

1 Mengder kvikksølv som kan heves

2 Innledning

2.1 Bakgrunn

I ULTRA-arkivene etter andre verdenskrig er det funnet lastepapirer tilhørende U-864 og som blant annet lister at fartøyet hadde 1857 kvikksølvflasker når den ble torpedert og senket. Dette tilsvarer rundt 67 tonn. Basert på erfaring fra tilsvarende oppdrag har det vært antatt at disse er lagret i fartøyets kjølkasser /D01/. I kjølkassene (ca. 130 stk) ble det normalt stuert bly som ballast, avhengig av hvordan fartøyet ellers var lastet. Ikke alle kjølkassene ble benyttet til ballast, en del forble tomme, eller fylt med annen last. Kvikksølvflaskene som U-864 hadde med seg erstattet en del av denne ballasten, men lastepapirene sier ikke noe om hvor i kjølen dette ble plassert.



Figur 1 Tegninger av U-864 sammenholdt med fotogrammetri av vrakdelene. Bruddsonen fremkommer tydelig for de delene av vraket som er eksponert over sedimentene (vrakdeler nedi sedimentene er ikke synlig på fotogrammetri). Rødt rektangel viser kjølkassene.

Da U-864 ble torpedert, ble fartøyet delt i to større vrakdeler. Midtseksjonen der torpedoen traff, ble sprengt i mange deler og ligger hovedsakelig spredt rundt akterseksjonen. Om kjølen ble knust da den traff sjøbunnen er også ukjent. Sedimentprøver fra området rundt vraket er sterkt kvikksølvforurensset. Dette tyder på at en del av kvikksølvflaskene var lastet i midtseksjonen og ble sprengt i stykker når torpedoen detonerte. Mengden av kvikksølv som ble spredt er ikke kjent. De resterende kvikksølvflaskene antas fortsatt å være i kjølkassene, og en andel av disse er rustet i stykker.

I perioden 2003 til 2013 har det ifm. undersøkelser av vrak og omkringliggende sedimenter vært funnet til sammen åtte kvikksølvbeholdere liggende i sedimentene. Av disse har kun en flaske vært intakt med kvikksølv, mens syv har korrodert så mye at alt kvikksølv har lekket ut i sedimentene. Disse viser at det med sikkerhet at lastepapirene som er funnet er troverdige, men om U864 ble lastet med 1857 kvikksølvflasker slik bestillingen er ikke bekreftet.

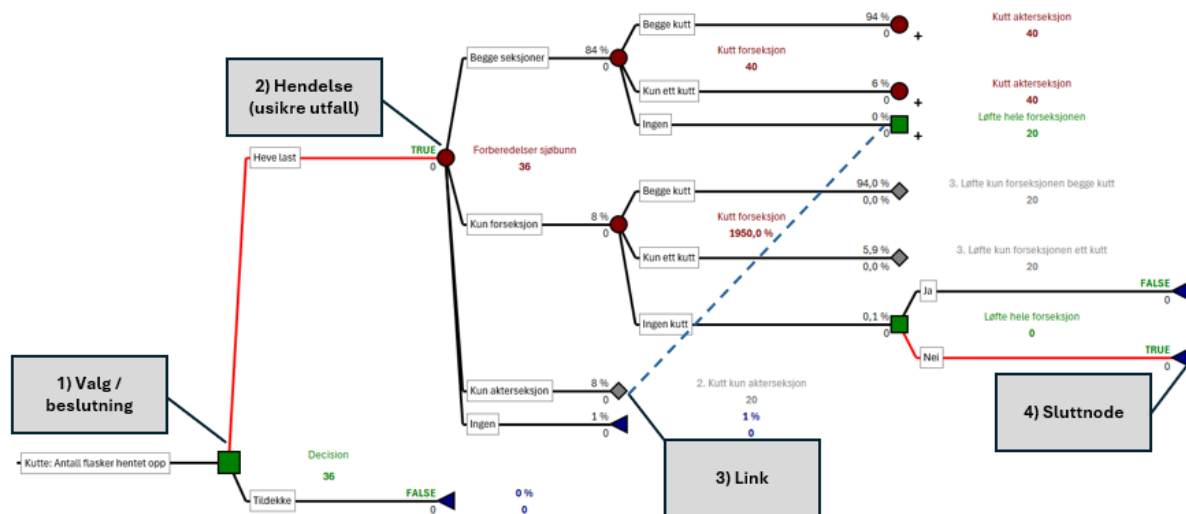
Det har ved to av toktene vært forsøkt å skaffe tilgang til kjølkassene i akterseksjon. Det ene forsøket ble avbrudd da akterskipet begynte å legge seg over på siden, mens ved toktet ble de to akterste kjølkassene på styrbord side åpnet, men disse var tomme. Det å få tilgang til kjølkassene (graving og mudring) har viste seg betydelig med tidkrevende enn antatt pga. mye stein og vrakdele, samt hardere sedimenter enn forventet.

