitech 21.03.2019. Unitech har jobbet mye med å innhente informasjon og prosessere denne, samt utarbeidelse av et konsept for heving. De fremholder følgende hovedpunkter:

- Tidligere utredninger, studier og evalueringer er ikke basert på full kunnskap rundt tilstanden til skroget. Heving av vraket er forkastet bl.a. fordi man tidlig estimerte kostnad basert på at vrakdelene ikke kunne løftes fra toppen av trykkskroget.
- Unitech mener mye mer av kjølen er intakt enn tidligere antatt, dette på grunn av kjølen oppbygning og at man mener tidligere antagelser er basert på feil vurderinger (torpedotreffpunkt)
- Det er mindre risiko for detonering av ammunisjon ved heving, enn om ammunisjon ligger under et tildekkingslag.

- Når skroget er i mye bedre forfatning enn tidligere antatt mener Unitech at kostnaden ved heving vil bli betraktelig redusert.
- De har utviklet et eget konsept som er basert på å sette inn løftepunkter øverst i trykkskroget og løfte med et spesialbygd fartøy basert på ombygging av lektere.
- Unitech har et egenutviklet et ROV-verktøy som brukes til å bore inn festepunkter (dette kan også frese, gjenge og sveise)
- Unitech har benyttet kunnskap om stål-type brukt i tyske WW2 ubåter og materialkontroll foretatt av DNV GL på U-864s trykkskrog til å kalkulere at hvert festepunkt tåler belastning på 150 t.
- For å sikre mot utslipp under hevingen kan det installeres en spesiell «duk» (presenning) rundt hver vrakdel så nær bunnen som mulig.
- Det finns instrumentering som muliggjør å identifisere kvikksølv både i beholdere og i løs tilstand i bunnsedimenter
- Det bør være mulig å verifisere bruddsnittet på baugseksjonen gjennom å bruke høyfrekvent sonar på skrått inn i bunnsedimentene
- Forurensede sedimenter bør hentes opp med fryseteknikk, da det å pumpe/sugemudre kvikksølv er vanskelig.
- Risikovurdering av tildekkingsalternativet er basert på feil/mangelfulle slutninger og inneholder usikkerheter som ikke kan bevises.

#### *NUI v/Rolf Røsland*

NUI tok tidlig i prosjektet kontakt med Rambøll/Semar for å gi innspill knyttet til bruk av dykkere for ulike undervannsoperasjoner. NUI v/Rolf Røsland ble kontaktet pr telefon (Rolf Røsland).

Følgende innspill ble mottatt:

- Vurderinger av dykking i forprosjektet fra 2014 (Vedlegg V.3.04 «Use of divers to raise the mercury – Assessment of mercury exposure, (Kystverket, 2014c) inneholder ingen veloverveide argumenter for hvorfor man ikke kan bruke dykkere. Konklusjonen ser ut til å være basert på at man vurderer det til at man kan klare seg med ROV og derfor er dykking unødvendig.
- Dykkere veldig godt beskyttet både med drakter/maske og med inhalator for å minimere eksponering for forurensing.
- Dykking utføres jevnlig i forurenset miljø med tilsvarende eksponeringsrisiko. Dykkerselskapene har etablerte prosedyrer for å håndtere dette. Disse prosedyrene er godkjent av operatørselskapene.
- Om det skulle komme forurensing inn i deler av klokkesystemet, kan dykkere trekke inn i andre deler av klokkesystemet og isolere forurenset del. Atmosfæren til dykkerne overvåkes kontinuerlig.
- Risikoen knyttet til bruk av dykkere er sterkt overvurdert.

#### *Scanwaste*

Det ble arrangert et møte med Scanwaste og deres partner i Tyskland (Argentum Vivum Solutions (AVS)). Scanwaste hadde flere innspill i forhold til det som gikk på kvikksølv- og ammunisjonshåndtering. De hadde fulgt utviklingen i saken rundt U-864 siden den ble funnet i 2003. De hovedpunkter som ble trukket frem av Scanwaste er summert under:

- De mente kvikksølvbeholdere var i svært dårlig forfatning og således bør kvikksølvet fjernes uten å flytte beholderne. Dette kan gjøres ved å bruke et spesielt ROV-kutteverktøy for å åpne beholdere og suge ut kvikksølvet til nye beholdere.
- For å minimere risiko for spredning av sedimenter mente de at bunnen kunne dekkes til lokalt der det skal etableres tilgang til skroget.

- Scanwaste har gjennom sin tyske partner AVS utstrakt erfaring med nedsenket, gammel ammunisjon. I Tyskland finnes fremdeles store mengder ammunisjon som må håndteres både på land og i sjøen.
- Scanwaste mener at selvdetonering av ammunisjonen ikke kan utelates fra trusselbilde og således må håndteres.
- Ammunisjonen bør uskadeliggjøres på stedet. Uarmert ammunisjon kan like gjerne detonere som armert på grunn av kjemiske reaksjoner over tid.
- Metode for å desarmere ammunisjon er bruk av høytrykks vannstråle til å kutte gjennom stålet og så vaske ut sprengstoffet.
- AVS hadde gjort en test i Tyskland med 100 kg TNT mot store betongblokker, denne var filmet og vist i møte. Eksplosjonen knuste betongen fullstendig i biter. Det ble argumentert med at dette indikerte at en selvdetonering under et tildekkingslag vil spre kvikksølv opp i vannsøylen og langt ut over tiltaksområdet.
- Scanwaste/AVS mente det ikke er noe problem å filtrere ut vann når man mudrer på havbunnen. De så for seg en spesialbygget stor container med installert filter og poengterte at dette er eksisterende teknologi.
- Ytterligere filtrering av vann fra sedimenter kan gjøres i stor skala om bord i er overflatefartøy. Industrien i Tyskland har allerede slike filtre i bruk.
- Scanwaste har samarbeidspartnere med kapasitet til å ta imot og håndtere kvikksølv/sedimenter forsvarlig og forskriftsmessig.

### *Stinger*

Det ble valgt å ta kontakt med Stinger for å vurdere eventuell ny teknologi for tilgang til trange områder med ROV. Stinger er en aktør med spesialfelt innen små ROV'er. Det ble avholdt et møte med Stinger i Stavanger 4. mars 2019 for bedre å forstå tilgjengelig teknologi og medfølgende muligheter.

