



FFI-NOTAT

Eksternnotat 26/01230

Vraket av U-864 – vurderinger knyttet til torpedolasten

Forfattere

Eirik Svinsås, Martin Fonnum Jakobsen, Magnus Vartdal, Tor Erik Kristensen, Pål Martin Greni

Prosjektnummer 1701

4. juni 2026

Godkjennere

Marianne Bolsønes – *forskningsleder*

Halvor Ajer – *forskningssjef*

Helene Thorsen Rønning – *forskningssjef*

Janet M. Blatny – *forskningsdirektør*

Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskrevne signaturer.

Emneord

Undervannsbåter, kvikksølv, torpedoer, eksplosiver, undervannsdetonasjoner

Sammendrag

Dette notatet er skrevet på oppdrag fra Kystverket, iht. FFI-kontrakt 82111. Gjennomføringen har vært et samarbeid mellom avdelingene Totalforsvar, Forsvarssystemer og Innovasjon og industriutvikling.

Oppdragets tema er muligheten for utilsiktet detonasjon av torpedolasten om bord i det tyske ubåtvraket U-864. Forsvarsmateriell sin beskrivelse av type og antall torpedoer er lagt til grunn. Basert på dette er faremomenter relatert til slag, trykk og aldring av torpedoer vurdert. Omfanget av spredning av kvikksølv ved utilsiktet omsetning av torpedoer etter eventuell tildekking av vraket er estimert.

Notatet beregner ikke kvantitativ risiko, men gir vitenskapelig funderte betraktninger så langt det går. Resultatene er gyldige for U-864. Andre vrak eller ammunisjonstyper krever egne vurderinger.



Innhold

1	Sammendrag	4
2	Bakgrunn	6
3	Vraket av U-864	7
3.1	Generelt	7
3.2	Skrog og torpedorør	8
3.3	Torpedoer	9
4	Detonasjon av torpedoer under overdekning	10
4.1	Generelt	10
4.2	Detonasjonspunkt og overdekning	10
4.3	Noen betraktninger om detonasjon i luft og vann	11
4.4	Bevegelsesmekanismer for detonasjonsboblen	13
4.5	Forenklet simuleringsoppsett	14
4.6	Simuleringer med Impetus	15
4.7	Aksesymmetriske simuleringer med intern Euler-kode	16
5	Sprengstoff i torpedoenes stridshoder	19
5.1	Innledning	19
5.2	Hovedladningenes kjemiske sammensetning	20
5.3	Hovedladningenes fysiske egenskaper	21
5.4	Hovedladningenes kjemiske egenskaper og stabilitet	22
5.5	Tennladningenes kjemiske sammensetning og stabilitet	24
5.6	Detonatorenes kjemiske sammensetning og stabilitet	24
5.7	Spesielt om tennerens slagfølsomme tennsats	25
5.8	Virkningen av høyt statisk trykk	26
6	Tennapparatet Pi 4c	26
6.1	Generelt	26
6.2	Virkemåte	27
6.3	Tilstand	29
6.4	Effekt av korrosjon	30
6.5	Andre mulige feiltilstander	33

7	Konsekvens av brudd i luftflasker	34
8	Oppsummering og vurdering av praktiske konsekvenser	38
8.1	Generelt	38
8.2	Belastninger fra slag og bevegelser under håndtering av vraket	40
8.3	Tildekking	41
8.4	Mulighet for detonasjon på lang sikt	41
8.5	Spredning av kvikksølv ved en eventuell detonasjon	42
8.6	Stikkordsmessige svar på kontraktens opprinnelige spørsmål	42
	Referanser	44
	Vedlegg 1 – Detonasjonssimuleringer i Impetus Afea	46

1 Sammendrag

I 1945 ble den tyske ubåten U-864 torpedert utenfor Fedje. Fartøyet ble delt i to og sank på om lag 150 m dybde. U-864 fraktet blant annet kvikksølv i stålflasker som var plassert i kjølkassene, til sammen 67 tonn. Deler av kvikksølvlasten ble spredt på havbunnen etter eksplosjonen, mens noe sannsynligvis er igjen i eller under vraket. U-864 inneholder også udetonerte torpedoer og annen ammunisjon. Vurdering av tiltak for å hindre miljøkonsekvenser har pågått i flere runder siden vraket ble funnet i 2003.

Dette notatet er skrevet på oppdrag fra Kystverket. Bakgrunnen er nye opplysninger fra Forsvarsmateriell (FMA) om at det sannsynligvis er en torpedotype om bord i U-864 som har tennapparater med såkalt ubrutt tennkjede, noe som potensielt kan øke risikoen for detonasjon på kort eller lang sikt. Kunnskap om selve torpedotypen er ikke ny. Tekniske detaljer om tennapparatet har imidlertid kommet gradvis, og FFI har ikke tatt høyde for dette i tidligere innspill til Kystverket.

Konkret har FFIs oppdrag vært å kartlegge hva slags ytre belastninger torpedoer i vraket tåler. Spesielt nevner Kystverket utlegging av masser for tildekking, langsiktig sammensynking og deformasjon av vraket og eventuell brist i interne luftflasker. Det er også stilt spørsmål ved om innfylling av masse inne i trykkskrog og mellom torpedorør kan redusere muligheten for detonasjon, og hvorvidt en detonerende torpedo kan føre til at flere torpedoer går av (sympatetisk detonasjon). Det er videre bedt om en vurdering av i hvilken grad en detonasjon vil medføre spredning av kvikksølv.

FFI har lagt til grunn FMA sin beskrivelse av ammunisjonsbeholdningen. I tillegg har FFI på forespørsel fått oversendt flere detaljer knyttet til blant annet luftflasker, tennapparater og tennere. Alle vurderinger i dette notatet er imidlertid FFIs ansvar.

Det er kjent at flere typer eksplosiver kan beholde sin sprengkraft i lang tid, i mange tilfeller også under vann. For enkelte ammunisjonstyper kan det forekomme nedbrytningsprosesser i eksplosivene eller reaksjoner mellom eksplosiver og omgivelsene (for eksempel metaller) som gjør at følsomheten for håndtering og slag kan bli større. Dette vil som oftest være et mindre problem når det er vann til stede. At gamle militære eksplosiver detonerer spontant uten ytre påvirkning, vil som hovedregel ikke forekomme.

En detaljert gjennomgang av eksplosivene (alle deler av tennkjeden) i den aktuelle torpedotypen (G7es med tennapparat Pi 4c), indikerer at eksplosivenes følsomhet for direkte mekanisk påvirkning ikke har økt vesentlig, og heller ikke kommer til å gjøre det (kapittel 5).

Tennapparater av type Pi 4c er designet uten en fysisk barriere mellom tenner og tennsats. Studier av virkemåten og de fysiske sikringsmekanismene (kapittel 6) viser at disse tennapparatene er forholdsvis trygge å håndtere i uarmert tilstand, slik tilfellet er her. Dette gjelder både i 2026, og også på lenger sikt dersom torpedoer og tennapparater degraderes av korrosjon over tid.

Brudd i luftflasker synes ikke å kunne sette av stridshoder eller tennapparater (kapittel 7).

Under eventuell håndtering av vraket av U-864 kan ikke FFI se at torpedoene av type G7es med Pi 4c utgjør noen større reell fare enn andre typer gamle torpedoer med nesemonterte tennapparater. Torpedolasten vil tåle forventet bevegelse av vrakdelene under operasjoner som for eksempel inspeksjoner, tømning av kjølkasser og tildekking. Dette er også gyldig for tilsvarende bevegelser som del av en eventuell hevingsoperasjon. Heving er imidlertid en mye mer sammensatt problemstilling som ikke er vurdert her. For ordens skyld nevnes likevel at detonasjon av en torpedo i vraket under en hevingsoperasjon kan senke bergingsfartøy og medføre tap av liv. Bevegelser av vrakdelene som kan gi direkte støt mot torpedorør i baug og hekk, må unngås.

FFI vurderer at det er liten mulighet for at torpedoene skal detonere dersom de blir værende i vraket, både på kort og lang sikt. Ingen av eksplosivene vil kunne selvdetonere uten ytre påvirkning. Eksplosivene, både i tennapparater og hovedladninger, kan fortsatt være virksomme, men tåler godt store belastninger som inntreffer langsomt, som ved sammensynking av masser og gradvis svikt av vraket. For torpedoer med tennapparater i torpedorørene vil selve tennerne, som er mest følsomme, sitte forholdsvis godt beskyttet inne i en hovedladning som rent mekanisk virker dempende. Lavfrekvente skjær- og trykkbølger fra jordskjelv vurderes å ikke i seg selv kunne sette av eksplosiver som ligger innesluttet i deformerbare materialer som sand eller vann.

Sprengstoff kan riktignok detonere ved direkte påvirkning av «tunge» langsomme støt som gir kraftig sammenklemming, slik som (på land) ved graving, hydraulisk pigging eller treff av tunge komponenter ved en kollaps av stive strukturer. Slike hendelser kan ikke helt utelukkes inne i vraket av U-864, og kan eksempelvis være en sekundæreffekt av jordskjelv. Torpedoer inne i vraket har ikke innmonterte tennapparater, og er dermed lite følsomme. Dersom man ønsker å ta høyde for at dette utgjør en risiko, vil innfylling av finkornet granulær masse (eksempelvis sand) hjelpe.

Kystverket har bedt om en vurdering av i hvilken grad en utilsiktet detonasjon av en torpedo kan føre til spredning av kvikksølv. FFI har ikke kunnet utelukke at én torpedo kan sette av sine nærmeste naboer, og har derfor gjennomført forenklete simuleringer av en samtidig detonasjon av fire torpedoer i forskipet i et tildekket vrak. Tykkelse på overdekningen og avstanden til fast fjell ble variert. Deretter ble det foretatt en mer detaljert analyse av det verste tilfellet (kapittel 4). Det antas «flatt terreng» uten havstrøm. Av tekniske årsaker er sand og leire behandlet som væsker, men med tilpasset tetthet og kompressibilitet. Forutsetningen gir konservative resultater på grunn av urealistisk stor omrøring. Vann, overdekning, havbunn (sedimenter) og fast fjell er representert. Det er antatt at kvikksølv kan være til stede i havbunnen, men ikke i overdekningen.

Resultatene viser at mengden kvikksølv som kan føres oppover i vannsøylen sammen med detonasjonsproduktene er svært liten. Avhengig av hvilken faktisk konsentrasjon av kvikksølv som finnes i sedimentene, kan det være snakk om noen få gram. Noe forurensede sedimenter kan suges opp innenfor en sirkel med radius 6 m på opprinnelig havbunn, og raskt legge seg på toppen av overdekningen innenfor en radius på 10 m. Dersom innholdet fra en eller flere flasker eller «hot spots» berøres, kan berørt mengde kvikksølv være større (noen titalls kilo), men dette

vil bare delvis kunne suges opp gjennom overdekningen. Mengden er ikke tallfestet. Dette kvikksølv vil i hovedsak synke nært detonasjonspunktet, som forklart ovenfor og i kapittel 4. Deler av det kan imidlertid også, avhengig av partikkelstørrelse, transporteres noe lenger med eventuell strøm før det legger seg. Dette er ikke kvantifisert, men vil ha et omfang som er flere størrelsesordener mindre enn ved torpederingen i 1945.