Det er utredet flere ulike metoder for å fjerne kvikksølvlasten fra vrakene. Et av suksesskriteriene for et slikt tiltak vil være mengden kvikksølv som har blitt fjernet fra vraket og deponert i et nytt deponi på land. Derfor har det vært av interesse å kunne angi et estimat på hvor mange kvikksølvbeholdere – eller antall tonn - som kan forventes å bli hevet under en operasjon. Et estimat for dette er også nyttig for å kunne estimere hvor mye det vil koste å behandle og lagre kvikksølvet etter en heving.

Antall flasker som kan forventes å bli hevet svært usikker. Det er derfor utarbeidet en egen modell som analyserer forventet antall flasker som kan bli hevet. Denne modellen er beskrevet i kapittel 0 (metode), mens resultatene av analysen er gjengitt i kapittel 0.

3 Methode

For å beregne antall forventede flasker som kan heves er verktøyene PrecisionTree og @Risk fra Lumiovero Inc. benyttet. PrecisionTree er et verktøy som etablerer et hendelsestre, mens @Risk simulerer ulike utfall av input til hendelsestreet. Det er utarbeidet to separate hendelsestrær for Alternativ 3: ett for metode 1b Grave og en for metode 4 Kutte. Se hoveddokumentet kap. 7.4.2 og 7.4.3 for beskrivelse av disse metodene. Et hendelsestre er nyttig å bruke i dette tilfellet, fordi en heving av last operasjon vil bestå av forskjellige kombinasjoner av 1) valg/beslutninger for «veien videre», 2) hendelser med usikre utfall, 3) logiske avhengigheter som bestemmer neste trinn og 4) sluttnode med usikre utfall (operasjonen er ferdig). I figuren nedenfor er disse fire typene av noder vist:



Figur 2 Utsnitt av deler av et hendelsestre for heving av last ved metode 4 Kutte

I analysen som nå er gjennomført, så er mengden kvikksølv endret fra å beregne antall *kvikksølvbeholdere* til antall *tonn* kvikksølv hevet.

For å kunne beregne forventet antall tonn kvikksølv som kan heves ved en operasjon er variablene som påvirker dette resultatet inkludert i modellen. De fleste av variablene er det lite informasjon om, kun antagelser, som derfor har stor usikkerhet. Men bruk av eksperter til å estimere disse har vært benyttet. Alle usikre variabler er gitt et trepunktsestimat, slik at denne usikkerheten fanges opp i resultatene som presenteres. Estimatusikkerheten for disse variablene er beskrevet i kapittel 7.

4 Tidligere analyser

Mengden kvikksølv som kan forventes å heves ifm. en operasjon har vært vurdert tidligere:

- I KVVU og KS1 ble det anslått at 90-99 % av kvikksølvet kunne hentes opp.
- I Forprosjektet ble tre alternative løsninger for heving av last vurdert. En kvantitativ usikkerhetsmodell ble utarbeidet og ga følgende resultater:

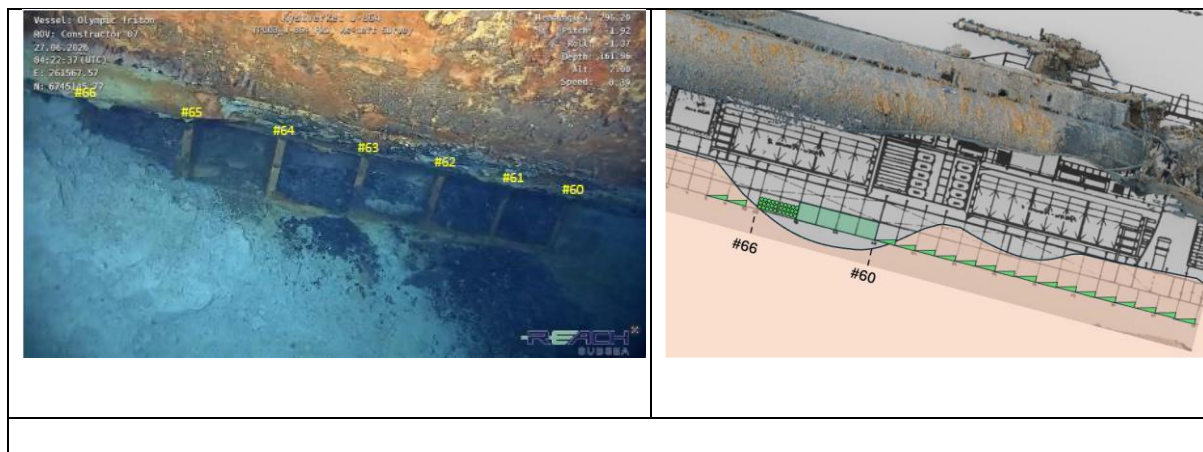
Tabell 1 Resultater fra kvantitativ analyse i Forprosjektet

Teknisk løsning	Forventningsverdi	p15	p85
Rulle	419 (22 %)	47	789
Krybbe og Rigg	807 (43 %)	394	1162

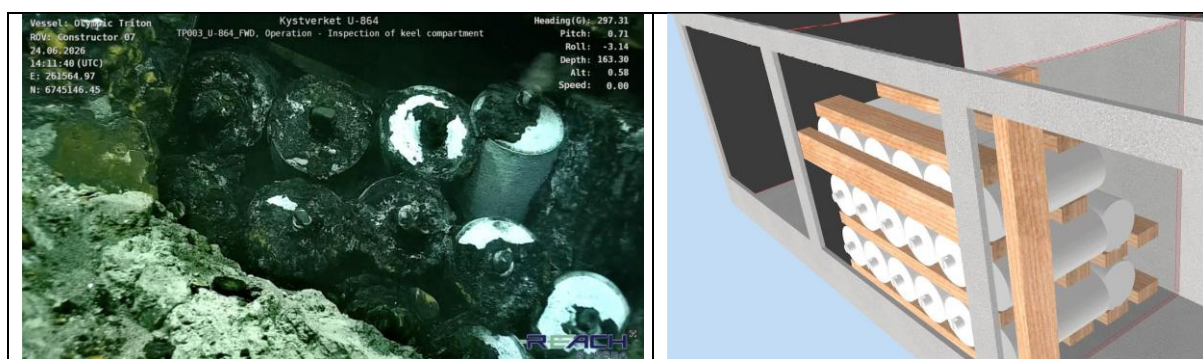
Den kvantitative modellen som ble utarbeidet i Forprosjektet ivaretok i langt større grad usikkerheten med både de operasjonelle utfordringene og usikkerheten om hvor kvikksølvbeholderne var stuert, hvor mange av disse som ødelagt dersom disse ble stuert i midtseksjonen (sprengt i stykker), hvor mange som er rustet hull på og kvikksølvet lekket ut av kjølkassene mm. Som det fremgår av resultatene i Tabell 1 så er usikkerheten svært stor. Modellen som ble benyttet i Forprosjektet er lik den som er beskrevet i kapittel 0 metode.

5 Ny informasjon om vrak og last

Under Tokt 2B juni 2026 lyktes det å grave frem totalt seks kjølkasser, hvorav to av disse hadde beholdere med kvikksølv. Bildene nedenfor viser kjølkassene som ble gravd frem og kvikksølvbeholderne i en av kassene.



Figur 3 T.v.: Bilde av de kjølkassene som ble gravd frem. Dekkplaten er fjernet [Bilde: Reach Subsea /V22/]. T.h.: Skisse av utgravd grop og kjølkassene. De mørkt skraverte kjølkassene til venstre angir kjølkassene der kvikksølvbeholderne var plassert (Skisse: PROSUB /D29/)



Figur 4 T.v.: Kammer med kvikksølvbeholdere [Bilde: Reach Subsea /V22/]. T.h.: En prinsippskisse av hvordan kvikksølvflaskene trolig har vært stuert (Skisse: PROSUB /D29/)

Tokt 2B har kunnet dokumentere flere forhold som i tidligere bare har vært antagelser når det gjelder lagring av og tilstand på kvikksølvbeholderne. Følgende er ny informasjon:

- Det var 24 flasker lagret i kammeret mellom spant #64 og #65 og som ble tømt, jf. Figur 4. Det syntes også som flaskene var stuert likt i kjølkammer mellom spant #65 og #66. Tidligere har dette vært vurdert å ligge mellom 22 og 40 beholdere i kjølkammeret. Det er ikke sikkert at alle kammer har stueplan for beholderne, men det er trolig, og derfor er 24 flasker per kammer lagt til grunn videre.
- Det må ha vært kvikksølvbeholdere lagret i midtseksjonen fordi all kvikksølvforurensningen rundt vraket må stamme fra beholdere lagret der. Da kan man også konkludere med at *ikke* all kvikksølvlast har vært stuert i kjølkasser ved siden av hverandre, men at dette har vært spredt, fordi det var kvikksølvflasker fra spant #64 til spant #66, mens det var annet stuert mellom spant #60 til #64. Alle kjølkasser, med unntak av de til sammen åtte kamrene som er åpnet, kan derfor inneholde kvikksølvflasker.

- Av de 24 kvikksølvbeholderne som ble hevet, så var 10 korrodert så mye at kvikksølvet hadde rent ut, 2 beholdere lot seg ikke gjøre å ta ut av kjølkassen, mens de siste 12 beholderne ble hevet. Til sammen 20,5 liter kvikksølv ble sugd opp i flasker fra kjølkammer og sedimenter. Dette viser at tilstanden på disse beholderne er langt dårligere enn forventet, og en andel av mengden kvikksølv som har vært lagret i dette kammeret var tapt.
- Det ble sugd opp flytende kvikksølv fra kjølkammeret mellom spant #60 og #61 som ikke inneholdt kvikksølvbeholdere /D21/. Det må derfor være åpning mellom kjølkamrene. Det kan antas at kvikksølvet i dette kammeret stammer fra kvikksølv i kammer mellom spant #64 og #65, som ligger høyere. Det kan også bety at kvikksølv som har lekket ut av korroderte beholdere kan renne helt ned til bruddåpningen og ut i sedimentene.
- Da ROV'en tok tak i dekkplaten, lakk det kvikksølv ut av kjølkassen. Kvikksølv kan derfor at lekket ut av kjølkassene, lekke når dekkplater fjernes (som under Tokt 2B) og/eller dersom vrakdelen blir hevet/flyttet (som foreslått i tiltak metode 4 Kutte).

Samlet så reduserer observasjonene usikkerheten relatert til antall kammer som var nødvendig for å stue 1857 beholdere med kvikksølv, fordi vi har et sikrere anslag på antall beholdere i hvert kammer. Usikkerheten til mengden kvikksølv som kan heves, gitt at et kammer åpnes, er derimot økt. Årsaken at langt flere flasker trolig er korrodert så mye at kvikksølvet har lekket ut, og at kvikksølvet kan «forsvinne» ut i sedimentene, men det vil trolig være mindre grad av korrosjon på beholdere som ligger dypere /V15/.