Problemstillinger med tilgang og innhenting av informasjon på trange steder ble diskutert i møtet og Stinger forklarte hvilke muligheter som eksisterer med deres teknologi, oppsummert i følgende punkter:

- Stinger har flere små farkoster. De bygger farkostene selv og har ved flere tilfeller tilpasset størrelse til mulig entringsåpning. En av de minste er Stinger Nano som er 320 x 150 x 170 mm, og veier 3 kg.
- I tillegg til at farkosten er veldig liten og har mulighet i å operere i alle frihetsgrader, kan den settes opp med netto oppdrift. Dette vil gjøre at man generelt thruster nedover i stedet for oppover.
- Det er mulig å operere i flere moduser. Hovedsakelig brukes mor/datter eller fritt flyvende. For å få tilgang inn i ubåten eller kjølen anser man at en mor/datter løsning er mest aktuell. Da kan dette f.eks. settes opp som en mindre farkost koblet til egen type OBS-ROV (Falcon) eller koplet til en WROV (arbeids ROV). Signal og strøm kommer da gjennom «moder-farkosten»
- Mobiliseringsomfang: For en Nano farkost vil det typisk være en mini-container til frakt. Men alle komponenter kan egentlig håndteres for hånd. I hovedsak kreves det en 16 A strømuttak for farkosten, ved mor-datter løsning må man ha strøm og Ethernet tilkoping for signaler til overflate.
- Stinger har levert tjenester til flere prosjekter der tilgangen er sterkt begrenset, f.eks. nevnes Siri tanken og Yme. På Yme krevdes at man modifiserte farkosten litt for å komme inn i et hull på 300 mm diameter. Ved flere av oppdragene har man også bygget verktøy tilpasset oppdraget (f.eks. test/sediment «scoop»).

Bruk av en slik minifarkost kan absolutt være interessant om man definerer noen av følgende observasjoner interessante i fremtidig arbeid: observasjon og eventuell prøvesamling inni vrakdeler, observasjon eller prøvetaking av toppsedimenter ved kjølen (man kan suge ut et veldig lite område som gir ROV tilgang ned «hullet»). Om det er tilgang inn i torpedo-rør fra utsiden er det også en veldig interessant løsning for å verifisere som det er torpedoer som er armert inni torpedo-rør. Denne løsningen fremstår som veldig mye mer robust enn en typisk drone-løsning på batteri. Farkosten vil være sterkere og har mulighet for lengre operasjonstid.

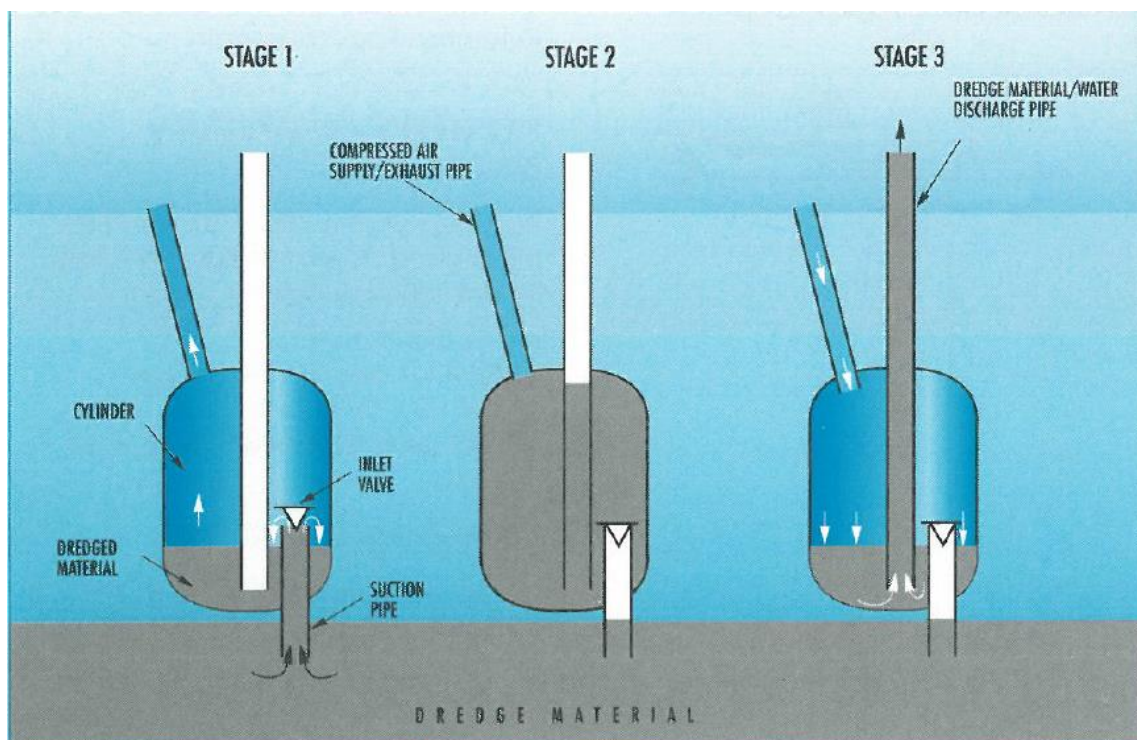


Figur 4-8. Stinger Nano ROV / bilde fra Stinger's nettside

#### *Pneuma pump*

Pneuma pump er en av mudringsteknikkene som er omtalt i «Salvage of U864 - Supplementary studies -Dredging» (DNV, 2008). De ble kontaktet pr. e-post for å vurdere om teknologien kunne brukes på aktuell dybde og om den er tilpasset «punkt-mudring» i stedet for en «område-mudring» som omtalt i nevnte studie. Pneuma responderte med at det var utført en studie i Storbritannia rundt en slik bruk gjennom å punkt mudre til et lukket system med på aktuell dybde. Denne studien skal visstnok vise at dette er mulig, men studien i helhet ble ikke fremlagt. Pneuma pumpens fortrinn er at den kan suge med mye differensial trykk og kan kvitte seg med massene til enten en lukket container eller til overflate. Prinsippet for pneuma pumpen er enkelt, effektivt og relativt robust med lite bevegelige deler.





**Figur 4-9. Pneuma pump prinsippet, fungerer ved at luft presses inn i kammeret fra overflaten, denne slippes ut slik at det blir et differensial-trykk som suger inn masse, når kammer er fylt stenges ventil mot omgivelse/sugeslange og ventil på «discharge» rør åpnes, lufta som presses inn vil tømme kammer mot «discharge» rør.**

### Aquadyne

Aquadyne ble kontaktet på telefon ettersom de har spesiell kompetanse på bl.a. survey instrumenter. I denne samtalen kom det frem, at det i tillegg til de funn som ble gjort for DNV GL i utarbeidelsen av «Report no 23916-3 Salvage of U-864 – Supplementary Study – Metal detector» (DNV, 2008), også er tilgjengelig en nyere type «Pipe tracker» som arbeider mer retningsbasert enn TSS 440 (som tidligere er vurdert) og derfor gir bedre resultater uten så mye bakgrunnsstøy. Det var TSS 440 som ble testet i 2008. Følgende hovedpunkter ble diskutert:

- Testing i 2008 gav lovende resultater for å identifisere beholdere og muligens løst kvikksølv i havbunnen
- Ny type «pipe-tracker» vil kunne gi bedre og mer detaljerte resultater
- Parametrisk «Seabed profiler», f.eks. SES 2000 vil kunne gi svært detaljerte bilder ned til maksimalt 10m penetrasjon med 1 cm oppløsning. I hvert fall i de øvre lagene er det sannsynlig at man vil kunne identifisere beholdere.
- «Conductivity profiler/probe» vil kunne gi god informasjon om eventuelt kvikksølv nedover i sediment lag.
- Elektromagnetisk seismikk vil kunne gi detaljerte bilder av bunnen.
- Aquadyne har arbeidet mye med problemstillingen rundt kvikksølvidentifisering og oppsuging i forbindelse med U-864.

