

tapTil: Marstrand og Kystverket
v/ Henning Refshauge Vahr og Lill Veronika Benjaminsen
Kopi til: Jens Laugesen DNV
Dato: 2026-04-22
Rev.nr. / Rev.dato: FORELØPIG /
Dokumentnr.: 20240585-01-TN
Prosjekt: U-864 opphenting av last, konseptvalgutredning
Prosjektleder: Espen Eek
Utarbeidet av: Espen Eek
Kontrollert av: Arne Pettersen

Vurdering av tildekkingsmasser og volumer

Innhold

1	Innledning	2
2	Grunnlag og antakelser	2
3	Estimerte volumer	3
3.1	Erosjonsbeskyttelse	3
3.2	Tildekkingslag	3
3.3	Fylling for oppbygging omkring vrak deler	3
3.4	Eventuelle aktive tildekkingslag	4
3.5	Ekstra tildekking for å redusere spredning ved eksplosjon av torpedoer	5
3.6	Oppsummering av estimerte volum	5
4	Estimert tap av finstoff ved utlegging av tildekkingsmasser	6
4.1	Differanse masser lagt ut og volum gjenfunnet	6
4.2	Tap av finstoff fra endringer i kornfordeling	7
5	Referanser	8

Vedlegg (slett hvis ikke benyttet)

Vedlegg A Eksempel på tekst

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

Kystverket gjennomfører utredninger og kostnadsestimer for ulike alternative tiltak for å stabilisere forurensingen ved vraket av U-864. Vraket ble oppdaget i 2003 og vraket og sjøbunnen omkring inneholder inntil 67 tonn kvikksølv. Tildekking av vraket er et av alternativene som utredes som en selvstendig løsning og tildekking vil dessuten være et aktuelt tiltak også etter heving av last eller heving av hele vraket for å isolere restforurensing.

Dette notatet oppsummerer estimerte volumer av tildekkingsmasser som vil være nødvendig for å dekke til vraket og de forurensede sedimentene og estimerer av tap av finstoff under utlegging av masser på sjøbunnen.

Estimatene i notatet er gjort som beste estimat basert på tilgjengelig informasjon. Mindre avrundinger er gjort i konservativ retning.

2 Grunnlag og antakelser

Vurderingene av mengder masser som er nødvendig er basert på konseptuelt design av tildekkingen (NGI, 2014) og beskrivelsen av den geotekniske modellen av tildekking og støttefylling beskrevet av Geopartner (2014).

Estimat av tap av finstoff er basert på erfaringene fra utlegging av støttefyllingen fra 2016 (DNV, 2016)

Tabell 2-1 Oversikt over parametere brukt i estimer

Parameter	Verdi	Referanse
Forurensset areal	47 000 m ²	(Kystverket, 2014)
Areal som tildekkes	50 000 m ²	(Kystverket, 2014)
Forseksjon lengde	38 m	(Kystverket, 2014)
Akterseksjon lengde	42 m	(Kystverket, 2014)
Høyde vrak	5 m	(NGI, 2014)
Areal vrakområde	8777 m ²	Estimert fra vraklengder og antar skråning 1:3
Areal overflate tildekking over vrak	9251 m ²	Estimert fra vraklengder og antar skråning 1:3
Mektighet tildekking vrakområde	3,2 m	(NGI, 2014) design tykkelse 2,9, erosjonsbeskyttelse økt fra 0,2 m til 0,5 m
Mektighet tildekking utenfor vrakområde	1,5 m	(NGI, 2014) design tykkelse 1,15, erosjonsbeskyttelse økt fra 0,2 m til 0,5 m
Mektighet erosjonsbeskyttelse/trålbekyttelse	0,5 m	Erfaringstall
Bulk densitet erosjonsbeskyttelse	1,5 – 1,73 t/m ³	Grusbutikken.no
Bulkdensitet andre tildekkingsmasser	1,4 – 1,61 t/m ³	Grusbutikken.no