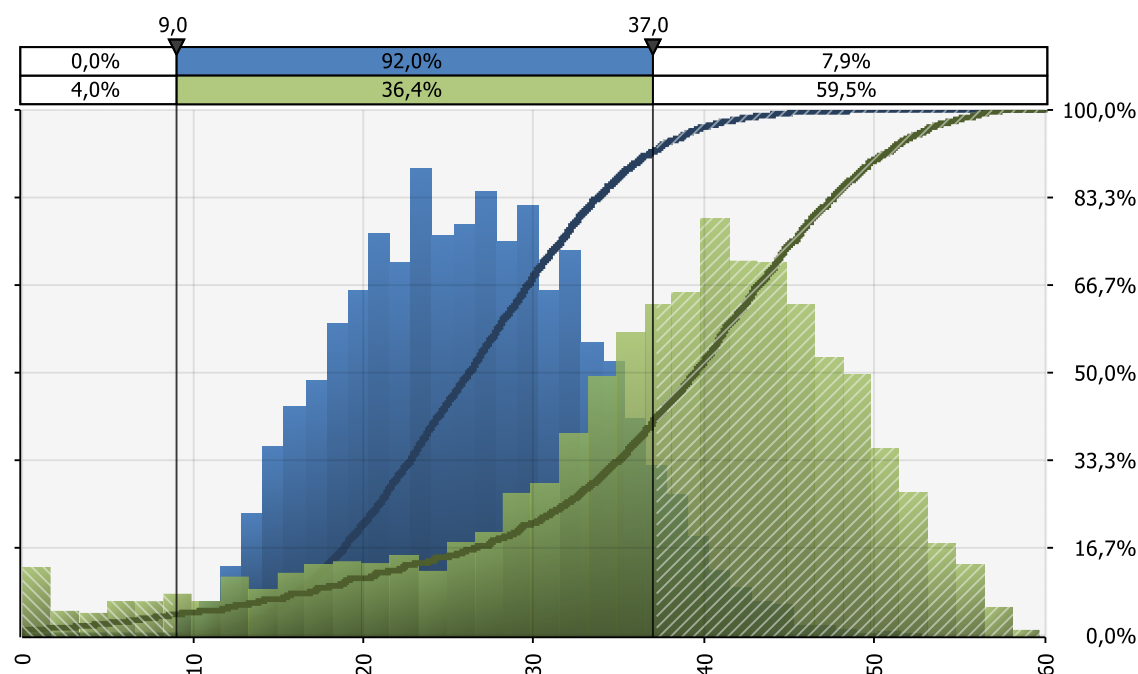
6 Resultater

Nedenfor er resultatene fra den kvantitative analysen. Alle verdier er **tonn kvikksølv**. Den totale mengden kvikksølv i U-864 var rundt 67 tonn, fordelt på 1857 beholdere.

Tabell 2 Resultater (mengder i tonn)

Alternativ 3:	Grave	Kutte
Forventet mengde som kan heves	26	37
p15	18	25
p85	34	48
Relativt standardavvik	28 %	32 %

Figuren nedenfor viser sannsynlighetstetthetskurven for begge metoder.



Figur 5 Sannsynlighetstetthetskurver for metode 1b Grave (blå) og for metode 4 Kutte (grønn)

Resultatene viser at:

- for metode 1B Grave (Grave) og metode 4 Kutte (Kutte) kan en forvente å heve rundt hhv. 26 og 37 tonn kvikksølv
- usikkerheten i mengden kvikksølv som kan heves med Kutte er større enn for Grave og som skyldes at det er mulighet for at det ikke lykkes å kutte og heve vrakdelene (null tonn hevet), eller at det kun lykkes å heve en av vrakdelene og at denne delen inneholder få kvikksølvbeholdere. For Grave er det vurdert som sikkert at man får gravet/mudret tilgang til den ene siden (erfaring fra Tokt 2B) og er da sikret å få hevet en del av de gjenstående beholdere.
- Grave vil med sikkerhet kunne heve minst 9 tonn kvikksølv, mens det er en 4 % sannsynlighet for at Kutte vil kunne oppnå mindre enn 9 tonn (inkludert null tonn).

- det er kun 7,9 % sannsynlighet for at Grave vil kunne heve 37 tonn eller mer, mens det for Kutte er hele 60 % sannsynlighet for at resultatet vil være mer enn denne mengden.

Kort oppsummert viser analysen at Grave «uansett» vil lykkes å heve en viss mengde kvikksølv, mens Kutte kan ende med å ikke få hevet noe dersom operasjonen viser seg å ikke lykkes. Derimot er potensialet for å heve gjenstående mengde kvikksølv i kjølkassene større for Kutte, da det er god sannsynlighet for at denne operasjonen lykkes.

En viktig presisering til resultatene:

For Grave er vurderingene som er lagt til grunn basert på erfaringer fra Tokt 2B og med noen grad av forbedringer basert på de erfaringene som ble gjort. For Kutte har Subsea 7 lagt til grunn omfattende utvikling og testing av metode og teknologi. Dersom tilsvarende investering gjøres for Grave, og da konkret på metode og utstyr for å få tilgang til kjølkassene på motsatt side ved å gå gjennom senterplaten, så vil forventet mengde kvikksølv som kan heves øke for denne metoden.