Aquadyne deltok for øvrig også i møte med Unitech (21. mars 2019).

### Forsvarets Forskningsinstitutt (FFI) v/Øyvind Voie

I møte med Scanwaste ble det referert til en artikkel hvor FFI ved Øyvind Voie hadde uttalt seg om funn av gammel ammunisjon og risiko for detonering. For å diskutere litt nærmere rundt dette ble Øyvind Voie kontaktet pr. telefon. I hovedsak stilte han seg bak tidligere vurdering av at det

var en teoretisk mulighet for at ammunisjon i eller ved U-864 detonerer, men at det var avgjørende for denne vurderingen hvorvidt torpedoer var armert og satt inn i torpedorør. I tillegg var det relevant hvorvidt 105 mm kanon-ammunisjon hadde montert tennere. Han hadde lite tiltro til at annen ammunisjon kunne starte en kjedereaksjon.

#### *Øvrige aktører/leverandører innen subsea/ROV instrumenter*

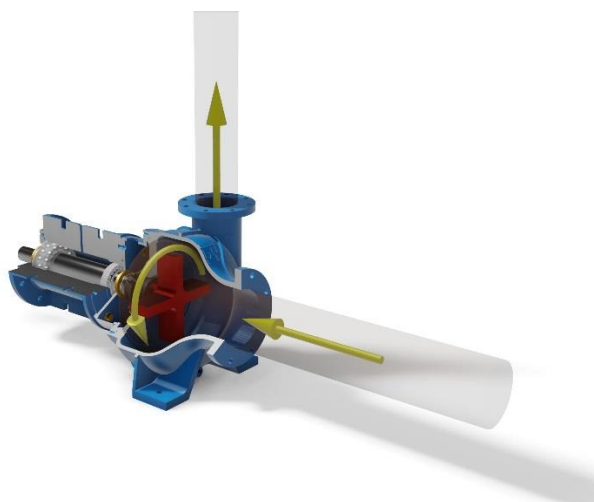
Diverse leverandører har blitt kontaktet for å vurdere eventuell ny eller oppdatert teknologi som vil hjelpe til å identifisere kvikksølv i flasker, i sedimentene, fritt i sedimenter, eller i vannsøylen. Det har ikke blitt identifisert utarbeidede og testede løsninger, men de firmaene som Rambøll og Semar har vært i dialog med signaliserer en positiv holdning til muligheten for å videreutvikle slike løsninger. Det som anses som mest lovende av tilgjengelig utstyr er å bruke «sub-bottom profiler» med kort «range» for å identifisere beholdere og eventuell større ansamlinger med kvikksølv i sedimentene. En slik «sub-bottom profiler» kan gjerne benyttes i kombinasjon med et magnetometer. En slik bruk vil måtte testes.

Ut av de funn og påstander som er kommet frem i møter og samtaler med eksterne aktører vurderes det at ikke siste/beste tilgjengelige teknologi er lagt til grunn for tidligere vurderinger, bl.a. gjennom Risikoanalysen til alternativ 3 utført i 2014, ref. «Vedlegg 3.03 Kvalitativ Risikovurdering, (Kystverket, 2014b)». Videre vurdering og dokumentasjon av teknologi og innhenting av informasjon/kunnskap av denne teknologien vil kunne påvirke vurdering av miljøpåvirkning ved alternativ 3.

### **4.3.2 Tilgang til lasten gjennom mudring**

Fjerning av forurenset masse for bl.a. tilkomst til lasten er felles for de fleste alternativer utarbeidet for forprosjektene og studier knyttet til U-864. Det er gjennomført diverse utredninger av mudring av området, men disse ser ut til være ensrettet rundt opphenting av et stort massevolum over hele tiltaksområdet. Samtidig er det gjort forsøk på å ta ut masse rundt vrakdelene med subsea gravemaskin og ejetorpumppe. I etterkant av slik mudring har det blitt detektert forhøyede verdier av kvikksølv i sedimenter utenfor tiltaksområdet, ref. Sluttrapport U864 – Fase 1 (Geoconsult, 2005) og Vedlegg V0.12, Tokt 3b (Kystverket, 2014b). Begge de ovennevnte metodene anses for å påvirke sjøen rundt tiltaket nokså mye. Gravemaskinen er tung, opererer på belter og kapsler ikke inn masser effektivt i det man utfører operasjonen, mens ejetorpumppe bruker enorme vannmengder som «drivverk» for å skape sug. Det medfører store mengder vann med høyt partikkelinnhold som spres etter å ha blitt blandet med masse som suges ut.

For de områdene nærmest vrakdelene hvor kvikksølvkonsentrasjonen er størst bør det vurderes å bruke et system som suger massen til et lukket system. Dette kan utføres ved hjelp av undervanns pumper som pumper direkte (Sentrifugal eller EDDY pumper), eventuelt med å bruke «gas-lift» utstyr/prinsipp som brukes i brønnteknologi, dette er lignende pneuma pumpen i prinsipp som illustrert i Figur 4-9. «Gas-lift» teknologien er ikke ny og det fysiske prinsippet er enkelt, og brukt i mange applikasjoner. Det er gjort en studie med «Pneuma pump» på tilsvarende bruk/dybde for å fjerne borekaks, men utover det er det usikkert om denne metoden er brukt i denne type operasjoner.



**Figur 4-10. Eddy pump prinsippet / bilde fra Eddy pump nettsider. Pumpeeffekten oppnås med en virvelstrøm som drar massen med seg gjennom pumpen. Derav er åpning mellom bevegelige deler og pumpehus større enn ved tradisjonelle sentrifugalpumper.**

Mudringsmetoder som indikert over vil redusere spredning av partikler i sjøen betraktelig under tiltaksgjennomføringen. Noe oppvirvling vil forekomme rundt sugehode, men det anslås at er relativt lite.

Får å få forurenset masse til sikker håndtering må denne samles i lukket system på sjøbunnen og tas til overflaten. Det er da to alternativer som anses som relevante, enten pumping direkte med slange opp til overflaten, eller pumping til lukket container som løftes opp. En sånn container måtte eventuelt være tilpasset for undervannsbruk med lukket system. Slike systemer eksisterer og operasjonen kan gjennomføres, iht. informasjon fra Scanwaste / AVS.

Det er ikke gjort noe vurdering rundt volum masse som bør hentes opp ved mudring, men f.eks. en supply-båt vil ha mulighet til å ha kapasitet til å mellomlagre relativt store mengder masser på dekk i lukkede containere. I tillegg har disse fartøyene «mudtanker» som er beregnet til slurry og enkle å rengjøre. Typisk kapasitet for mudrede masser på en supply-båt vil variere mellom 600 og 1600 m<sup>3</sup> og ratene for disse fartøyene p.d.d. lave og forventes å være relativt lave i overskuelig fremtid.

Uavhengig av sugemudringsmetode, må det antas at det vil være en del innblanding av vann. Det må derfor tas høyde for løsninger for å håndtere forurenset overskuddsvann. Scanwaste skisserte en løsning der et overflatefartøy har et renseanlegg om bord som renser overskuddsvann til akseptabel kvalitet, før det slippes ut tilbake til sjøen. Scanwaste mente også at det eksisterer teknologi for å mudre direkte til containere installert på sjøbunnen, og at vann kan filtreres fra sedimenter i disse containerne, for deretter å frakte sedimentene opp til et overflatefartøy. I så tilfelle vil det være mulig å løfte opp mudrede sedimenter i containere.