3 Estimerte volumer

3.1 Erosjonsbeskyttelse

Volum = areal x mektighet = $50\,000\text{ m}^2 \times 0,5\text{ m} = 25\,000\text{ m}^3$
Estimert vekt: Volum x bulk densitet = $25\,000\text{ m}^3 \times 1,7\text{ t/m}^3 = 42\,500\text{ t}$

3.2 Tildekkingslag

I vrakområdet

Volum = areal x mektighet = $9251\text{ m}^2 \times 3,2\text{ m} = 29\,603\text{ m}^3$
Estimert vekt: Volum x bulk densitet = $29\,603\text{ m}^3 \times 1,5\text{ t/m}^3 = 44\,405\text{ t}$

Utenfor vrakområdet:

Volum = areal x mektighet = $(50\,000\text{ m}^2 - 8777\text{ m}^2) \times 1,5\text{ m} = 61\,835\text{ m}^3$
Estimert vekt: Volum x bulk densitet = $61\,835\text{ m}^3 \times 1,5\text{ t/m}^3 = 92\,752\text{ t}$

Sum tildekking:

Volum = $91\,438\text{ m}^3$
Vekt = $137\,157\text{ t}$

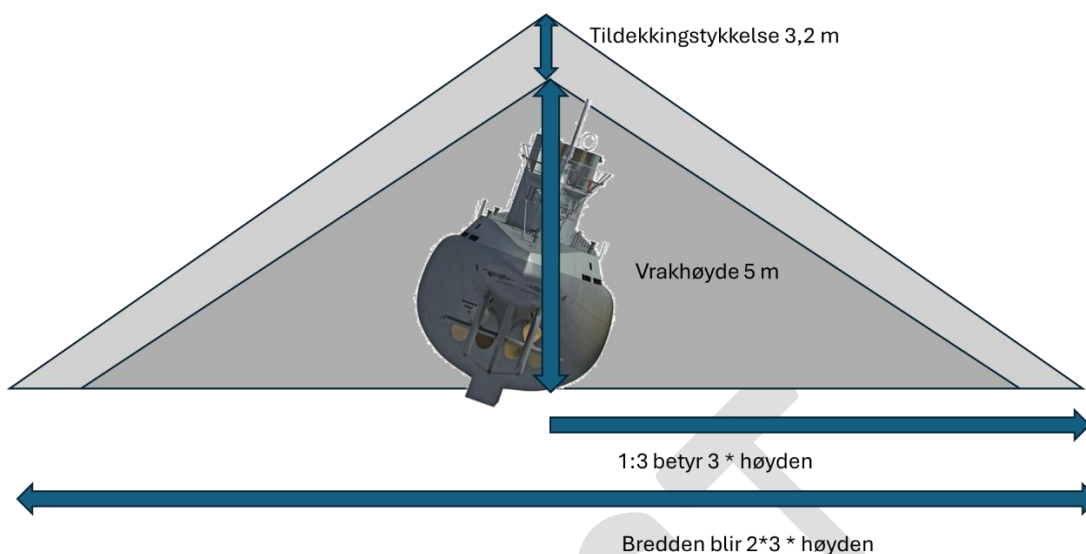
Sum tildekking uten erosjonsbeskyttelse:

Volum = $66\,438\text{ m}^3$
Vekt = $94\,657\text{ t}$

3.3 Fylling for oppbygging omkring vrak deler

Ved vrakdelene må det legges ut fyllmasser omkring vraket slik at det er mulig å legge ut masser overvrakdelene. Volumet av disse fyllingene er estimert ved å anta at de kan legges ut med en skråning på 1:3. Den riktige skåningsvinkelen blir bestemt i den geotekniske detaljprosjekteringen.

Volumet for denne fyllingen er beregnet ved å estimere volumet av hele fyllingen inkludert tildekkingen og deretter å trekke i fra volumet av tildekkingen.