Det understrekes at alle vurderinger i dette notatet bare har gyldighet for U-864, ikke for andre vrak eller ammunisjonstyper.

Notatet beregner ikke kvantitativ risiko, men gir vitenskapelig funderte betraktninger. Resultatene kan benyttes i formaliserte risikoanalyser ved behov.

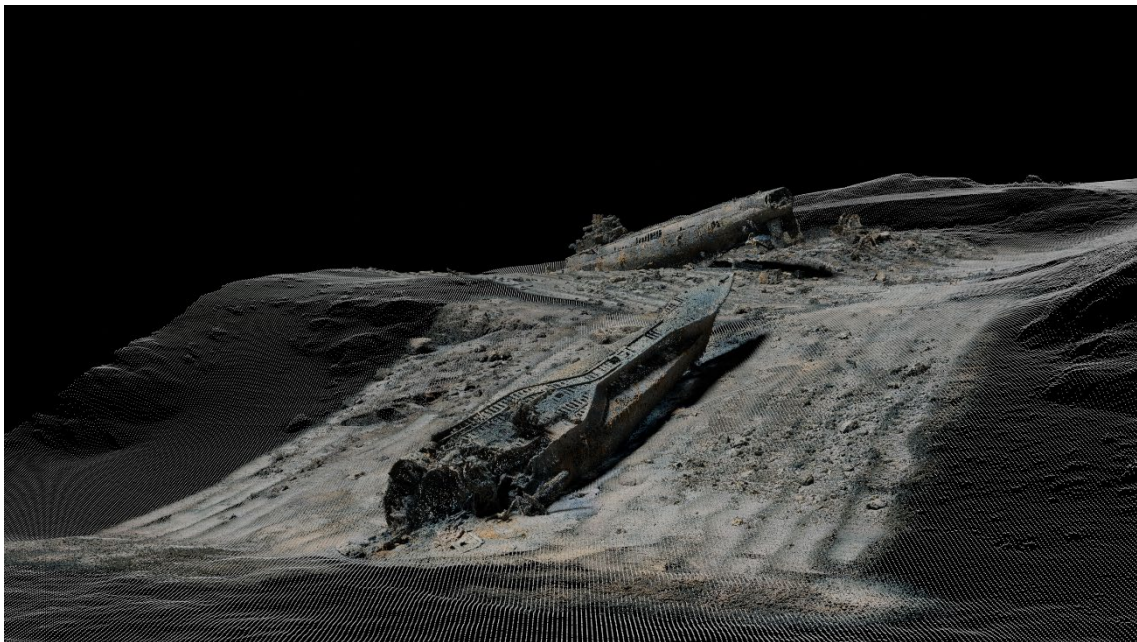
2 Bakgrunn

Den tyske ubåten U-864 ble torpedert av den britiske ubåten HMS Venturer utenfor Fedje 9. februar 1945. Fartøyet var på vei til Japan med strategisk viktig last til det japanske forsvaret, blant annet om lag 67 tonn kvikksølv som antakelig skulle benyttes til fremstilling av primæreksploder. Kvikksølv ble oppbevart i stålflasker i kjølkassene [1].

Etter lengre tids observasjon med passive sensorer avfyrt HMS Venturer fire torpedoer, og den siste traff U-864 midtskips. Dette blir omtalt som den første duellen mellom to neddykkede ubåter. Torpedoene av typen *Mark VIII*** benyttet trykkmåling for å holde en forhåndsinnstilt dybde på inntil 13 m [2]. U-864 ble altså torpedert nær overflaten. Det er antatt at dieselmotorene var i drift, og noe usikkert om innkommende torpedoer ble detektert [3]. De to vrakdelene (forskip og akterskip) ligger hver for seg på ca. 150–175 m dyp. Vraket ble lokalisert av Sjøforsvaret i 2003, og det er gjennomført en rekke utredninger siden 2006 for å finne en langsiktig løsning som gir minst mulig spredning av kvikksølv. Ekspertutvalgets samlerapport fra 2022 anbefalte en kombinasjon av heving av last og tildekking av vrak.¹

I 2025 ba Kystverket om nye innspill om ammunisjonssikkerhet fra forsvarssektoren, nærmere bestemt Forsvaret, Forsvarsmateriell og FFI. Forsvarsmateriell (FMA) leverte en justert risikoanalyse som påpekte at antallet torpedoer om bord sannsynligvis er lavere enn tidligere antatt, og antakelig også av en annen type. FFI anser at FMAs nye faktagrunnlag er solid underbygget med historiske kilder.

¹ Sitat fra utvalgets rapport: «Utvalget anbefaler en trinnvis prosess for håndtering av U-864, der mest mulig av lasten (kvikksølv) blir forsøkt fjernet fra vrakdelene og nærliggende sedimenter, før vraket og det mest forurensede området av sjøbunnen dekkes til».



Figur 2.1: Vrakdelene av U-864 (Kystverket).

Et sentralt punkt i FMAs utredning er at de av torpedoene som er ladet i torpedorør, har innmontert et tennapparat (brannrør) hvor det ikke inngår et fysisk skille i mellom eksplosive komponenter i tennkjeden før tennapparatet armeres etter utskytning. En utilsiktet detonasjon av den følsomme tennsatsen vil dermed detonere torpedoens stridshode. FMA er mer bekymret for at dette vil kunne skje på lang sikt, enn ved håndtering eller heving av vraket. I sitt tidligere tilsvarende til Kystverket sommeren 2025 var ikke FFI klar over denne informasjonen.

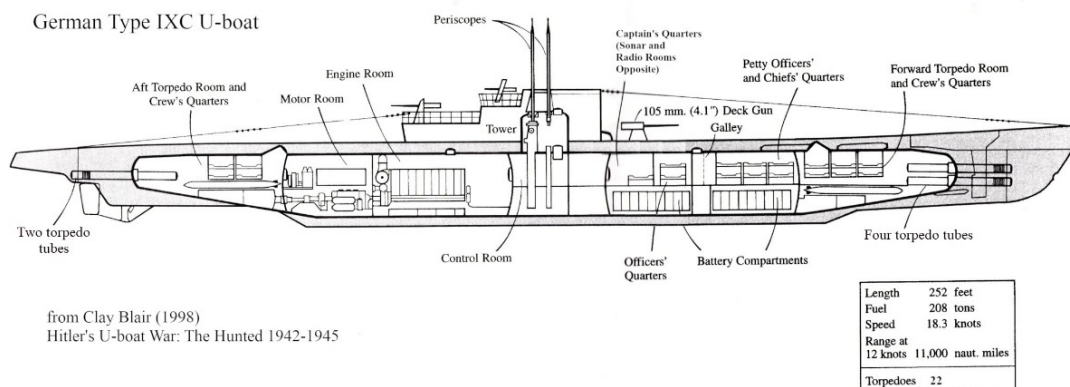
Kystverket har på bakgrunn av dette bedt FFI om tilleggsvurderinger. Konsekvensen ved detonasjon av torpedoer er her det mest sentrale. I tillegg gir notatet en beskrivelse av eksplosivene i alle aktuelle komponenter i de aktuelle torpedoene, inkludert følsomhet for aldring, statisk trykk, bevegelser, slag og påvirkning fra trykktanker som eventuelt skulle bryte.

Faktagrunnlaget om ammunisjon i dette notatet kommer i hovedsak fra FMA, som beskrevet i deres rapport [4], men også enkelte tillegg. For disse tilleggene har ikke FFI oversikt over originale referanser, og slike opplysninger er derfor alle oppgitt på samme måte som «personlig kommunikasjon» [21]. I enkelte tilfeller har forståelsen av slike ekstra tekniske detaljer blitt diskutert med avsender, noe som har vært nyttig og nødvendig. Den endelige fortolkningen er imidlertid FFIs ansvar.

3 Vraket av U-864

3.1 Generelt

Vraket og historien om U-864 er grundig dokumentert andre steder, og detaljer blir ikke gjentatt her. For at dette notatet skal ha en rød tråd, tar vi imidlertid med noen hovedtrekk.

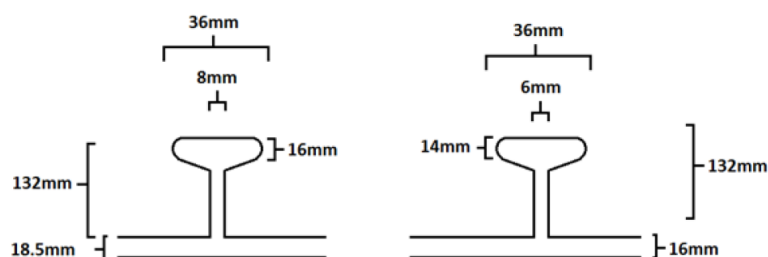


Figur 3.1: Forenklet skisse av ubåt type IX (her variant C). © Clay Blair (1998) *Hitler's U-boat War: The Hunted 1942-1945*. Cassell & Co., London. pages xxx-xxxi, gjengitt med tillatelse fra Shipwreck Preservation Society of Newfoundland & Labrador Inc.

U-864 er av type IXD2. Dette var en langdistanseubåt, videreutviklet fra eksisterende type IX, illustrert i figur 3.1. IXD2 hadde blant annet større drivstoffkapasitet, kraftigere framdriftsmaskineri og økt generell lastekapasitet enn tidligere type IX. Lengden på 87,6 m var ca. 11 m lengre, og største bredde økte fra 6,8 til 7,5 m. Diameteren og styrken på trykkskroget var uendret, med en største innvendig diameter på 4,4 m, og en (usikker) godstykkelse på minimum 18 mm. Maksimal oppgitt dykkedybde i strid varierer, men synes å ligge i området 230-270 m.

3.2 Skrog og torpedorør

Resttykkelse på trykkskroget ble i 2014 målt til minst 11 mm [5]. Simuleringer gjennomført av DNV GL samme år [6] benyttet midlere tykkelser på mellom 16,0 og 18,5 mm (med og uten korrosjon), se figur 3.2.



Figur 3.2: Godstykkelser i trykkskrog benyttet i styrkeberegninger i 2014 [5].