Et annet sentralt moment som gjelder begge metoder er:

- dersom de fleste kvikksølvbeholderne var stuert i kjølkassene midtskips
- og i tillegg en større andel av kjølen på gjenværende vrakdelar ble knust under torpederingen og/eller når vrakdelene traff sjøbunnen

da kan mengden kvikksølv som vil kunne heves fra gjenværende kjølkasser være svært begrenset og det selv om operasjonene lykkes fullt ut med sikre tilgang til alle gjenværende kjølkasser. Dette fordi kvikksølvet da har lekket ut i sedimentene fra den ødelagte midtseksjonen og kjølkassen. En svært omfattende mudring og heving av disse massene må i så tilfelle gjennomføres for å heve denne mengden med kvikksølv.

Det er derfor ingen garanti for at en operasjon vil kunne heve store mengder av kvikksølvet som var lastet i U-864 ved avreise fra Bergen i 1945, med mindre et tiltak også inkluderer mudring/graving og at disse massene fraktes til land for videre behandling.

7 Estimatusikkerhet

Nedenfor er variablene benyttet i den kvantitative analysen listet

Navn / beskrivelse	P10	Mode	P90	E
Grunnleggende variabler				
Antall kvikksølvbeholdere				1857
Antall flasker per kammer. Erfaringer Tokt 2B				24
Lengde kjø				44 m
Lengde kjø som er ødelagt. Lengden på midtseksjonen som er ødelagt er 7m, men bruddsonen mot kjølkassene er usikker. Det er antatt at ca. 16 m er ødelagt, første vurdering var ca. 4 m. Men kan være at større del er ødelagt under torpedering og/eller ved treff av sjøbunnen, så et høyt anslag legges på +30 %.	4 m	16 m	20 m	15 m
Andelen av kjø som er ødelagt for akter vs. forskipet. Dette får betydning for om kun en av vrakdelene lykkes å bli hevet. Antas like sannsynlig at en større andel er ødelagt på forseksjon som akterseksjon. Benytter Uniformfordeling for å analysere dette, der skjevheten i fordeling av den ødelagte kjølen (for- vs. akterseksjon) er angitt i %.	- 15 %	0 %	+ 15%	0 %
Korrosjon. Erfaringene fra Tokt 2B tilsier 10 av 24 flasker korrodert, 2 ikke hentet så usikker status på disse. Antar noe lavere i akterskipet da kjølkassene ligger dypere	10	11	12	11 flasker 46 % 40 %
Mengde fritt kvikksølv sugd opp. Erfaringene fra Tokt 2B tilsier 20,5 liter av en antatt mengde på 29,7 liter (11 beholdere). /V20/	14	20	27	17 liter 59 %
Andel kvikksølv som renner ut ved heving. Tokt 2B viste at det lekker kvikksølv ut fra kjøplatene, så en andel kan tapes før vrakdelen kommer over en matte eller i løfteanordning	1 %	2 %	5 %	2,7 %
Kjølkasser som ikke heves pga. kutt forskip				4 stk
Operasjon: Grave				
Forskip BB.				
Tilgang til alle kasser	70 %	80 %	90 %	80 %
Tilgang til 2/3 av kassene (gjenværende sans.)				20 %
Ingen tilgang				0 %
Forskip STB.				
Tilgang til alle kasser	20 %	30 %	40 %	30 %
Tilgang til 2/3 av kassene	40 %	50 %	60 %	50 %



Navn / beskrivelse	P10	Mode	P90	E
Ingen tilgang (gjenværende sans.)				20 %
Akterskip STB.				
Tilgang til alle kasser	50 %	60 %	70 %	60 %
Tilgang til 2/3 av kassene (gjenværende sans.)				40 %
Ingen tilgang				0 %
Akterskip BB.				
Tilgang til alle kasser	10 %	20 %	30 %	30 %
Tilgang til 2/3 av kassene	40 %	50 %	60 %	50 %
Ingen tilgang (gjenværende sans.)				30 %
Operasjon: Kutte				
DWS klargjort. Grave stabil plass per seksjon	85 %	95 %	100%	91 %
Gjennomføre kutt. Fullføre kutt per seksjon	95 %	97,5 %	100%	97 %
Gjennomføre løft av vraksesjon. Per seksjon	95 %	97,5 %	100%	97 %
Åpne kjølkasser og tømme innhold på land				100 %

8 Kilder

/D01/ Salvage of U864 – Supplementary studies – Study no. 7: Cargo

/V20/ Rapport fra Franzefoss. Håndtering, rengjøring og deklarerer av avfall fra tokt 2 – U-864

/D29/: PROSUB: U-864 – Offshore Campaign 2 and 2b (31. august 2026)