Figur 3-1 Illustrasjon som viser estimert volum av fyllingen

Lengde fylling og tildekking forseksjon = lengde forseksjon + (2 x 3 x (høyde vrak + høyde tildekking)) = 38 m + (2 x 3 x (5 m + 3,2 m)) = 87,2 m

Volum fylling forseksjon = Lengde fylling x høyde fylling x bredde fylling / 2 = 87,2 m x (5 m + 3,2 m) x (2 x 3 x (5 m + 3,2 m)) / 2 = 17 590 m³

Lengde fylling og tildekking akterseksjon = lengde akterseksjon x 2 x 3 x (høyde vrak + høyde tildekking) = 42 m + (2 x 3 x (5 m + 3,2 m)) = 91,2 m

Volum fylling akterseksjon = Lengde fylling x høyde fylling x bredde fylling / 2 = 91,2 m x (5 m + 3,2 m) x (2 x 3 x (5 m + 3,2 m)) / 2 = 18 397 m³

Volum fyllinger uten tildekking:

Volum fylling for oppbygging ved vraket = Sum fyllinger inkludert tildekking – tildekking = 17 590 m³ + 18 397 m³ – 26 603 m³ = 9 384 m³

Vekt fylling for oppbygging ved vraket:

Masse fylling = Volum fylling x bulkdensitet = 9 384 m³ x 1,5 t/m³ = 14 076 t

3.4 Eventuelle aktive tildekkingslag

I det konseptuelle designet (NGI, 2014) er det beskrevet at deler av tildekkingen kan erstattes med et 25 cm lag aktive materialer, bestående av aktivt kull for å øke binding av kvikksølv og bentonitt for å redusere permeabiliteten og dermed effekten av adveksjon induisert av vannstrømmer. Bentonitt og aktivt kull kan legges inn i designet hver for seg eller sammen.

Disse lagene kan enten legges til mektigheten beskrevet over og vil da fungere som en ekstra barriere og dermed øke kvaliteten på tildekkingen. Alternativt kan et lag med både aktivt kull og bentonitt erstatte inntil 1,6 m av de andre tildekkingsmassene. Dette er bare vurdert for tildekkingen over vrakområdet.

Dette betyr at med aktive tildekkingslag vil det være behov for følgende aktive tildekkingsmasser:

Aktivt kull: $0,15 \text{ m} \times \text{areal tildekking vrakområde} = 0,15 \text{ m} \times 9251 \text{ m}^2 = 1388 \text{ m}^3$ aktivt kull.

Kull har bulk densitet på $0,75 \text{ t/m}^3$ eller lavere. Dette volumet tilsvarer derfor om lag 1000 t. Kostnad for aktivt kull er høy ($>10\,000 \text{ NOK/t}$, $10\,000 \text{ NOK/t}$ for 20 år siden og 200 kr/kg for småkvanta nå).

Bentonitt: $0,1 \text{ m} \times \text{areal tildekking vrakområde} = 0,1 \text{ m} \times 9251 \text{ m}^2 = 925 \text{ m}^3$

Densitet til bentonitt varierer med pakningsgrad. Densitet for pakket bentonitt $2,0 \text{ t/m}^3$ er antatt her. Dette gir 1850 t bentonitt.

3.5 Ekstra tildekking for å redusere spredning ved eksplosjon av torpedoer

Ekstra beskyttelse mot spredning ved en eventuell eksplosjon av torpedoer kan oppnås ved å legge på et tykkere lag med tildekking. En slik beskyttelse er ikke prosjektert, men vurdert av FFI som en mulig løsning. Det er her estimert volumer for 2 m ekstra tildekking. Denne beskyttelsen er bare vurdert for vrakområdet.

Volum ekstra beskyttelse = $2,0 \text{ m} \times 9251 \text{ m}^2 = 18502 \text{ m}^3$

Masse ekstra beskyttelse = $1,5 \text{ t/m}^3 \times 18502 \text{ m}^3 = 27753 \text{ t}$

Økt tykkelse på denne fyllingen kan også føre til behov for tiltak for å sikre geoteknisk stabilitet. Dett kan for eksempel være støttefyllinger lokalt og eller utvidelse av den eksisterende støttefyllingen.