Detaljert konstruksjonsmåte for torpedorørene i torpedobatteriet i baugen er ikke kjent. FMAs rapport sier at torpedorørene opprinnelig var bronse, men at ressursknapphet også gjorde at rørene ble produsert av stål [4]. Fra tegninger synes det som torpedorørene gjennomgående har samme godstykkelse som trykkskroget og er sammensatt av fire seksjoner. Stålrør kan antas å korrodere med omtrent samme rate som trykkskroget. Rørene er satt sammen i en modul («firer-

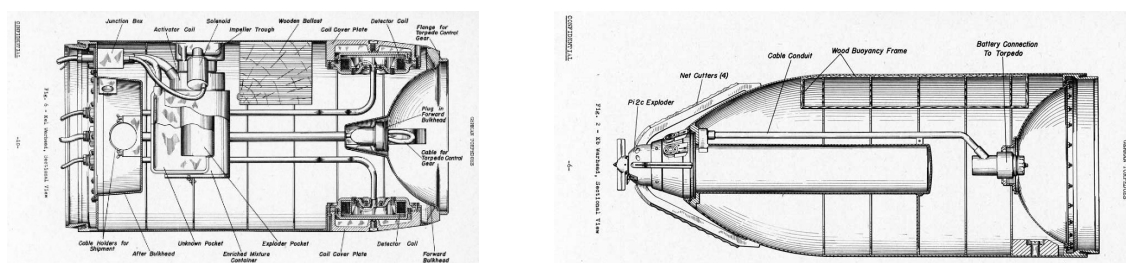
Formskroget av tynnere plater er i ferd med å gå i oppløsning og har liten reststyrke. Dette samsvarer godt med påvist korrosjon i trykkskroget.

FFI legger til grunn FMA sin beskrivelse av ammunisjonsbeholdningen i U-864 [4]. Torpedobeholdningen er antatt å være:

- Antall og type torpedoer er underbygget på flere måter [7]:

	Reduksjon	Kilde	Gjenværende
Maksimal kapasitet	-	Teknisk beskrivelse	27
Ombygging	6	Dokumentert på film	21
Bruk av lastekonteinere	6	Fartøyets krigsdagbok	15
Standard konfigurasjon	1	«Standing war order #60»	14
Transportoppdrag	6	Opplysninger om søsterfartøy	8

Alle torpedoer er antatt å ha elektrisk fremdrift, henholdsvis type G7e (TIII) med stridshode Kb og Pi 2 tennapparat og G7es (TV) med stridshode Ke og Pi 4c tennapparat, se figur 3.3. Det foreligger ikke opplysninger om at det er forskjeller i anvendt sprengstoff i de ulike stridshodene og tennapparatene. Stridshodets materiale kan være bronse eller stål avhengig av modell og produksjonsår. Eksempler på stridshoder av stål (type Ke) er vist i figur 3.4.



Figur 3.3: Aktuelle torpedostridshoder, svarende til K_e (venstre) og K_b (høyre) [19].

FMA oppgir at hovedladningen består av om lag 280 kg av sprengstofftype S2 eller S18. Tennladning (overdrager) oppgis til 300–400 g PETN og detonatoren skal inneholde 1 g kvikksølvfulminat og 0,5 g trinitrofenylmetylnitramin (tetryl). I tillegg har ytterligere dokumentasjon vist at detonatorene antakelig inneholder en friksjonsfølsom sats som er en blanding av svartkrutt og *Zündsatz 88*, se kapittel 5.



Figur 3.4: Torpedostridshoder, eksempler på tilstand. Stavanger 2014, Danmark 1995 [21].

4 Detonasjon av torpedoer under overdekning

4.1 Generelt

Et sentralt spørsmål er hva som skjer dersom torpedoer en gang i fremtiden skulle detonere etter at vraket er tildekket.

Torpedoer kan som nevnt finnes i to torpedorør akterut, fire torpedorør i baugen og eventuelt i torpedorommet innenfor trykkskroget. Stridshodene på torpedoene i rør ligger utenfor trykkskroget, men er i utgangspunktet godt beskyttet av selve rørene.

Baugpartiets fire torpedorør sitter forholdsvis tett, og det har ikke vært mulig å utelukke at omsetning av én torpedo kan utløse de tre andre. Disse befinner seg også nærmere opprinnelig havbunn (og dermed kvikksølv) enn torpedoene i hekken. Omsetning av alle fire torpedoer i forskipets torpedorør betraktes derfor som *worst case* i dette notatet.

Fire torpedoer hver med 280 kg sprengstoff tilsvarer 1300 kg TNT, dersom man benytter en TNT-ekvivalent² på 1,15.

4.2 Detonasjonspunkt og overdekning

Hensikten med eventuell tildekking av vraket er både å stanse spredning av kvikksølv fra sedimenter og gjenværende flasker og å beskytte vrak og ammunisjon mot fysisk påvirkning fra for eksempel trål og ankere. Det er ikke besluttet hvor mange meter overdekningen i så fall skal være. Et minimum bør antakelig være å dekke fartøyet med noe sikkerhetsmargin, som vi her setter til 1 m. Alternativt kan man bygge opp en tykkere overdekning, for eksempel 3–7 m

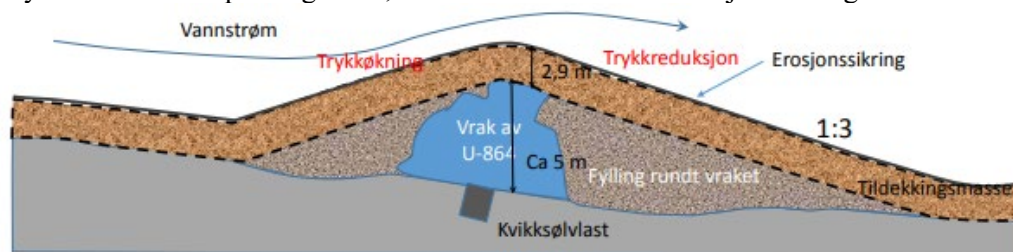
² Blandingen Minol II, som har et slektskap med hovedladningene i torpedoene, oppgis i standardtabeller å ha en TNT-ekvivalent på 1,20 for trykk og 1,11 for impuls.

ekstra overhøyde. Det kan antas at alle rester av kvikksølv (inkludert gjenværende beholdere i kjølkasser) befinner seg nær opprinnelig havbunnsnivå.

Avstanden fra havbunnen til senter av torpedobatteriet er om lag 3 m. For tildekking til toppen av forskipet anslår vi fra bilder og tegninger (ikke gjengitt her, men se figur 2.1) at det kreves minimum 7 m masse. Vi har gjennomført simuleringer av en ladning på 1300 kg TNT-ekvivalent som følger:

- (a) Ladningssenter 3 m over bunnen, total påfylling 8 m (vrak + 1 m)
- (b) Ladningssenter 3 m over bunnen, total påfylling 11 m (vrak + 4 m)
- (c) Ladningssenter 3 m over bunnen, total påfylling 15 m (vrak + 8 m)

Disse tre tilfellene brukes videre i kapitlene 4.3 og 4.5, se også figur 4.4. Tilfelle (a) tilsvarer omtrent Kystverkets eksempel i figur 4.1, dersom man inkluderer erosjonssikringen.



Figur 4.1: Eksempel på mulig overdekning (Kystverket / NGI 20130288-01-TN).

4.3 Noen betraktninger om detonasjon i luft og vann

Dersom en nedgravd ladning detonerer på landjorden, vil det normalt dannes et krater, og utkast vil slynges ut over store avstander. Mengden utkast avtar ved gradvis større detonasjonsdybde, og til slutt vil effekten utebli. Da dannes det ikke et synlig krater i det hele tatt, selv om en sjokkbølge vil forplante seg gjennom grunnen. Det samme kan man oppnå ved å benytte tunge skytematter.

Dersom vi ser på en nedgravd ladning på 1300 kg TNT, som tilsvarer de fire torpedoene, viser standard håndbokformler [8] at grensen for utkast går ved en detonasjonsdybde (eller overdekning) på 8,9 m for jordtypen «wet mixed soil».

Tabell 4.1: Kraterdimensjoner beregnet som «wet mixed soil» med FFIs beregningsprogram [8] for ulike detonasjonsdybder.

Detonasjon [m]	Kraterdybde [m]	Diameter [m]	Utkast [m]
5	8,8	21,8	366
8	9,1	22,6	383
12	0	0	0

For detonasjonsdybder på 5 m, 8 m og 12 m fra overflaten, som tilsvarer de tre tilfellene i avsnitt 4.2, får man verdiene i Tabell 4.1.

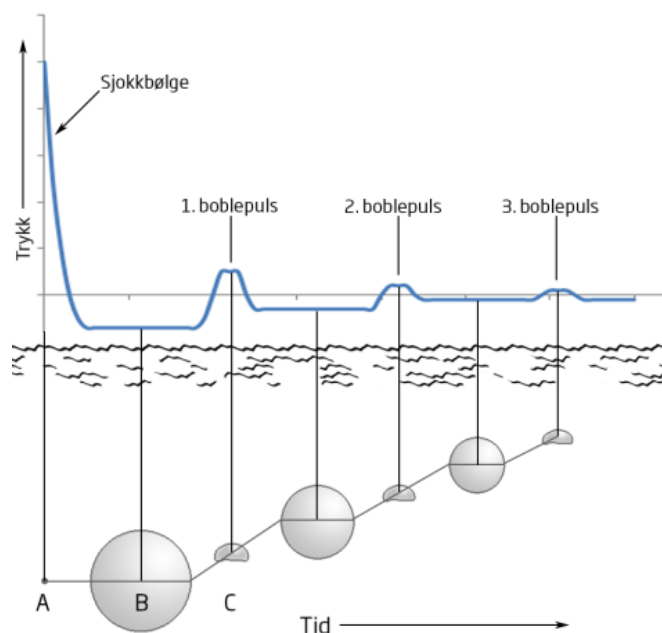
For detonasjonsdybder på 5 m, 8 m og 12 m fra overflaten, som tilsvarer de tre tilfellene i avsnitt 4.2, får man verdiene i Tabell 4.1.

Ved detonasjon dypt under vann danner detonasjonsgassene en ekspanderende gassboble, mens en sjokkbølge forplanter seg utover i vannmassene. De ulike fasene er illustrert i figur 4.2.

Ekspansjonen bremses av det hydrostatiske trykket. Når trykket i boblen blir lavere enn trykket i de omkringliggende vannmassene, presses boblen sammen igjen; kompresjonen øker deretter bobletrykket slik at boblen på nytt ekspanderer. Denne trykkdrevne vekselvirkningen gjør at boblen pulserer, samtidig som den stiger på grunn av oppdrift. For en ladning på 1300 kg på 150 m dyp er største boblediameter beregnet til ca. 14 m, med en pulseringsfrekvens på om lag 3 Hz [8].

Fordi oppdrift og trykkgradienter gjør kollapsen ujevn, vil boblen typisk kollapse asymmetrisk. Dette kan føre til at det dannes en vannjett gjennom boblen, slik at boblen deformeres og etter hvert antar en torusformet geometri.

Detonasjoner nær overflaten gir en vannsøyle som kastes opp i luften. I sakte film vil man først se krusninger / skum som er resultat av sjokkbølgens refleksjon fra overflaten, deretter en vannsprut når boblen bryter overflaten, og til sist en jett-effekt når boblen kollapse.