En effektiv filtrering subsea vil påvirke effektiviteten og miljø sikkerheten i stor grad ved mudring. Det finnes mer optimalisert utstyr tilgjengelig enn det som er lagt til grunn for vurderinger i «Vedlegg V3-03 Kvalitativ Risikovurdering, (Kystverket, Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Konklusjon og faglig anbefaling fra forprosjektering av Alt. 1 Tildekking av vrak og forurenset havbunn og Alt. 3 Heving av last og tildekking av vrak of forurenset havbunn, 2014b; Kystverket, Konseptvalgutredning for håndtering av U-864, 2011)». Følgelig vil en oppdatert utredning knyttet til mudringsalternativer kunne medføre at miljørisiko på kort sikt ved en operasjon vurderes som mindre enn i tidligere utredninger.

#### 4.3.3 Mengden kvikksølv fortsatt lagret i kjølen

Som følge av survey utført på tokt 3A i 2013 ble det gjort en re-evaluering av bruddsnittet på ubåten. Man fant da at midtseksjonen som ble sprengt bort av torpedoen var mye mindre enn det reviderte bruddsnittet man antok i 2006. Vurderingen som ble utført i 2006 er basert på antagelser og en teori om treffpunkt og konsekvens, og det i 2013 ble funnet at dette ikke stemmer for akterdelen. Derfor må det antas det antatte bruddsnittet for baugseksjonen fra 2006 også er veldig usikker. Vi har ikke identifisert noen analyser eller vurderinger som legger det siste vurderte bruddsnittet (fra 2013) til grunn for antatt mengde man kan ta ut av kjølen, selv ikke i forprosjektet fra 2014.

Den mengden som så langt er antatt mulig å hente ut av kjølkasser antas således å være konservativ.

Fra tokt 3a rapport:

*«The High Definition video survey of the wreck and debris resulted in a revision of the estimated torpedo impact point and discovery of the loss of the extreme end of the stern section. The total length of the intact keel is possible up to 4.0m longer than earlier calculations, this may reduce the total amount of Hg pollution on the seafloor in the area»*

Om mengden kvikksølv som kan hentes ut fra kjølen skal legges til grunn for vurderingen om lasten skal heves, bør man innhente mer informasjon og kunnskap om tilstand på kjølkasser/vrakdeler slik at usikkerheten blir mindre.

#### 4.3.4 Identifisering av kvikksølv

Et verktøy som gir indikasjoner på lokalitet av kvikksølvansamlinger eller beholdere i sedimentlag, anses å gi verdifull informasjon for å vurdere om en klarer å hente opp signifikante mengder fra sjøbunnen. Sub-Bottom Profiling (SBP) ble gjennomført i 2013, men denne ser ut til å ha fokusert på å penetrere dypt og hatt som oppgave å identifisere objekter i sedimentlagene dypst mulig. Samtaler med leverandører av SBP (bl.a. Aquadyne) viser at det er noe usikkerhet knyttet til om det er mulig å identifisere fritt kvikksølv i sedimenter og beholdere på sjøbunnen, men at med såkalt parametrisk SBP kan dette være mulig, i hvert fall i de øverste sedimentlagene. Følgelig kan dette være et egnet verktøy for å identifisere objekter nær vrakdelene i det øverste sedimentlaget. Denne bruken må imidlertid dokumenteres med testing. Bruk av magnetometer/«pipe tracker» er også mulig for å finne objekter, samt identifisere disse basert på magnetisk signatur. Som beskrevet i kapittel 4.2.1. har det skjedd en del utvikling innenfor dette feltet de siste årene.

##### *In situ-målinger av kvikksølv i sjøen ved operasjoner*

Etter innspill fra eksterne aktører, har vi undersøkt om mulighetene for å kontinuerlig måle kvikksølv i sjø/sedimenter under en operasjon. Vi har imidlertid ikke lyktes med å identifisere slike sensorer. Det finnes riktignok forskjellige typer undervannsinstrumentering og logging, som er vel utprøvd.

Identifisering av løse beholdere og fritt kvikksølv på sjøbunnen vil være avgjørende for å identifisere hvor mye kvikksølv som kan hentes opp, metode for å utføre dette samt definere tiltak som vil hindre videre spredning. Det anbefales at man gjør et videre arbeid med å identifisere kvikksølv i havbunnen.

#### **4.3.5 Operasjonelle modifiseringer og endringer**

Nedenfor har vi belyst noen konkrete funn knyttet til ny teknologi og fartøyrater siden 2014.

##### *ROV*

Tidligere tokt er utført i all hovedsak med bruk av en såkalt arbeids-ROV (WROV). Dette er store, sterke enheter, med kraftige propeller og manipulatorer. De er veldig anvendelige til å utføre allsidig arbeid, men har sin svakhet i størrelse. I senere tid har det vært stor utvikling i undervanns-droneteknologi. Det finnes aktører (bl.a. Stinger nevnt i kapittel 4.2.1.) som har spesialisert seg på mindre enheter fra Observasjons-ROV'er (som er relativt vanlig og har eksistert i mange år) og ned til mikro-ROV'er (f.eks. Stinger NANO) som kan entre hulrom gjennom 30cm åpninger.

##### *Sikringsliner*

Et operasjonelt risikomoment som er trukket frem er risiko for at en undervanns-sikringswire til baugseksjonen forstyrrer sjøbunnen. En ting som vil optimalisere og redusere faren for sediment-spredning er bruk av fibertau til vinsjer. Et slikt fibertau har omtrent samme styrke, men er mye lettere å håndtere. Det vil heller ikke ligge så tungt mot sjøbunnen. Følgelig vil bruk av fiber-tau medføre en mer effektiv operasjon og således være kostnadsreducerende.

##### *Tilgang til kjølkasser*

I forprosjektet fra 2014 antok man at man måtte rulle vrakene til begge sider for å få tilgang til kasser/kvikksølvbeholdere på begge sider av kjølen. I tokt 3B i 2013 gikk man imidlertid inn i både styrbord og babord kasse fra samme side (gjennom kjøplata/senterplate) Dette indikerer at man har tillagt en rullemetode for mye risiko.

Tidsestimater fra tidligere utredninger indikerer også at man har lagt til grunn en lite tilpasset og optimalisert løsning. Å få tilgang til kassene er en av de operasjonene hvor det er enklest å lage en tilpasset løsning som ikke vil være veldig kostbart, men reduserer operasjonstiden betraktelig. F.eks. et kutteverktøy tilpasset ROV med magnetisk eller mekanisk innfesting.

##### *Kostnader/Fartøyrater*

Ratene for relevante fartøy for undervannsoperasjoner varierer mye. Det har vært en stor endring siden 2014. Pr. i dag finnes det store mengder fartøy som er tilgjengelige og ratene er relativt lave. Dette er antatt å vedvare en god stund. I tillegg har det generelle kostnadsnivået innen offshoreindustrien, med den nødvendige ekspertisen til å gjennomføre en hevingoperasjon, blitt redusert betraktelig siden 2014.