3.6 Oppsummering av estimerte volum

	Volum (m ³)	Masse (t)
Erosjonsbeskyttelse	25 000	42 500
Tildekking	66 500	95 000
Fylling ved vrakdelene	9 500	14 100
Sum design med sand og pukk	101 000	151 600
Ekstra tildekking for å redusere effekt av eksplosjon	18 500	28 000
Sum design med sand og pukk + ekstra tildekking	119 500	179 600
Aktiv tildekking Aktivt kull	1 400	1 000
Aktiv tildekking bentonitt	925	1 850
Aktiv tildekking redusert behov for ordinære tildekkingsmasser	14 800	22 200

4 Estimert tap av finstoff ved utlegging av tildekkingsmasser

Overforbruk av masser forventes på grunn av to mekanismer:

- Tap av finstoff som driver bort med vannstrøm
- Innsynkning og innblanding i sedimentet

Dette tapet er estimert fra resultater fra målinger gjort i forbindelse med installasjon av støttefyllingen i 2016. van Oord rapporterte både mengder masser brukt og volum av fyllingen oppmålt på sjøbunnen (Oord, 2016). Dette ble brukt til å estimere totalt overforbruk av masser, som kan skyldes begge mekanismene beskrevet over.

I starten av denne installasjonen ble det installert noen test-områder der tildekkingsmasse med høyt innhold av finstoff ble lagt ut. Disse ble prøvetatt med vibro-corer etter installasjonen av disse og før installasjonen av resten av fyllingen. Prøver fra disse testområdene ble analysert for korn fordeling og sammenlignet med kornfordeling av massene før de ble lagt ut. Disse analysene viste at massene var vesentlig grovere etter utlegging enn før utlegging. Denne forskjellen ble brukt til å beregne tap av finstoff under utleggingen.

4.1 Differanse masser lagt ut og volum gjenfunnet

Tabell 4-1 Mengde masser brukt og gjenfunnet rapportert av van Oord

Construction Stage	As found volumes (Vol m ³)	Installed quantities (Te)	Factor (T/m ³)
Stage 1: Sand installation on Area 1 (Incl. calibration fill)	12893	26209	2,03
Stage 2: Sand installation on Resuspension Layer A	924	1854	2,01
Stage 3: Rock installation on Resuspension Layer A and Area 1	69225	128237	1,85
Stage 4: Sand Installation on Resuspension Layer B	179	480	2,68
Stage 4: Sand Installation on Area C	659	1645	2,5
Stage 5: Rock Installation on Resuspension Layer A/B, Area C and Area 1	16012	28442	1,78
Stage 6: Sand Installation on the Horseshoe	4460	10255	2,3
Stage 7: Rock Installation on the Horseshoe	1543	2808	1,82
Total	105895	199930	

Tabell 4-1 viser verdier rapportert av van Oord. Mengden masser installert ble brukt til å beregne et teoretisk volum basert på bulk densitet. Avvik mellom teoretisk fyllingsvolum og observert (gjenfunnet) fyllingsvolum er lik overforbruket.