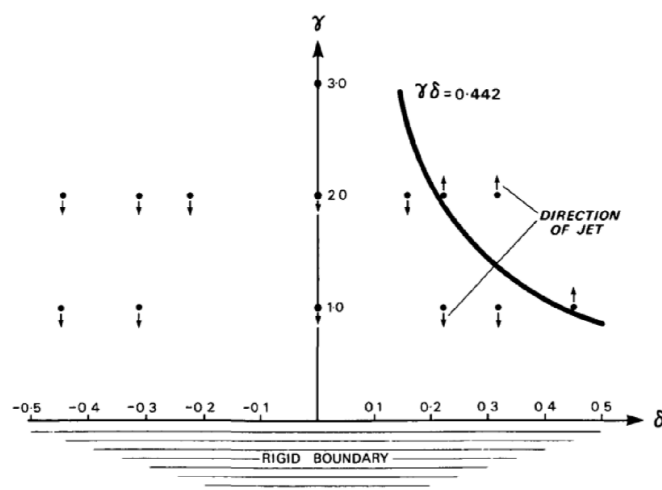


Figur 4.2: Skjematisk trykk-tid-forløp for en undervannseksplasjon. Den første, bratte trykktoppen skyldes sjokkbølgen fra detonasjonen, etterfulgt av dempede boblepulser som oppstår når eksplosjonsboblen ekspanderer og kollapse gjentatte ganger. Boblepulsene avtar i styrke over tid fordi energi tapes til vannbevegelse, stråling av trykkbølger og dissipasjon. Nederst vises den tilsvarende boblebevegelsen gjennom ekspansjons- og kollapsfasene. Fra Håndbok i våpenvirkninger [9].

For U-864 er problemstillingen sammensatt, ettersom sprengstoffet ligger delvis begravd i sand og sedimenter på havbunnen, og geometrien knyttet til torpedoer, vrakstruktur og omkringliggende bunnforhold er kompleks. For å håndtere dette gjøres det forenklinger og konservative antakelser, slik at beregningene så langt som mulig gir et øvre estimat for relevante belastninger og konsekvenser.

4.4 Bevegelsesmekanismer for detonasjonsboblen

Kjent teori for undervannsdetonasjoner viser at boblen tiltrekkes mot harde overflater (for eksempel fjellet nedenfor sjøbunnen) via den såkalte Bjerknes-kraften. Denne kraften virker i konkurranse med oppdriften, og sjøbunntykkelsen blir derfor en sentral parameter i slike analyser. I dette tilfellet styres bobledynamikken altså av en nedadrettet Bjerknes-kraft og en oppadrettet oppdriftskraft. For små avstander til den rigide flaten vil Bjerknes-kraften dominere, slik at boblen beveger seg nedover mot den harde flaten under den første kollapsfasen. For store avstander til den rigide flaten vil oppdriftskraften dominere, slik at boblen beveger seg oppover gjennom hele forløpet.



Figur 4.3: Sammenheng mellom stand-off-parameteren γ (y-akse) og oppdriftsparameteren δ (x-akse). Den kritiske linjen $\gamma\delta = 0,442$ skiller regimet der boblen trekkes ned mot den rigide flaten ($\gamma\delta < 0,442$) fra regimet der boblen stiger ($\gamma\delta > 0,442$). Pilene indikerer boblens bevegelsesretning. Figur hentet fra Blake [10].

For å kunne si noe universelt om bobleoppførselen uten å støtte seg på numeriske simuleringer, betraktes først det idealiserte tilfellet der alle lagene (sedimenter, overdekning og sjøvann) oppfører seg som vann. Dette gir en velkjent analytisk sammenheng som isolerer samspillet mellom oppdrift og nærhet til en rigid flate, uten effekter fra lagdeling og materialkontraster. I dette tilfellet vil en oscillerende boble med maksimal radius $R_m (= 6,8 \text{ m})$ og periode $T (= 0,33 \text{ s})$ tiltrekkes mot fjellet når produktet av de dimensjonsløse parameterne tilfredsstiller betingelsen $\gamma\delta \leq 0.442$. Her er $\gamma = \xi/R_m$ stand-off-parameteren, som beskriver forholdet mellom avstanden til den rigide flaten (ξ) og maksimal bobleradius, mens $\delta = \sqrt{R_m/Z}$ er oppdriftsparameteren, der Z er vanddybden.

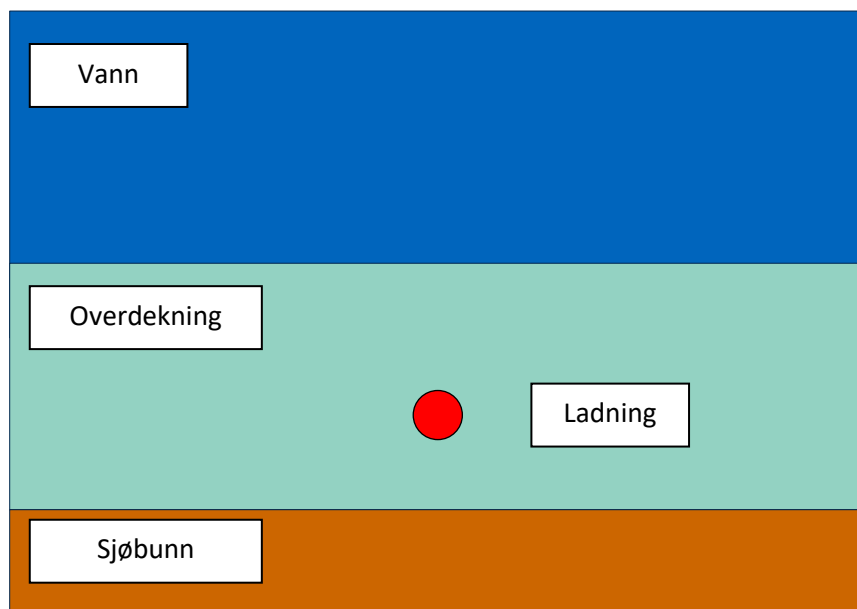
Betingelsen innebærer at dersom boblen enten ligger nær den rigide flaten (liten γ) eller oppdriften er relativt svak (liten δ , altså stor vanddybde), vil Bjerknes-kraften dominere og trekke boblen nedover mot fjellet. Dersom produktet $\gamma\delta$ overstiger grenseverdien, vil oppdriften dominere, og boblen beveger seg bort fra flaten. Dette er oppsummert i figur 4.3. Det er viktig å merke seg at denne beskrivelsen primært gjelder boblens første respons og kollapsfase; videre utvikling etter gjentatte pulseringer innebærer energitap og mer komplekse dynamiske effekter som ikke beskrives av den idealiserte teorien.

4.5 Forenklet simuleringsoppsett

Hovedhensikten er å belyse i hvilken grad kvikksølv i eller på havbunnen under overdekningen kan løftes opp i vannsøylen ved en detonasjon. Følgende forenklinger er innført:

- Fire torpedoer i torpedorør detonerer nøyaktig samtidig. Disse representeres av én ladning som tilsvarer 1300 kg TNT.
- Overdekningen omslutter ladningen. Denne situasjonen gjenspeiler en situasjon i fremtiden hvor hele vraket er korrodert bort.
- Alle materialene blir antatt å oppføre seg som væsker, men med realistisk tetthet og bulkmodul («hardhet ved kompresjon»). Dette gir større bevegelser og «omrøring» enn hva som er realistisk.
- Fjell nedenfor sjøbunnen representeres av en uendelig hard (perfekt reflekterende) overflate.

Simuleringene forutsetter «flatt terreng» og stillestående vann (altså uten havstrømmer). Oppsettet er illustrert i figur 4.4.



Figur 4.4: Avstand fra sjøbunn til senter av ladning er 3 m, avstand fra sjøbunn til topp av overdekning er henholdsvis 8, 11 og 15 m. (Illustrasjon, ikke i nøyaktig skala).

4.6 Simuleringer med Impetus

Impetus Afea (heretter omtalt som Impetus) er en kommersiell programvare som er utviklet for å beregne et stort spenn av hurtige dynamiske hendelser [11]. Ved FFI benyttes Impetus som hovedverktøy for beregning av våpenvirkninger, og det er spesielt godt egnet til å beregne vekselvirkning mellom et objekt og en belastning i form av en sjokkbølge eller et prosjektil. FFI samarbeider med leverandøren om videreutvikling. Siden 2022 har det blitt gjort et omfattende arbeid med å simulere detonasjoner under vann.

I prinsippet hadde det vært ønskelig å benytte en spesiell partikkelmodell for sand som finnes i Impetus, sammen med en annen modell for vann og en tredje for sprengstoff og eventuelt også en representasjon av ubåten. Av tekniske årsaker lot ikke disse ulike modellene seg kombinere, og en videreutvikling var ikke mulig innenfor oppdragets rammer. Det ble derfor besluttet å innføre de forenklingene som er beskrevet i avsnitt 4.5.

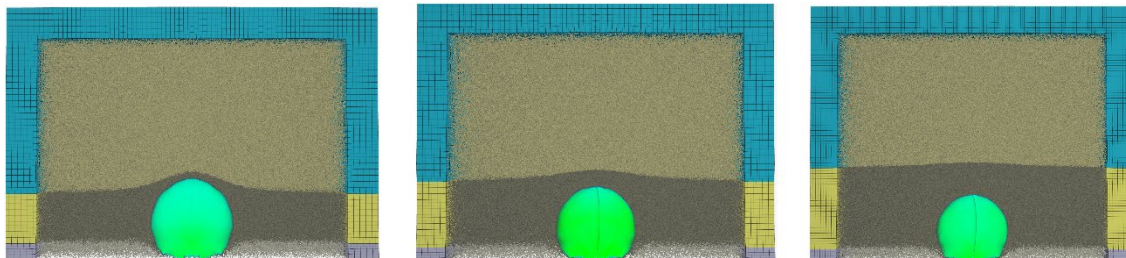
I områder nær ladningen er det benyttet en såkalt SPH-modell (Smoothed Particle Hydrodynamics), der partikler (noder) kan bevege seg fritt i forhold til hverandre uten et fast mesh. Feltstørrelser som tetthet, trykk og hastighet beregnes ved å interpolere bidrag fra nabopartikler ved hjelp av en kernel-funksjon, slik at hver partikkel påvirkes av partikler innenfor et gitt påvirkningsområde. Lenger unna er dette koblet med et ordinært *Lagrange*-mesh for å øke hastigheten på beregningene. Ekspansjon av detonasjonsgasser skjer i et stasjonært *Euler*-mesh som vekselvirker med tilgrensende SPH-partikler.