Elementene trukket frem i dette kapitlet vil påvirke fremdriftsanalyse, usikkerhetsanalyse og kvalitativ risikoanalyse, ref. hhv. Vedlegg V3.01, V3.02 og V3.03, (Kystverket, 2014b).

#### **4.3.6 Ytterligere utredninger knyttet til alternativ 3. Heving av last**

Dette kapitlet omhandler anbefalinger for fremdrift basert på en eventuell beslutning om å gå videre med alternativet med å heve last.

Det anbefales å gjennomføre et forprosjekt med fokus på å løse enkeltutfordringer som uansett vil være generiske for alternativet med heving av last. Slike løsninger bør fokusere på å utføre en operasjon med minimal spredning av forurensning, kostnadsreduksjon, og redusere operasjonell risiko.

Et slikt forprosjekt bør inkludere mulighet for å utføre nye tokt til vraket for å innhente informasjon og teste. Det er identifisert flere muligheter til å innhente mer informasjon og

kunnskap som kan påvirke en vurdering av om kvikksølvet skal hentes opp. Basert på informasjon fra tokt i 2013 anses det nyttig å utføre flere tokt til vraket for å verifisere, innhente informasjon og gjennomføre mindre tiltak. Planlegging av et slikt tokt bør gjøres av en tredjepart (konsulentselskap e.l.) som har kjennskap til situasjonen og operasjonell kunnskap innen offshore industri. Disse må gis et klart mandat, som bl.a. bør inneholde oppgaven med å utarbeide en kravspesifikasjon som skal brukes som underlag for innhenting av anbud for å utføre operasjonen/tiltaket. Dette forprosjektet må gis tilstrekkelig tid og legges til grunn den informasjonen som innhentet i arbeidet med denne rapporten.

Følgende aktiviteter bør vurderes som en del av en slik kravspesifikasjon:

- Inspisere vrakdeler med mini-ROV, bl.a. for å forsøke å verifisere bruddlinjer i baugseksjonen, ammunisjonsverifikasjon, kontrollere tilstand på kjølseksjonen.
- Gjennomføre survey-undersøkelse av kvikksølv og evt. beholdere i det øverste sedimentlag i umiddelbar nærhet av vraket (ref. informasjon fra Aquadyne i kap.4.2.1.), i tillegg bør det vurderes om denne teknologien kan brukes til å utføre en kontroll av bruddstedet på baugseksjonen.
- Testing av punktmudring til lukket system rundt vrakdeler
- Lage tilgang til deler av kjølkasser slik at tilgangsverktøy kan testes.

Et tokt bør ha som overordnet mål:

- Å utføre operasjoner med minimal påvirkning av sjøbunn og spredning av sediment.
- Å innhente mer kunnskap om tilstand på vrak, lokasjon av kvikksølv, beholdere og ammunisjon.
- Å enten forbedre situasjonen eller unngå irreversible aktiviteter.
- Å hente opp kvikksølv mengder som man anser som tilgjengelige.

Arbeidsfremgang ved nytt tokt bør styres av tredjepart basert på godkjente prosedyrer, med tilsvarende modell som ofte benyttes i offshoreindustrien der styrende/utøvende myndighet opptre som «Client»/kunde og kun har et overoppsyn. Dette vil kunne sikre optimaliserte resultat både med hensyn til operasjonell effektivitet og miljøhensyn.

#### *Anbefalte fokusområder for et forprosjekt*

I et forprosjekt der man optimaliserer løsninger bør følgende fokuspunkter vurderes inkludert:

- Sikker og effektiv mudring
- Identifisering av kvikksølv (i sedimenter)
- Sikker og effektiv tilgang til kjølkasser.
- Vurdering og behandling av ammunisjon
- Metode for å sikre full tilgang til kjølkasser og opphenting av kvikksølv.

Basert på en slik kravspesifikasjon kan man gå ut med et anbud for utførelse av arbeidet. Man får da sammenlignbare priser og kvalitet/resultat. En vil også ha kontroll over hvilke risikoer som er aktuelle.

#### *Dialog med utvalgte leverandører av utstyr*

Det anbefales at man tar videre en dialog med leverandører av utvalgt utstyr for å diskutere og optimalisere utstyr.

### *Dykking*

Dykking bør ikke prinsipielt bli utelatt som et alternativ basert på tidligere utført risikoanalyse. Det bør stilles krav til eventuell kontraktør som ønsker å benytte dykkere om at sikkerheten til dykkere skal ivaretas med nødvendige prosedyrer, vernetiltak og risikovurderinger som skal godkjennes før iverksettelse. Videre bør vurdering av sikkerhet for dykkere like mye ivareta sikkerhet i forhold til sprengstoff som eksponering mot kvikksølv.

## **4.4 Momenter som berører både tildekking og heving av last**

Nedenfor belyser vi de funnene som omhandler både alternativ 1. tildekking og alternativ 3. tildekking og heving av last.

### **4.4.1 Risikoanalyse**

For forprosjektene i 2014 ble det utført risikoanalyser for både alternativ 1- tildekking og alternativ 3 – heving av last.

I arbeidet med denne rapporten har vi gått gjennom følgende dokumenter for å vurdere det arbeidet som har blitt gjort i forbindelse med risikoanalysene av de to forprosjekterte tiltaksalternativene;

- Vedlegg V0.01 Miljømål og akseptkriterier for tiltak ved U-864, Miljøtiltak ved vraket av U-864 (DNV GL, 2014a)
- Vedlegg V1.03 Kvalitativ risikoanalyse Alt. 1 «Tildekking», Miljøtiltak ved vraket av U-864 (DNV GL, 2014c)
- Vedlegg V3.03 Kvalitativ risikoanalyse Alt. 3 «heving av last», Miljøtiltak ved vraket av U-864 (DNV GL, 2014d)

Vi har funnet en del uklårheter ved måten den gjennomførte risikoanalysen er presentert. Nedenfor presenterer vi de funnene som vi har gjort.

### *Generelle kommentarer til risikoanalysene*

I dokumentene er det ikke forelagt en oversikt over deltagere på analysesemøter/arbeidsmøter, noe som er vanlig i forbindelse med slike prosesser. Det er heller ikke henvist til (norsk) standard, forskrift, veileder osv. som ligger til grunn for analysene i de aktuelle dokumentene som vi har undersøkt. For dokumentene V1.03 og V3.03 er det ikke angitt referanser, noe som bør fremkomme i slike dokumenter.

### *Risikostyringsmål, vurderingskriterier og akseptkriterier - metodikk*

Risikostyringsmålene som er angitt i de risikoanalysene som er gjennomført er;

- Personellsikkerhet (PSAFE)
- Miljø; kort sikt (ENVST) og lang sikt (ENVLT)
- Operasjonell risiko (OSAFE)

For sannsynlighetsskalaen og skalaene for konsekvens, er det henvist til at samme skala er benyttet av bergingsselskaper i deres egne risikovurderinger, og av eksperter i relaterte tilleggsutredninger. Det kunne med fordel ha vært satt opp referanse til disse dokumentene, slik at begrunnelse for valg av sannsynlighetskala kunne ha blitt verifisert - det savnes referanse til bakgrunnen for valg av sannsynlighetskala og vurderingskriterier for PSAFE og OSAFE.