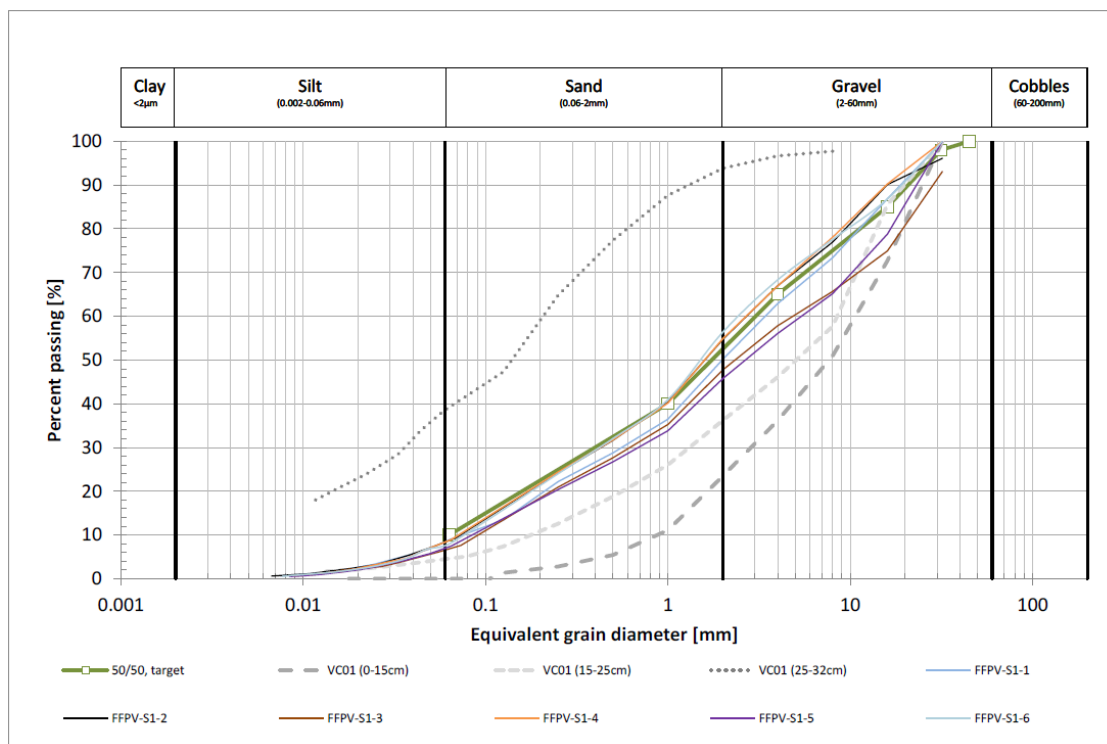
Dette er vist i tabellen nedenfor.

	Lavt estimat	Høyt estimat
Bulk densitet sand (t/m ³)	1,61	1,4
Bulk densitet rock (t/m ³)	1,61	1,5
Teoretisk volum sand fra masse lagt ut (m ³)	25120	28888
Teoretisk volum rock fra masse lagt ut (m ³)	99060	106325
Observert volum sand (m ³)		19115
Observert volum rock (m ³)		88363
Tapt volum sand (m ³)	6005	9773
Tapt volum rock (m ³)	10697	17962
Tapt masse sand (t)	9668	13682
Tapt masse rock (t)	17223	26943
Prosent tap sand	24 %	34 %
Prosent tap rock	11 %	17 %

Figur 4-1 Beregning av masse tap fra utlagt mengde masser og målt installert fylling

4.2 Tap av finstoff fra endringer i kornfordeling

Rapporten fra kornfordelingsanalysene etter utlegging av testfyllingene inneholder kornfordelingsanalyse av mange prøver fra ulike testfyllinger. Her er det bare gjort estimat av tap av finstoff fra prøver fra Streng 1 (50/50 0-2 mm og 0-32 mm, 250/400 tonn/time).



Figur 4-2 Kornfordeling i masser før og etter utlegging på testfelt før installasjon av støttefyllingen ved U-864

Ved å relatere redusert mengde for de ulike kornstørrelsene til mengden av de største partiklene (som sannsynligvis ikke tas med strømmen) så ble mengden tap estimert til 17 – 50%.

5 Referanser

DNV. (2016). *U-864 Støttefylling - Sammenstilling av kornfordelingsanalyser fra kalibreringsfylling* [Memo til: Kystverket](10U4B3P-28/ ET).

Kystverket. (2014). *Sentralt Styringsdokument for Miljøtiltak ved vraket av U-864 Alternativ 1 Tildekking av vrak og forurensset havbunn* [Styringsdokument].