Vi har beregnet ulike tilfeller med forskjellig tykkelse på overdekningen og avstanden til fast overflate (fjell). Vi er ute etter å se om partikler fra sjøbunnen, som kan bestå av forurensede sedimenter, vil bli transportert gjennom overdekningen og opp i vannsøylen. Resultatene kan oppsummeres som følger:

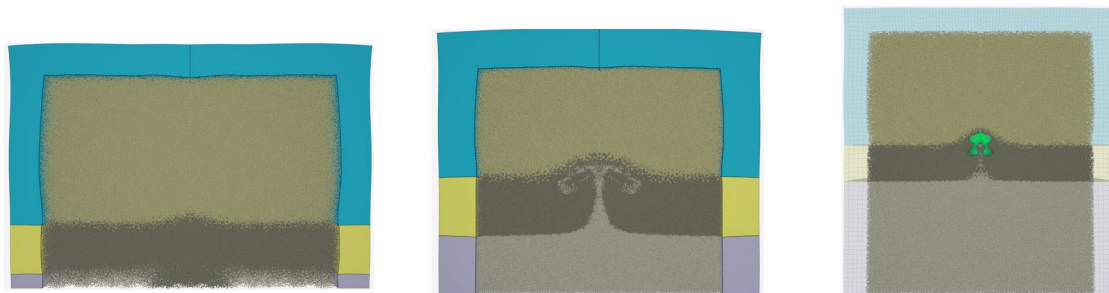
- Når eksplosivet detonerer, dannes det en boble med diameter på omtrent 13 m, som illustrert i figur 4.5.
- Boblen kollapser asymmetrisk og danner en jett. Den komplekse strømmingen rundt boblen kan potensielt indusere en partikkelstrøm hvor kvikksølvpartikler blir transportert gjennom overdekningen, som illustrert i figur 4.6.
- Det er avstanden fra ladning til fast bunn (fjell) som i størst grad påvirker partikkelstrømmen, som diskutert i avsnitt 4.4.
- Liten avstand til fast fjell (avstand fra sjøbunn til fast fjell på 2,5 m) gjør at boblen kolliderer med fjellet og bryter opp. Det oppstår ingen partikkelstrøm mellom lagene.
- Ved middels avstand til fjell (avstand fra sjøbunn til fast fjell 8 m) oppstår den sterkeste effekten. Ved 8 m overdekning over sjøbunnen induseres en liten partikkeltransport opp i vannsøylen. Effekten er lokal, og dekker en sirkel med diameter på ca. 10 m på havbunnen.
- Større dybde til fjell reduserer effekten.

Se vedlegg 1 for detaljert oversikt over simuleringene som er utført. Merk at alle simuleringene overdriver effektene, siden overdekning og sedimentlag (sjøbunn) kan omrøres uten den

motstanden som vil være realistisk. Resultatene illustrerer at enhver effekt fra en stor detonasjon vil gi lokale effekter når det gjelder massetransport. Sjøkkbølgen fra en detonasjon har naturligvis lang rekkevidde, men transporterer ikke materiale.



Figur 4.5: Maksimal boblediameter ble estimert til omtrent 13 m for tilfellene med 8 m, 11 m og 15 m overdekning, alle med en sjøbunntykkelse på 2,5 m (ikke samme skala).



Figur 4.6: Når sjøbunntykkelsen økes (her: 2,5 m, 8 m, og 25 m, alle ved 8 m overdekning), kan det oppstå en partikkelstrøm mellom lagene. Effekten er størst for en 8 m tykk sjøbunn, hvor boblen først tiltrekkes mot fjellet før den senere trekkes opp av oppdriftskraften.

4.7 Aksesymmetriske simuleringer med intern Euler-kode

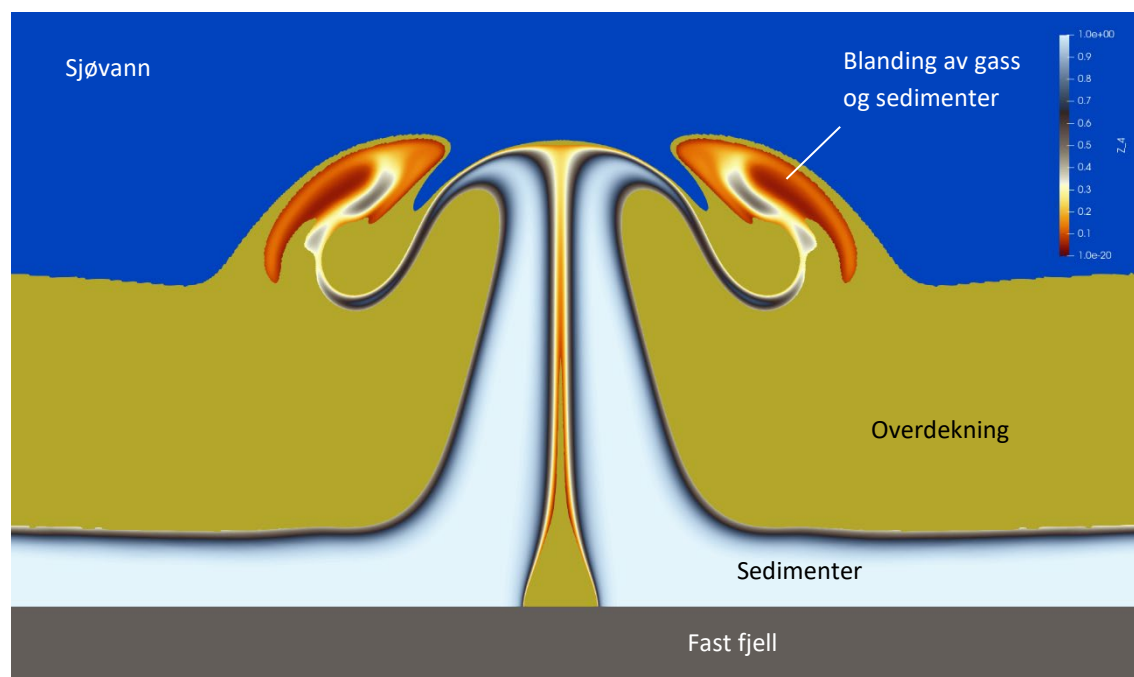
I tillegg til å benytte den kommersielle koden Impetus er det gjennomført simuleringer med en utvidet versjon av CFD-koden SU2, hvor utvidelsen er utviklet ved FFI.

I simuleringene antas aksesymmetrisk geometri, slik at beregningene i praksis blir todimensjonale. Dette gjør det mulig å studere idealiserte, koherente strømningsstrukturer, som virvler og jettdannelse, med høyere effektiv oppløsning enn i en tilsvarende 3D-beregning.

Hensikten var å vurdere Impetus-simuleringene for tilfellet med minst avstand til bunnen, der boble–bunn-interaksjonen er særlig krevende å beskrive. Aksesymmetrien gir imidlertid også en idealisering: tredimensjonale hydrodynamiske instabiliteter, som i praksis vil bidra til å bryte opp gassboblen, er ikke inkludert. Boblen kan i 2D derfor opprettholde en mer koherent storskala bevegelse enn ved en faktisk detonasjon. Resultatene fra Impetus- og SU2-beregningene kan dermed tolkes som to grensetilfeller, der boblen kolliderer henholdsvis for raskt og for langsomt.

Begge metodene antar dessuten at alle materialer oppfører seg som fluider. Dette vil i utgangspunktet gi større bevegelser enn mer realistiske materialmodeller, men det er uklart om denne materialdempingen er større enn tapet av oppdrift som kan følge av en underoppløst simulering. Den effektive massetransporten antas derfor å ligge et sted mellom det som skjer i tilfellet hvor boblen brytes helt opp og det som oppnås i 2D-simuleringen.

SU2-utvidelsen benytter en ren Euler-metode og benyttes som regel for å beskrive sjokkutbredelse med høy presisjon og romlig oppløsning. Koden løser en femligningsmodell for fluidbevegelse, hvor det antas likevekt for trykk og likevekt for hastighet mellom de ulike materialene i områder hvor fluidene blandes. En beskrivelse av ligningene finnes i Allaire et al. [12]. To beregninger med romlig oppløsning på henholdsvis 0,5 cm og 1,0 cm rundt eksplosivet ble gjennomført. Ingen vesentlig effekt på transporten av sedimenter som funksjon av oppløsning ble funnet, og det antas derfor at oppløsningen på 1,0 cm er tilstrekkelig god for dette formålet.



Figur 4.7: Sediment-jett rett før den trenger gjennom overdekningen (gulgrønt) og opp i vannsøylen (blått). Området som domineres av rødt er en blanding av sedimenter og detonasjonsgasser, hvor konsentrasjon av sedimenter er angitt av fargeskalaen. Rødt betyr høy konsentrasjon av detonasjonsgasser.

Som for Impetus ble 1300 kg TNT detonert 3 m over opprinnelig havbunn. Overdekningen over havbunnen er i denne simuleringen 8 m. Alle materialene ble fortsatt antatt å oppføre seg som ideelle fluider, med ulik tetthet og bulkmodul som gir realistiske lydhastigheter og treghetseffekter. Ingen dissipasjonsmekanismer eller materialstivheter er tatt med i beregningen, og det antas derfor at bevegelsen som settes opp i denne simuleringen, er vesentlig større enn

det som kan oppnås med en mer realistisk konfigurasjon. Sedimentlaget på bunnen er antatt å ha en tykkelse på 2,5 m, slik at avstanden fra fjell til vann er 10,5 m.

Som et mål på spredning av kvikksølv bruker vi bevegelsen av sedimentlaget. Dette er nok en gang konservativt i og med at kvikksølv er vesentlig tyngre enn sedimentene, og en viss tyngdeeffekt på kvikksølvet er dermed neglisjert.

Basert på beregningene kan følgende slutninger treffes:

- (a) Sedimentarealet på havbunnen som settes i bevegelse av eksplosjonen, her definert som masser som beveger seg mer enn 2 m vertikalt i forhold til opprinnelig posisjon, er begrenset til en sirkel med radius på 6 m sentrert under eksplosivet.
- (b) En torusformet gassboble transporteres gjennom overdekningen. Denne drar hovedsakelig med seg sand fra overdekningen, men også noe av de underliggende sedimentene. Når boblen bryter gjennom overdekningen, har den en tetthet på $\sim 1100 \text{ kg/m}^3$. Dette betyr at den som helhet ikke har positiv oppdrift i vannet og mesteparten av den transporterte sanden og sedimentene må slippe detonasjonsgassene for at gassen skal kunne bli transportert videre opp gjennom vannsøylen. I tillegg dannes det en jett av sedimenter som når en høyde på ca. 15 m, altså 7 m over overdekningen. Denne har tetthet på over 1200 kg/m^3 og inneholder svært lite detonasjonsgasser. Den har derfor ingen kilder til oppdrift som kan drive transporten videre vertikalt, og laget vil derfor etter hvert legge seg på toppen av overdekningen, innenfor en sirkel med radius 10 m. Bevegelsen er illustrert i figur 4.7 på et tidspunkt rett før sedimentene bryter gjennom sandlaget.
- (c) Konsentrasjonen av kvikksølv i sedimentene er, som rapportert av Kystverket [13], på minst $1,6 \text{ mg/kg}$ i området rundt vraket (faktisk konsentrasjon er ukjent for FFI, den kan være høyere). Hvis man bruker denne verdien som utgangspunkt og anvender konsentrasjonen av sediment i boblen som inkluderer detonasjonsgasser, og som dermed har mulighet for å drive videre oppover i vannsøylen, kan kvikksølvinnhold i masser som kan transporteres oppover i vannsøylen estimeres til $\sim 0.24 \text{ mg/kg}$. Et konservativt estimat på total masse som kan transporteres med denne boblen er $23\,000 \text{ kg}$. Dette gir i så fall en total masse av kvikksølv på ca. 5 g. Dette er altså mengden som i teorien kan fraktes oppover i vannsøylen, basert på en ren oppdriftsbetraktning.