Operasjonelle konsekvenser (OSAFE) forstås ut fra V3.03 Tabell 2 å bety kostnadmessige og fremdriftsmessige konsekvenser (forsinkelser) relatert til *skade på eller tap av utstyr*, og ikke kostnadmessige og/eller fremdriftsmessige konsekvenser generelt.

Konsekvensskala og akseptkriterier for miljø (ENVST og ENVLT) er beskrevet og dokumentert i dokumentet V0.01 med henvisning til referanser.

For hvert risikostyringsmål er det utarbeidet en risikomatrix. Inndeling i områdene rødt, gult og grønt er like for alle matrisene på tvers av risikostyringsmålene. Dette er uvanlig for en slik risikoanalyse som er gjort og medfører en viss usikkerhet knyttet til sammenligningen av vurdert risiko på tvers av de ulike risikostyringsmålene.

#### *Resultater og risikoregister*

I vurderingen er det en blanding av «normal drift» og «anleggsfase» - for eksempel er det vurdert risikoforhold både for hva som kan skje når ubåten ligger ferdig tildekket og risikoforhold knyttet til selve operasjonene for å dekke til ubåten. Disse to fasene bør holdes adskilt.

Det er trukket inn risikoer relatert til styring av prosjektet; eksempelvis;

- R-0265 Prosjektorganisasjonen fungerer ineffektivt
- R-0267 Ikke tilstrekkelig tid til å detaljplanlegge prosjektet
- R-0154 Dårlige værforhold – operasjonen blir vesentlig forsinket

Dette er risikomomenter som ikke er på samme nivå i årsaks-konsekvenskjeden, og som ikke vil ha en direkte konsekvens på de valgte risikostyringsmålene. Slike risikoer kan ha en kostnadmessig og fremdriftsmessig konsekvens for prosjektet (prosjektusikkerhet), men forstås ikke å ha en direkte konsekvens på for eksempel OSAFE slik dette risikostyringsmålet er beskrevet – som er kostnad og fremdrift relatert til skade på eller tap av utstyr. Det står imidlertid at det er gjort egen kostnadsanalyse.

Det er noe usikkerhet knyttet til risikoklassifiseringen på tvers av dokumentene og internt i dokumentene, da klassifiseringen av forskjellige risikomomenter varierer mellom dokumentene. F.eks. i dokument V1.03 og V3.03 står det at det er 23 risikoer relatert til alternativ 1. I V1.03 står det følgende fordeling av disse risikomomentene; 1 rød, 6 gule og 16 grønne. I V3.03 står det imidlertid følgende fordeling; 0 røde, 7 gule og 16 grønne. I V3.03 er det også en mismatch på antall røde risikomomenter (se V3.03 kap. 5 risikoregister, der risiko 295 er markert som rød på ett sted (kapittel 5), men gul et annet sted (avsnitt 4.2)).

#### *Manglende momenter i risikoanalysene*

Vi har registrert at omdømmerisiko (herunder f.eks. skade på sjømateksportnæringen) ikke har vært gjenstand for risikoanalyse i dette prosjektet.

Sjømat er en viktig eksportvare for Norge. Hovedandelen av lakseoppdrett befinner seg i nedslagsfeltet av kystrømmen nord for Fedje. I tillegg befinner en stor del av fiskeri for eksport seg også i det samme området. Risiko for å skade eksportnæringen og dermed en betydelig samfunnsøkonomisk bidragsyter er ikke inkludert i risikoanalyser.

Denne saken har fått vesentlig nasjonal og internasjonal interesse. Følgelig burde en slik omdømmerisiko knyttet til håndteringen av vraket, lasten og forurensningen i nærheten av vraket vært gjennomført.

Det er identifisert to eventualiteter som medfører risiko for samfunnsøkonomi, og som vi savner fra den gjennomførte risikoanalysen:

1. Om en eller flere torpedoer selv-detonerer må man anta at det vil føre til en umiddelbar og signifikant spredning av kvikksølv og sedimenter i havstrømmer. Om dette fører til høye verdier av kvikksølv langs kysten vil det kunne påvirke sjømateksporten direkte.



2. Hovedmarkedene for sjømateksport består i hovedsak av noen få, men store markeder. Om et eller flere stenges eller faller fra vil det ha stor betydning. Disse markedene er også sensitive for risikoen for om sjømaten er «ren» for miljøgifter osv. Det er sannsynlig at et godt forankret «rykte» om at norsk sjømat er utsatt for kvikksølvforurensning er nok til å legge en stor demper på eksporten selv om man ikke har høyere måleverdier enn de verdiene som er fastsatt gjennom forskrifter og retningslinjer.

#### *Konklusjon vedrørende risikoanalysene*

Det er flere forhold ved risikoanalysene som ikke er behandlet på en optimal måte. Overordnet påpeker vi at de ulike kategoriene med risikoer til slutt er slått sammen og derfor danner et grunnlag for sammenlikning av konsekvens-scenarier som i utgangspunktet ikke er sammenliknbare.

Det ble også oppdaget en del feil som tyder på at dokumentene ikke er tilstrekkelig gjennomarbeidet. Vi har ikke funnet henvisning til hvilken metodikk som er brukt i vurderingene og hvem som har bidratt til vurderingene som er beskrevet i analysene. Det står imidlertid presisert at analysene er kvalitative og det er naturlig at vurdering av slike hendelser uansett vil måtte være gjenstand for en viss grad av skjønn. Dette gjør det imidlertid enda viktigere at det kommer tydelig fram at analysene er utført med en dokumentert, gjennomarbeidet og metodisk tilnærming.

Omdømmerisiko knyttet til håndteringen av vraket, lasten og forurensningen i nærheten av vraket burde vært gjennomført.

Risikoanalysene danner et viktig grunnlag for den endelige avgjørelsen som ble tatt i forbindelse med forprosjekteringen i 2014. Samlet sett mener vi at det er flere usikkerheter ved disse risikoanalysene. Det er imidlertid usikkert i hvilken grad disse svakhetene utgjør en forskjell for de beslutningene som ble tatt basert på forprosjekteringen i 2014.

## 5. KONKLUSJONER

### 5.1 Tildekking

Det foreslåtte tildekkingslaget anses som godt begrunnet og den foreslåtte oppbyggingen av tildekkingslaget er i henhold til normal praksis. Vi påpeker imidlertid at detaljprosjekteringen av tildekkingslaget må utarbeides før endelig vurdering kan gjøres.

En ny studie har vist at kvikksølvet som ble funnet i fisk (brosme) rundt ubåten på Fedje ikke stammer fra kvikksølvet fra U-864 (Rua-Ibarz, et al., 2019). Utover dette, har vi ikke gjort noen store funn som kan endre konklusjonen som sier at tildekking er en relevant måte å håndtere kvikksølvforurensningen på.