NGI. (2014). *Modellering for design av tildekking av U-864 og forurensede sedimenter. Forprosjekt U-864*. NGI.

Oord, V. (2016). *SRI As-built report Rock installation Counter Fill U-864* (10.0045-VON-R-RP-0002 Rev01).

UTKAST

Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Vurdering av tildekkingsmasser og volumer		Dokumentnr./Document no. 20240585-01-TN
Dokumenttype/Type of document Teknisk notat / Technical note	Oppdragsgiver/Client Marstrand og Kystverket	Dato/Date 2026-04-22
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/Proprietary rights to the document according to contract NGI		Rev.nr. & dato/Rev.no. & date FORELØPIG /
Distribusjon/Distribution BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
Emneord/Keywords Tildekking, Kvikkølv, Skipsvrak, U-864		

Stedfesting/Geographical information	
Land, fylke/Country	Havområde/Offshore area
Kommune/Municipality	Feltnavn/Field name
Sted/Location	Sted/Location
Kartblad/Map	Felt, blokknr./Field, Block No.
UTM-koordinater/UTM-coordinates Sone: Øst: Nord:	Koordinater/Coordinates Projeksjon, datum: Øst: Nord:

Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev/Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemanns-kontroll av/ Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Inter-disciplinary review by:
0	Originaldokument	Velg kontrolldato Ditt fulle navn her	Velg kontrolldato Ditt fulle navn her		

Dokument godkjent for utsendelse/ Document approved for release	Dato/Date Velg dato	Prosjektleder/Project Manager Prosjektleders fulle navn her
--	-------------------------------	---

NGI – Norges Geotekniske Institutt - er et uavhengig forskningsinstitutt innen geoteknikk og andre ingeniørrettede geofag.

Vi kombinerer geokunnskap og teknologi for å utvikle smarte og bærekraftige løsninger innen infrastruktur på land og til havs, innen miljøteknologi, forurensset grunn og naturfarer som jord- og snøskred. Forskningen vår leverer kunnskap som bidrar til å løse noen av de viktigste utfordringene verden står overfor innenfor klima, miljø, energi og samfunnssikkerhet.

Samfunnsoppgaven vår er å utvikle geofagene og fremskaffe kunnskapsgrunnlaget for å bygge, bo og ferdes på sikker grunn. Dette løser vi ved å la forskning og rådgivning gå "hånd i hånd" og være brobygger mellom akademia, næringsliv og det offentlige.

Vi har kontorer i Norge, USA og Australia og vi har internasjonalt anerkjente laboratorier.

www.ngi.no

NGI – The Norwegian Geotechnical Institute – is an independent research centre in the field of geotechnical engineering and the engineering geosciences.

We combine geotechnical knowledge and technology to develop smart and sustainable solutions in infrastructure on land and at sea, in environmental technology, contaminated soil and natural hazards such as landslides and avalanches. Our research provides knowledge that contributes to solve some of the most important challenges the world faces with regards to climate, the environment, energy and societal security.

Our societal mission is to develop the geosciences and produce the knowledge basis to build, live and travel on safe ground. We solve this by combining research and consulting hand-in-hand and being a bridge-builder between academia, industry and the public sector.

We have offices in Norway, the US and Australia, including internationally recognised laboratories.

www.ngi.no

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.



DNV. (2016). *U-864 Støttefylling - Sammenstilling av kornfordelingsanalyser fra kalibreringsfylling*
[Memo til: Kystverket](10U4B3P-28/ ET).
Kystverket. (2014). *Sentralt Styringsdokument for
Miljøtiltak ved vraket av U-864
Alternativ 1
Tildekking av vrak og forurensede
havbunn* [Styringsdokument].
NGI. (2014). *Modellering for design av tildekking av U-864 og forurensede sedimenter. Forprosjekt
U-864*. NGI.
Oord, V. (2016). *SRI As-built report
Rock installation Counter Fill U-864* (10.0045-VON-R-RP-0002 Rev01).