Kvikksølvdråper vil, grunnet sin høye tetthet, falle mot bunnen, men for eventuelt kvikksølv i boblen er det uklart fra hvilken høyde. Denne høyden, dråpestørrelsen og strømforholdene påvirker horisontal spredning av denne avgrensede mengden.

Det er her ikke er tatt høyde for intakte flasker eller «hot spots» med kvikksølv. Etter hva vi forstår, kan en slik flaske inneholde 36 kg kvikksølv. En intakt flaske vil ikke kunne transporteres langt ved en eksplosjon, men dersom det er en ansamling kvikksølv (eller en flaske som knuses) i nærheten av detonasjonspunktet, kan det ikke utelukkes at deler av dette dras med opp i jetten eller i gassboblen.

Grunnet den høye tettheten til kvikksølv er det likevel kun små dråper som kan transporteres over betydelige distanser, og det er ikke mulig å få fraktet med seg innholdet fra en hel flaske til høyder større enn det som kan gjøres med sediment-jetten. Slikt kvikksølv kan likevel

transporteres videre med eventuell strøm før det legger seg. Dette er ikke kvantifisert, men beregninger viser at dråper må ha en diameter betydelig under 1 mm for å drifte vesentlig utenfor det opprinnelige «nedslagsfeltet» med radius 10 m. Spredning fra slik transport vil være flere størrelsesordener mindre enn ved torpederingen i 1945.

En overdekning som er tykkere enn sediment-jettens høyde (15 m) beregnet her vil effektivt sett bety at transporten av kvikksølv blir veldig liten. Denne konklusjonen er et resultat av at dynamikken til jetten er satt opp av boblekollapsen. Boblekollapsen skjer under toppen av den simulerte overdekningen (8 m), og den er derfor forholdsvis upåvirket av lagene over. Større tykkelse vil kunne minke høyden på sediment-jetten, men dette er ikke beregnet.

5 Sprengstoff i torpedoenes stridshoder

5.1 Innledning

Sprengstoff er kjemiske forbindelser eller stoffblandinger som kan detonere under utvikling av varme reaksjonsprodukter, hovedsakelig gasser. Ved en detonasjon foregår reaksjonen ved overlydshastighet, slik at den brer seg gjennom materialet som en sjokkbølge. De kjemiske reaksjonene som driver frem detonasjonen, er ikke avhengig av luftens oksygen.

Den prosessen som resulterer i detonasjon, starter ved tilstrekkelig lokal oppvarming i såkalte hot-spots. Svært forenklet kan man si at dersom lokal oppvarming skjer hurtigere enn varmen kan transporteres bort, vil den selvgående reaksjonen starte. Initiering som gir slik lokal oppvarming kan skje ved støt, sjokk, friksjon eller varme fra gnist, flamme eller glødetråd.

I sprengstoffteknologien skiller man gjerne mellom såkalte primær- og sekundærsprengstoff. Førstnevnte type sprengstoff er utpreget følsomme for initiering. To kjente sprengstoff av denne typen er kvikksølvfulminat og blyazid. De brukes i ulike initieringsmidler for å omsette andre typer sprengstoff, og primærsprengstoff kalles gjerne også for initialsprengstoff.

Sekundærsprengstoff er betydelig mindre følsomme enn primærsprengstoff og er derfor langt tryggere under håndtering og lagring. De krever som regel alltid initiering ved hjelp av ulike initieringsmidler som sprenghette, detonerende lunte eller brannrør for å starte en detonasjon. Militære sekundærsprengstoff er gjerne også kjennetegnet av høyere grad av lagringsstabilitet.

Det brukes en rekke ulike tester for å karakterisere følsomheten av sprengstoff. Et fellestrekk ved disse testene er at de gjennomgående er mer egnet til å sammenlikne ulike sprengstoff med hverandre – altså relative sammenligninger – enn til å trekke slutninger om virkninger og konsekvenser av belastninger som kan oppstå ved praktisk håndtering av ammunisjon.

For å få et bedre bilde av hvordan ulike typer situasjoner kan påvirke ammunisjon i faktisk bruk, må derfor komponenter i moderne våpensystemer alltid gjennomgå ulike kvalifiseringstester av mer praktisk karakter – eksempelvis falltester, beskytningstester og oppvarmingstester. Data for slik type testing er imidlertid vanskelig eller umulig å oppdrive for historisk ammunisjon.

For å sørge for en riktig omsetning av militær ammunisjon vil man alltid ha en såkalt tennkjede, en serie av komponenter og ulike typer sprengstoff, noen ganger også pyrotekniske blandinger, som til sammen sikrer at ammunisjonens effekt kun skal tre i kraft på ønsket sted og tid. I en slik tennkjede vil mindre mengder med primærsprengstoff igjen omsette større mengder sekundærsprengstoff til detonasjon, som regel med ett eller flere mellomliggende trinn.

I moderne våpen er det vanligvis et krav at det skal være et fysisk skille mellom de delene av tennkjeden som inneholder primærsprengstoff og resten av ladningen, inntil våpenet blir armert ved avfyring eller bombeslipp. På denne måten vil en utilsiktet omsetning av den mest følsomme delen av tennkjeden ikke føre til en større ulykke. Dette prinsippet var ofte i bruk under andre verdenskrig, men det var da ikke et generelt krav. Av de to tennapparatene som kan være aktuelle i torpedoene på U-864, er det fysisk skille i Pi 2, men ikke i Pi 4c. Tennapparat Pi 4c omtales nærmere i kapittel 6.

Under lagring over lengre tid kan egenskapene til de energetiske materialene som inngår i en tennkjede, endres – de er altså kjemisk ustabile i større eller mindre grad. Generelt er det slik at militære sprengstoffer er laget for å beholde sin stabilitet over lang tid, også under ikke-ideelle lagringsforhold med tanke på temperatur og fuktighet. Det er gjerne også slik at de kjemiske komponentene i hovedladningen, som utgjør mesteparten av massen i våpensystemet, er mer stabile over tid enn enkelte av primærsprengstoffene som inngår tidligere i tennkjeden.

Ved lagring over tid kan endringer i de energetiske materialene i våpensystemene føre til at de enten blir mer eller mindre følsomme. Enkelte typer kan delvis eller fullstendig miste sin evne til å omsettes, mens andre kan bli mer følsomme. Noen ganger kan det i tillegg dannes ekstra følsomme forbindelser ved at de energetiske materialene reagerer kjemisk med andre stoffer som er til stede, slik som tilgjengelige metalloverflater. Dette kan gjøre håndtering mer risikabelt, inkludert bruk av verktøy under demontering.

I enkelte sjeldne tilfeller kan kjemisk dekomponering av energetiske materialer i våpensystemer føre til varmeutvikling som kan lede frem til brann eller detonasjon. For energetiske materialer til militært bruk er dette imidlertid uvanlig. Det er fremfor alt nitrocellulose og nitroglyserin i drivmidler (krutt) til ammunisjon og raketter som har denne egenskapen, ikke sprengstoffer brukt i hovedladninger i undervannsvåpen som torpedoer (se egen faktaboks).

Som nevnt i kapittel 3 oppgir FMA at hovedladningen i torpedostridshodene består av om lag 280 kg av sprengstofftype S2 eller S18. Tennladningene (overdragerne) oppgis til 300–400 g PETN, og detonatorene skal inneholde 1 g kvikksølvfulminat og 0,5 g trinitrofenylmetyl-nitramin (tetryl). I tillegg har det vist seg at detonatorene antakelig inneholder en friksjonsfølsom sats som er en blanding av svartkrutt og *Zündsatz 88*. Nedenfor vurderes disse komposisjonene i mer detalj. Vurderingene bygger i hovedsak på standardverk innenfor eksplosivteknologien [14–18].

5.2 Hovedladningenes kjemiske sammensetning

Gjennom studier av historisk kildemateriale har FMA sannsynliggjort at hovedladningene i de aktuelle torpedoene i U-864 består av én av de to sprengstofftypene referert til som S2 eller S18.

Her viser begge kortnumre til en serie av tyskutviklede undervannssprengstoff brukt under andre verdenskrig. Disse to sprengstoffene er til dels meget forskjellige når det gjelder egenskaper og sammensetning, noe som er av betydning for å vurdere deres stabilitet under vann over tid.

Undervannssprengstoffet S2 ble utviklet i forbindelse med den tyske opprustningen på andre halvdel av 1930-tallet og består av 67 % trinitrotoluen (TNT), 8 % heksanitrodifenylamin (HND) og 25 % aluminium. TNT og HND tilhører begge en klasse av sprengstoffer kalt nitroaromater og har sammenlignbare detonasjonsytelser, men produksjonen av dem har ulike råvarebaser, noe som kan være en fordel i krigstider der det gjerne er stor mangel på TNT.

Tilsetningen av finfordelt aluminium til sprengstoffer er vanlig fordi dette er noe som øker detonasjonsvarmen. Dette er spesielt utbredt i sprengstoffer for undervannsvåpen som torpedoer fordi tilsetningen gir økt virkning i undervannsekspløsjoner – gjennom det som omtales som såkalt «bobleeffekt», en virkning knyttet til detonasjonsproduktenes evne til å flytte vann.

I løpet av andre verdenskrig ble mangel på TNT gradvis en stadig større utfordring for tyskerne, noe som gjorde at de utviklet såkalte «substituttsprengstoff» (*Ersatzsprengstoffe*). I denne typen sprengstoff erstattet man i størst mulig grad TNT med ulike kombinasjoner av kjemiske stoffer som hadde større eller mindre grad av eksplosivvirkning. Undervannssprengstoffet S18 var et slikt substituttsprengstoff, og det var en blanding av to andre sprengstoffer, S16 og S17.

Av disse to komposisjonene var S16 et substituttsprengstoff som bestod av 32 % ammonium-nitrat, 10 % etylendiamindinitrat, 40 % aluminium, 10 % RDX, 6 % natriumnitrat og 2 % kaliumnitrat. S17 var på sin side et mer regulert, høyverdig undervannssprengstoff som bestod av 50 % TNT, 10 % RDX og 40 % aluminium. S18 var en blanding av disse to, med 40 % S16 og 60 % S17. Dette var derfor en måte å økonomisere på sprengstoffbruken i undervannsvåpen.