Imidlertid har vi noen innspill til faktorer som må tas hensyn til når det gjelder den endelige utformingen av tildekkingslaget. Dette omfatter utfordringer som at den spesifikke funksjonen til adveksjonslaget og det kjemiske isolasjonslaget kan forringes dersom disse blandes i for stor grad. I tillegg bør advektive prosesser i tildekkingslaget beregnes eller modelleres og legges til grunn for den endelige utformingen. I tillegg påpekes det at utlegging av finkornede materialer i tildekkingslaget er kjent å være utfordrende på store dyp. Planlegging av denne operasjonen bør derfor omfatte en solid gjennomgang av tilgjengelige metoder for slike operasjoner. Vi mener også at skade på tildekkingslaget som følge av et jordskjelv (scenario  $10^{-2}$  og  $10^{-4}$ ) bør vurderes nærmere med tanke på mulig endring av tildekkingslagets bæreevne.

### 5.2 Kvikksølvegenskaper

I vår utredning av kvikksølvkjemi i dette studie har vi fokusert på kunnskap med direkte relevans for prosesser på sjøbunnen og ved et mulig fremtidig tildekningslag i tiltaksområdet. Vi har søkt den nyeste litteraturen på fagfeltet for å belyse om det er kommet ny kunnskap med relevans for tidligere utførte utredninger og risikovurderinger.

Det har ikke fremkommet ny informasjon som tilsier en endring av den miljørisikovurderingen som ble gjort i 2014 for tildekking som tiltaksalternativ.

Oppsummert er det mindre sannsynlig at etablering av det forprosjekterte tildekningslaget gir geokjemiske og fysiske forhold som vil understøtte dannelsen og transporten av metylkvikksølv til vannsøylen. Vi har også vurdert potensialet for gassdannelse under tildekkingslaget, og ikke funnet informasjon som tilsier noen endring av den miljørisikoen som ble vurdert i 2014

Videre anbefales det at det i detaljprosjekteringsfasen undersøkes:

- Om det er mulig å opprettholde en aerob sone i den øverste delen av tildekkingslaget, som vil begrense migrasjonsrisikoen av eventuelt dannet metylkvikksølv ut av tildekningslaget, fordi de aerobiske forhold kan sikre demetylering av metylkvikksølv.
- Om det kan designes et tildekkingslag med spesifikke redoksforhold. F.eks. jernreduserende forhold kan i teorien begrense potensialet for demetyleringen av kvikksølv ytterligere. Dette må imidlertid undersøkes i detalj for å sikre effektiviteten.

### 5.3 Foreslåtte metoder for heving av last

Det er fremkommet lite nytt rundt de faktiske metoder for heving av last under oppdraget. Robuste arbeidsmetoder er tidligere presentert for store deler av arbeidsomfanget, bl.a. i «Vedlegg G, Ingenium - ROV-metodikk for å håndtere kvikksølvforurensning fra U-864», (Kystverket, 2011). Vi har vurdert løsninger fra flere aktører, både fra de som man har vært i kontakt med under oppdraget og i den dokumentasjonen som er gjennomgått fra 2014. De fleste aktører har gode innspill med styrke på å løse forskjellige del-utfordringer i ulike type

operasjoner. Det bør derfor plukke de beste løsninger for hver utfordring. Lignende modeller har vært brukt med stort hell i oljebransjen og vil sikre at man kan løse delutfordringer med de beste løsninger og aktører.

Metodene foreslått av Unitech og Reidar Ulvøy som beskrevet i kapittel 4.3.1 innebærer å heve hver av vrakdelene hele. Ulvøy sin metode består i å lage hydraulisk løfteramme noe tilsvarende det Mammoet foreslo i sitt kontraktsforslag fra 2008 (Kystverket, 2008). Unitech vil lage festepunkter på topp trykkskrog tilsvarende som ble foreslått av LOC i deres rapport datert 7. Januar 2011: "Vedlegg F, Recovery of U-boat hull sections", (Kystverket, 2011)

Begge metoder fjerner nødvendighet av mudring før løft og kan derfor medføre mindre spredning av forurensning enn tidligere foreslåtte metoder for heving av last. Dette bør vurderes i det videre arbeidet og sammenlignes mot tidligere forutsetninger.

## **5.4 Teknologi**

Etterfølgende kapitler indikerer at det foreligger kunnskap og teknologi som ikke har vært vurdert som basis for tidligere vurderinger, inkludert risikovurderinger. Ved å gjøre en grundig revurdering av metodikk, teknologi og innhenting av kunnskap anser man det som sannsynlig av risikovurderinger lagt til grunn for tidligere avgjørelser kan påvirkes i relativt stor grad.

### **5.4.1 Utvikling rundt mudring,**

Det er fremkommet flere muligheter for bruk av eksisterende mudringsteknologi som ikke er inkludert i tidligere vurderinger. Dette er beskrevet i seksjon 4.3.2 og kan gi miljømessig gevinst sammenliknet med tidligere antakelser. Dette bør vurderes i det videre arbeid.

### **5.4.2 Instrumentering/survey**

Det har fremkommet informasjon om ny teknologi samt videreutvikling av eksisterende teknologi som tilsier at man kan oppnå høyere grad av identifisering av beholdere og kvikksølv i sjøbunnen, som beskrevet i seksjon 4.3.4. Dette bør undersøkes videre for å potensielt å oppnå en bedre kartlegging av hvor ansamlinger av kvikksølv og beholdere befinner seg. Dette vil blant annet gi en bedre forståelse av mulig måloppnåelse.

## **5.5 Ammunisjon**

Det har fremkommet noe usikkerhet rundt vurdering av risikoen for selvdetonering av ammunisjon. De aller fleste aktørene som vi har vært i kontakt med i løpet av dette prosjektet har påpekt at den vurderingen som er gjort omkring ammunisjon tidligere i prosjektet er for overfladisk og at risiko for selvdetonering er større enn det som tidligere har blitt presentert i prosjektet. En aktør har også presentert en ROV-basert metode for å uskadeliggjøre dette (større enheter med stort skadepotensiale) uten å frakte det til overflaten eller flytte på det i særlig grad. Basert på de innspillene som har kommet og de utredningene som er gjort tidligere, mener vi at det er grunn til å tro at den ammunisjonen som ligger i vraket av U864 kan medføre ytterligere risiko enn det som tidligere har blitt presentert i dette prosjektet. Det bør ses nærmere på dette før et eventuelt tiltak igangsettes.

## **5.6 Risikoanalyse**

Det er flere forhold ved risikoanalysene som ikke er behandlet på en optimal måte. Overordnet påpeker vi at de ulike kategoriene med risikoer til slutt er slått sammen og derfor danner et grunnlag for sammenlikning av konsekvens-scenarioer som i utgangspunktet ikke er sammenliknbare.

Det er også oppdaget en del feil som tyder på at dokumentene ikke er tilstrekkelig gjennomarbeidet, det er manglende metodebeskrivelse for de gjennomførte risikoanalysene, og omdømmerisiko knyttet til håndteringen av vraket, lasten og forurensningen i nærheten av vraket er ikke gjennomført.

Risikoanalysene danner et viktig grunnlag for den endelige avgjørelsen som ble tatt i forbindelse med forprosjekteringen i 2014. Samlet sett mener vi at det er flere usikkerheter ved disse risikoanalysene. Det er imidlertid usikkert i hvilken grad disse svakhetene utgjør en forskjell for de beslutningene som ble tatt basert på forprosjekteringen i 2014.