Hovedladningene i stridshodene i torpedoene i U-864 består derfor *enten* av S2, som var et mer tradisjonelt og høyverdig undervannssprengstoff med tre komponenter, *eller* av S18, som var et betydelig mer komplisert (men rimeligere) substituttsprengstoff basert på til sammen syv kjemiske komponenter. Som det vil komme frem senere, er det viktige forskjeller mellom disse to sprengstofftypene med tanke på stabilitet over tid under vann.

5.3 Hovedladningenes fysiske egenskaper

Både S2 og S18 er sprengstoffkomposisjoner med betydelig heterogen karakter. Dette betyr at de består av distinkte faser som er adskilt fra hverandre, der fasene har til dels ulike fysiske og kjemiske egenskaper. Man kan generelt skille mellom to hovedfaser: en kontinuerlig eller ytre fase («matrise») og en indre fase som er utspedd (dispergert) i den ytre fasen.

Det er viktig å ha en forståelse av fasekarakteren til en heterogen sprengstoffblanding fordi dette sier noe om hvilke kjemiske komponenter som hovedsakelig står i direkte fysisk kontakt med de omkringliggende metallflatene. Det sier også noe om i hvilken grad kjemiske komponenter i de ulike fasene er tilgjengelig for inntrengning av eventuelt omkringliggende (sjø)vann.

TNT er et sprengstoff som er en sentral komponent i begge de aktuelle undervannsprengstoffene i torpedostridshodene i U-864, altså S2 og S18. I tillegg til lav pris og trygghet under bruk har TNT den egenskapen at det har et praktisk lavt smeltepunkt på rundt 80 °C.

Det lave smeltepunktet til TNT gjør at komposisjoner der det inngår i større mengder, gjerne er såkalt smeltestøpbar, som vil si at det enkelt kan smeltes ned og fylles inn i store stridshoder, slik som de som er relevante for torpedoer. TNT utgjør derfor vanligvis den kontinuerlige fasen, eller «matrisen», av de fleste sprengstoffkomposisjoner der det inngår – inkludert S2 og S18.

Foruten TNT inneholder S2 også HND og finfordelt aluminium. I motsetning til TNT er HND er fast stoff med et relativt høyt smeltepunkt (rundt 245 °C). For S2 foreligger derfor HND og aluminium som distinkte partikler utspedd i den kontinuerlige matrisen av TNT. På samme måte som rent TNT er S2 smeltestøpbar. Også i TNT-smelten vil HND og aluminium foreligge som faste partikler, men HND kan i noen grad da også være kjemisk løst i den flytende TNT-fasen.

S18 er også en heterogen, smeltestøpbar sprengstoffkomposisjon, men den er betydelig mer kompleks enn S2. I S18 vil S16-andelen ligge som større granuler utspedd (dispergert) i en kontinuerlig fase (matrise) av S17, for det er kun S17 som inneholder TNT. Granulene av S16 ble sannsynligvis laget på forhånd gjennom sammensmeltning av de kjemiske komponentene, for de består av salter – ammoniumnitrat, etylendiamindinitrat, natriumnitrat og kaliumnitrat – som sammen danner en lavtsmeltende (såkalt eutektisk) saltfase.

Fordi S16 i all vesentlighet består av salter og aluminium, mens S17 hovedsakelig består av organiske forbindelser, er disse to blandingene gjensidig uløselige i hverandre og gir S18 som et heterogent materiale av ulike faser. S18 var derfor en form «hybridsprengstoff» der et billig substituttsprengstoff (S16) var «bakt inn» i et mer regulært undervannsprengstoff (S17).

De fysikalske egenskapene til S2 og S18 er viktige for å forstå hovedladningenes stabilitet over tid under vann, for S18 inneholder i motsetning til S2 betydelige mengder med kjemiske stoffer med høy grad av vannløselighet. Mens TNT, HND, RDX og aluminium alle har liten grad av løselighet i vann, er de ovennevnte saltene i S16-andelen av S18 godt vannløselige stoffer.

Tilgang på vann kan derfor gjøre at en del av stoffene i S18 gradvis løses ut og etterlater hulrom i hovedladningene. Dette vil i noen grad motvirkes gjennom at den ytre, kontinuerlige fasen av TNT, som omslutter de vannløselige stoffene, forhindrer inntrengning av vann.

5.4 Hovedladningenes kjemiske egenskaper og stabilitet

Nitroaromatiske sprengstoffer som TNT og HND er generelt kjennetegnet av betydelig grad av kjemisk stabilitet. Denne egenskapen har vært med på å gjøre dem egnet for militære formål. De er gjerne også termisk stabile og holder seg typisk godt gjennom store temperatursvingninger.

Sprengstoffer tilhørende en klasse av eksplosiver kjent som nitratestere (salpetersyreestere) – der nitrocellulose og nitroglyserin (godt kjent fra ammunisjons- og rakettkrutt) kanskje er de mest kjente eksemplene – er ikke kjennetegnet av slik stabilitet. Nitratestere kan dekomponere over tid, i et akselererende tempo (autokatalyse), og er derfor avhengig av kjemiske stabilisatorer.

På grunn av stor grad av kjemisk stabilitet er det liten grunn til å anta at innholdet av TNT i S2 og S18 eller HND i S2 dekomponerer nevneverdig over tid, heller ikke nedsenket i sjøvann. Det samme gjelder innholdet av RDX i S18, for RDX er et såkalt nitramin som også er kjennetegnet av betydelig grad av kjemisk og termisk stabilitet. Som TNT og HND er RDX et fast stoff.

TNT som sprengstoff er heller ikke kjennetegnet av høy grad av kjemisk reaktivitet, og det tærer derfor ikke nevneverdig på metaller. HND har imidlertid noen grad av syreegenskaper og kan ved kontakt med enkelte metaller danne nye kjemiske forbindelser (HND-salter) som er mer følsomme for slag og friksjon enn rent HND. Dette motvirkes gjennom at HND ikke utgjør den kontinuerlige fasen av komposisjonen, som gir mindre direkte kontakt med metallet rundt. Tilstedeværelse av fuktighet vil generelt nedsette følsomheten av denne type HND-salter.

Selv om HND kan danne salter som er mer følsomme enn HND selv, er denne problematikken betraktelig mindre utpreget enn den som er gjeldende for trinitrofenol (pikrinsyre), som er et nitroaromatisk sprengstoff mye benyttet under første verdenskrig. I motsetning til HND er pikrinsyre en utpreget sterk syre som tærer sterkt på mange metaller og danner salter (pikrater).

De uorganiske saltene i S16-andelen av S18 er også stabile kjemiske forbindelser, men de er som sagt godt vannløselige stoffer, til dels også sterkt vanntiltrekkende. Dette gjør at man må regne med at S18 – over tid ved tilgang på vann – vil endre seg mye. Inntrengning av vann i disse saltene vil normalt sett gjøre dem betydelig mindre følsomme.

Et av saltene i S16-andelen av S18, ammoniumnitrat, vil ved kontakt med kobber kunne danne såkalt tetraamminkobber(II)nitrat, en sterkt blåfarget og krystallinsk kjemisk forbindelse som har eksplosive egenskaper. Fordi ammoniumnitraten i saltfasen i S16-andelen av S18 utgjør den indre fasen av komposisjonen og ikke står i direkte kontakt med omkringliggende metall, er det ikke forventet at dannelse av dette kompleks saltet utgjør noen større risiko.

Innhold av finfordelt aluminium er felles for både S2 og S18. Aluminium i slik finpartikulær form vil gjennom tilgang på vann gradvis reagere under utvikling av hydrogengass, samtidig som at aluminiumet blir deaktivert gjennom dannelse av aluminiumoksid. Over tid må man regne med at dette gjør sprengstoffet mindre følsomt og mindre energirikt. Det kan føre til lokal trykkoppbygning, men ikke av en slik karakter at det gir økt følsomhet eller fare for omsetning.

I sum er vurderingen at hovedladninger bestående av S18 i teorien vil utgjøre mindre fare enn hovedladninger med S2, både fordi S18 inneholder stoffer som vil bli helt eller delvis løst opp i sjøvann, og fordi S2 inneholder HND som kan danne HND-salter.

For S18 kan følsomheten endre seg hvis det er fuktig og deretter tas ut av vannet og las tørke, fordi de vannløselige stoffene da kan (om)krystallisere og danne nye («skarpe») krystallformer som kan gjøre sprengstoffene mer støt- og friksjonsfølsomme. For S2 vil tørking kunne gjøre eventuelt innhold av HND-salter mer farlig enn i fuktig tilstand.

5.5 Tennladningenes kjemiske sammensetning og stabilitet

Gjennom studier av historisk kildemateriale har FMA sannsynliggjort at tennladningene i stridshodene til de aktuelle torpedoene i U-864 består av pentaerytritoltetranitrat (PETN), i en mengde av en størrelsesorden på noen hundre gram (300–400 gram).

PETN tilhører klassen av sprengstoffer kalt nitratestere (se ovenfor), men i motsetning til nitratestere som nitroglyserin og nitrocellulose, som er oljeaktige væsker eller fibrøse og amorfe (ikke-krystallinske) faststoffer, er PETN et krystallinsk stoff med relativt høyt smeltepunkt. PETN er regnet som det mest stabile av sprengstoffene tilhørende denne klassen.

For bruk i tennsystemer i Tyskland under krigen ble PETN normalt tilsatt 8–10 % voksmateriale for å tillate pressing til større legemer og for å gi nedsatt følsomhet (flegmatisering). Det er derfor nesten sikkert at PETN i de aktuelle tennladningene i U-864 inneholder noen form for voks, mest sannsynlig montanvoks (en type voks utvunnet fra brunkull), som virker desensiterende.

Det er vanskelig å ta stilling til i hvilken grad PETN-baserte tennladninger vil bli mer følsomme over tid ved lagring under vann, men noen form for eskalerende dekomponering som resulterer i selvantennning og detonasjon vil være vanskelig å begrunne faglig. I motsetning til nitroglyserin og nitrocellulose i kruttprodukter krever PETN ikke bruk av kjemiske stabilisatorer og undergår ikke samme type akselererende (autokatalytiske) nedbrytning, på grunn av sin krystallinitet.

PETN vil ikke danne følsomme komponenter i kontakt med metaller, og som nevnt er det aktuelle PETN nesten helt sikkert blandet med voks (rundt 10 %), noe som vil virke både desensiterende og stabiliserende. Det vil også til en viss grad forhindre direkte kontakt mellom PETN og andre stoffer som er til stede.

5.6 Detonatorenes kjemiske sammensetning og stabilitet

Gjennom studier av historiske kildematerialer har FMA sannsynliggjort at detonatorene i de aktuelle torpedoene i U-864 består av kvikksølvfulminat og trinitrofenylmetylnitramin (tetryl). Antatt mengde av førstnevnte er ca. 1 gram, og mengden av sistnevnte ca. 0,5 gram.