## 6. REFERANSER

- Barbara Gworek, O. B.-K.-J. (2016). Mercury in Marine and Oceanic Waters—a Review. *Water Air Soil Pollut. 2016; 227(10): 371.*
- Burdige, D. (2006). *Geochemistry of Marine Sediments. Chapter 12: Processes at the Sediment-Water Interface.* . . New Jersey: Princeton University Press.
- Cheng, C. (2013). *Influence of sedimentary gas ebullition on interfacial transport in permeable marine sands. Thesis.* Florida State University.
- Colombo M.J., J. H. (2013). Anaerobic oxidation of Hg(0) and methylmercury formation by *Desulfobrio desulfuricans* ND132. *Geochimica et Cosmochimica Acta 112*, 166-177.
- DNV. (2008). *Salvage of U864 - Supplementary studies - Dredging.*
- DNV. (2008). *Salvage of U-864 – Supplementary Study – Metal detector.*
- DNV GL. (2014a). *Vedlegg V0.01 Miljømål og akseptkriterier for tiltak ved U-864, Miljøtiltak ved vraket av U-864.*
- DNV GL. (2014b). *Vedlegg V0.02 Design av tildekking og kontroll av utlegging.*
- DNV GL. (2014c). *Vedlegg V1.03 Kvalitativ risikoanalyse Alt. 1 "Tildekking", Miljøtiltak ved vraket av U-864.*
- DNV GL. (2014d). *Vedlegg V3.03 Kvalitativ risikoanalyse Alt. 3 "Heving av last", Miljøtiltak ved vraket av U-864.*
- Drott A., L. L. (2007). Importance of dissolved neutral mercury sulfides for methyl mercury production in contaminated sediments. *Environmental Science & Technology 41(7)*, 2270-2276.
- Geoconsult. (2005). *Sluttrapport U864 - Fase 1, 2005, Kartlegging og fjerning av kvikksølvforurensing.*
- GeoPartner AS. (2010). *Submarine wreck U-864. Encapsulation of wreck and capping of contaminated seabed. Geotechnical design and guidelines for installation.*
- GeoPartner AS. (2014). *Submarine Wreck U-864. Capping of wreck and contaminated seabed.*
- Han S., A. O. (2008). Sulfide and iron control on mercury speciation in anoxic estuarine sediment slurries. *Marine Chemistry, 11*, 214-220.
- Heyes A., R. M.-H. (2006). Mercury methylation in estuaries: Insights from using measuring rates using stable mercury isotopes. *Marine Chemistry, 102*, 134-147.
- Himmelheber D.W., M. T. (2008). Spatial and temporal evolution of biogeochemical processes following in situ capping of contaminated sediments. *Environmental Science & Technology 42(11)*, 4113-4120.
- Hollweg T.A., C. G. (2010). Mercury and methylmercury cycling in sediments of the mid-Atlantic continental shelf and slope. *Limnol. Oceanogr., 55(6)*, 2703-2722.
- Hu H., H. L. (2013). Oxidation and methylation of dissolved elemental mercury by anaerobic bacteria. *Nature Geoscience, 6*, 751-754.
- J.M. Benoit, C. G. (1999). Sulfide controls on mercury speciation and bioavailability to methylating bacteria in sediment pore waters. *Environmental Science & Technology 33(6)*, 951-957.
- J.M. Benoit, C. G. (2001). The influence of sulfide on solid-phase mercury bioavailability for methylation by pure cultures of *Desulfobulbus propionicus* (1pr3). *Environmental Science & Technology 35(1)*, 127-132.
- Klein, S. (2006). . Sediment porewater exchange and solute release during ebullition. *Marine Chemistry, 102(1)*, 60-71.
- Kystverket. (2008). *Rapport med anbefalte tiltak mot spredning av kvikksølvforurensing fra U-864.*
- Kystverket. (2011). *Konseptvalgutredning for håndtering av U-864.*
- Kystverket. (2014a). *Sentralt styringsdokument for Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Alt.1 Tildekking av vrak og forurenset havbunn.* Kystverket.

- Kystverket. (2014b). *Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Konklusjon og faglig anbefaling fra forprosjektering av Alt. 1 Tildekking av vrak og forurenset havbunn og Alt. 3 Heving av last og tildekking av vrak of forurenset havbunn.*
- Kystverket. (2014c). *Sentralt styringsdokument for Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Alt. 3 Heving av last og tildekking av vrak og forurenset havbunn.*
- Kystverket.no. (u.d.). *Støttefylling bygd ved ubåtvraket U-864.* URL: <https://www.kystverket.no/Beredskap/U-864/u-864-stottefylling/>.
- Lambertsson L., a. M. (2006). Organic material: The primary control on mercury methylation and ambient methyl mercury concentrations in estuarine sediments. *Environmental Science & Technology* 40(6), 1822-1829.
- Miljødirektoratet. (2016). *M-608 Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota.*
- Ndungu, K. a. (2015). *A mesocosm experiment on methyl mercury formation after capping of U-864 sediments enriched with powdered algae.* NIVA Report Serial No. 6867-2015.
- NGI. (2018). *Monitored pore pressure and settlements beneath the counter fill (document no. 20150581-03-TN).*
- NIFES. (2017). *Kvikksølvinnhold i fisk og annen sjømat ved vraket av U-864 vest av Fedje. Resultater fra fast overvåkning og ekstra prøvetaking i 2016.*
- NIVA. (2005a). *Miljørisikovurdering av kvikksølv ved sunket ubåt U-864, Fedje I Hordaland – Fase 1: Kvikksølvkartlegging.* NIVA.
- NIVA. (2005b). *Utlekking og bioakkumulering av kvikksølv fra sedimenter nær U864, RAPPORT LNR 5089.* Norsk institutt for vannforskning, ISBN 82-577-4795-5.
- NIVA. (2013). *Investigation of mercury during a survey near submarine U-864 outside Fedje in 2013.*
- Rua-Ibarz, A., Bolea-Fernandez, E., Maage, A., Frantzen, S., Sanden, M., & Vanhaecke, F. (2019). Tracing Mercury Pollution along the Norwegian Coast via Elemental, Speciation, and Isotopic Analysis of Liver and Muscle Tissue of Deep-Water Marine Fish (Brosme brosmes). *Environmental Science & Technology*, 53 (4), 1776-1785.
- Sayles, C. W. (1996). Oxygen penetration depths and fluxes in marine sediments. *Marine Chemistry*, 52, 123-131.
- Thamdrup, D. C. (2009). Towards a consistent classification scheme for geochemical environments, or, why we wish the term 'suboxic' would go away. *Geobiology*, Sep 7(4), 385-92.
- Ullrich S.M., T. T. (2001). Mercury in the aquatic environment: A review of factors affecting methylation. . *Chemical Reviews in Environmental Science and Technology* 31(3), 241-293.
- United States Environmental Protection Agency. (2005). *Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites.*
- VanOord. (2016). *Environmental & Geotechnical monitoring As-built report - Rock installation counter fill U-864.*