Tetryl hører til nitroaromatene, slik som TNT og HND, og er på samme måte kjennetegnet av en ganske høy grad av kjemisk stabilitet. Selv om det generelt er lite som tilsier betydelig økt grad av sensitivitet over tid under vann for medlemmer av denne klassen av sprengstoffer, er tetryl ustabil under tilstedeværelse av vann fordi det da delvis reagerer (hydrolyserer) til pikrinsyre.

Som tidligere nevnt er pikrinsyre et stoff som kan reagere med metaller og danne følsomme salter (pikrater). I denne sammenhengen er dannelse av kobberpikrat gjennom reaksjon av pikrinsyren med kobber eller messing spesielt relevant. Kobberpikrat er forholdsvis kjemisk stabilt, og det har en slag- og friksjonsfølsomhet som er sammenlignbar med kvikksølvfulminat. Det kan derfor ikke utelukkes at alt innholdet i detonatorene må anses å ha følsomhet som kvikksølvfulminat.

Kvikksølvfulminat er spesielt i kontekst av torpedoene i U-864 fordi det er et primærsprengstoff (initialsprengstoff). Det er derfor den mest følsomme sprengstoffkomponenten involvert i hele våpensystemet. TNT, HND, tetryl og RDX er alle som nevnt sekundærsprengstoffer som normalt krever påføring av en impuls fra en detonator eller tennladning for omsetning til detonasjon.

Kvikksølvfulminat var det første primærsprengstoffet som ble tatt i praktisk bruk i sprenghetter (sivil bruk) og brannrør (militær bruk), med en historikk i denne sammenhengen som strekker seg tilbake til 1860-tallet. For bruk i tennsystemer tilsettes nesten alltid kaliumklorat for å øke eksplosivvirkningen av kvikksølvfulminat. Verken kvikksølvfulminat eller kaliumklorat er spesielt godt løselig i vann. Begge stoffer desensiteres gjennom å være fuktet med vann.

Kvikksølvfulminat vil gradvis, men kun meget sakte ved romtemperatur eller lavere, brytes ned i kontakt med vann. Det dannes da ikke-eksplosive kjemiske forbindelser som kvikksølvoksid og ammoniakk og karbondioksid. Behandling av kvikksølvfulminat med stort vannoverskudd under trykk har faktisk vært foreslått som metode for å destruere uønsket kvikksølvfulminat.

Det er ikke noe som tilsier at kvikksølvfulminat over tid under kontakt med vann får en økende grad av følsomhet, siden det gradvis vil brytes ned til ikke-eksplosive kjemiske forbindelser. Under fuktige forhold, spesielt under noe trykk, må man regne med at forbindelsen over tid vil bli uskadeliggjort, men det er vanskelig å gi noe tidsperspektiv for nedbrytningen.

Ved kontakt med kobber er det kjent at kvikksølvfulminat kan danne kobber(I)fulminat, som også er et følsomt primærsprengstoff. Slikt kobberfulminat er imidlertid mindre slagfølsomt enn kvikksølvfulminat, og det vil på samme måte som kvikksølvfulminat også brytes ned over tid, spesielt under fuktige forhold, og danne ikke-eksplosive kjemiske forbindelser.

5.7 Spesielt om tennerens slagfølsomme tennsats

Foruten de kjemiske komponentene som FMA har sannsynliggjort at utgjør del av tennkjeden i torpedoene i U-864, har det kommet frem at første del av tennkjeden sannsynligvis inneholder en friksjonsfølsom sats (se kapittel 6.2 for detaljert virkemåte). Denne satsen blir omsatt av spisser på et tennstempel og utgjør det aller første leddet i tennkjeden. FMA har fremskaffet beskrivelse av en tenner som antas å være representativ for de to tennene i Pi 4c.

Den friksjonsfølsomme tennsatsen består av 75 milligram svartkrutt blandet med 150 milligram *Zündsatz 88*, hvor sistnevnte er en blanding av 26 % kvikksølvfulminat, 37 % kaliumklorat, 30 % antimonulfid og 7 % glasspulver, med skjellakk som bindemiddel.³ Glasspulveret øker friksjonsfølsomheten. I bunnen av tennhetten befinner det seg et lag med rent svartkrutt.

Under bruk vil den friksjonsfølsomme satsen bli omsatt til forbrenning (deflagrasjon) av spissene på tennstempelet, og stikkflammen fra forbrenningen av denne og laget av svartkrutt under slår så igjennom bunnfolien i tennhetten og omsetter sprengkapselen nedenfor (som

³ Den prosentvise sammensetning av de fire hovedkomponentene i *Zündsatz 88* er heftet med noe grad av usikkerhet, men de mindre variasjonene som forekommer i det relevante kildematerialet påvirker ikke vurderingene.

inneholder kvikksølvfulminat og tetryl) til detonasjon. Sprengkapselen omsetter igjen tennladningen av PETN som deretter setter av hovedladningen (S2 eller S18).

Tilstedeværelsen av tennheten med den friksjonsfølsomme satsen er av stor betydning fordi en slik friksjonssats må betraktes som fullstendig deaktivert hvis den er gjennomtrukket med vann (friksjonen i satsen blir sterkt nedsatt av fukt). Dessuten utgjør svartkrutt størstedelen av satsen, og denne typen krutt kan bli permanent deaktivert av vann fordi mesteparten av kruttet utgjøres av en godt vannløselig kjemisk forbindelse (kaliumnitrat).

Den friksjonsfølsomme satsen inneholder skjellakk som bindemiddel, en type harpiks utvunnet fra lakkskjoldlus. Denne typen bindemiddel vil ikke være tilstrekkelig til å beskytte satsen mot vann ved fri tilgang fordi laget av bindemiddel er tynt. Skjellakk brukes gjerne som bindemiddel for å gjøre pulverblandinger mindre støvete og mer håndterlige.

På samme måte som omtalt i Kapittel 5.6 over for stabiliteten av kvikksølvfulminat i detonatorene må også innholdet av kvikksølvfulminat i den friksjonsfølsomme tennsatsen forventes å dekomponere over tid til ikke-eksplosive kjemiske forbindelser.

5.8 Virkningen av høyt statisk trykk

Sprengstoff tåler generelt høye statiske trykk. Eksempelvis presses militære sprengstoffer regelmessig ved trykk av størrelsesorden tusen bar eller mer for å oppnå en tilfredsstillende massetetthet. Ulykker ved pressing av sprengstoff har forekommet, men vil typisk være knyttet til varme som følge av friksjon langs glide- eller endeflater.

Det kan i fremtiden oppstå glidning og friksjon mellom korroderte bøsninger og sprengstoffet i hovedladningene til torpedoene i U-864, men med lav glidehastighet og god kjøling fra det omkringliggende sjøvannet vil slike effekter ikke forventes å utgjøre noen fare.

Også kvikksølvfulminat, som er en utpreget følsom eksplosivkomponent, kan presses ved høye trykk, og dette har historisk også ofte vært gjort i produksjon av sprenghetter og brannrør. En spesiell effekt relevant for akkurat dette sprengstoffet er såkalt dødpressing, hvor følsomheten reduseres når presstrykket blir for høyt. Slik dødpressing er observert ved presstrykk i området 150–300 bar, altså en faktor 10 høyere enn vanntrykket ved U-864.

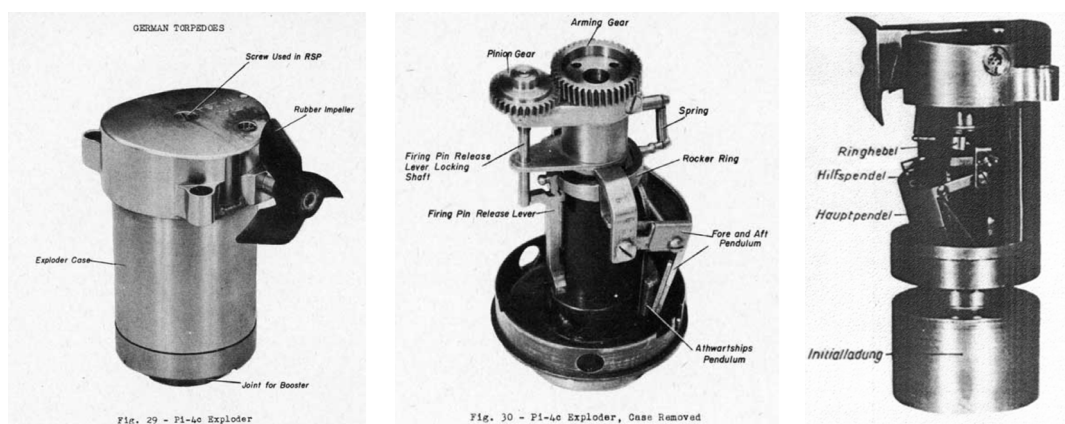
6 Tennapparatet Pi 4c

6.1 Generelt

Det er først når torpedorørene lades med torpedoer at tennapparatene monteres i torpedoene. På U-864 er det antatt at inntil to av torpedoene i fremre torpedorør er montert med tennapparat av typen Pi 4c. Tennapparatet er gjenget sammen med en seksjon som inneholder en slagfølsom tennsats, to små tennere og en overdrager. Primærexplosivene og overdrager er altså ikke en del av torpedostridshodet før tennapparatet er montert. Tennapparat Pi 4c mangler den ekstra sikkerhetsmekanismen som et fysisk skille mellom eksplosivene i tennkjeden utgjør. Dersom en tenner skulle bli utløst, uavhengig av årsak, vil hovedladningen detonere, dersom alle de ulike

eksplosivene fremdeles er virksomme. Basert på vurderingene i forrige kapittel, inkludert at tilgangen på vann er ukjent, må man inntil videre anta at alle eksplosivtypene fremdeles fungerer.

FFI har ikke hatt tilgang til et fysisk tennapparat, og analysen i dette kapittelet var først basert på tegninger og illustrasjoner fra [19], se figurene 6.1 og 6.2, og en filmet demontering av et slikt apparat [20], jf. figur 6.4. I ettertid har FFI fått tilgang til informasjon som er hentet fra flere ekstra kilder [21]. Det er ikke noen tvil om virkemåten, men fortsatt usikkerhet om enkelte detaljer. Dette gjelder primært hva slags materialer som er benyttet i de ulike komponentene, fordi ressurstilgangen under krigen kan ha ført til ulike varianter og endringer.



Figur 6.1: Tennapparat Pi 4c, illustrasjon hentet fra *Mine Disposal Handbook* [19] og tysk kilde (høyre) [21]. Høyre bilde viser også seksjon med tenner og overdragerladning.

6.2 Virkemåte

Tennapparatets virkemåte er at et oppspent tennstempel holdes i posisjon av en rulle på et pendelstag, som igjen er låst av en sperrehake. Sperrehaken er koblet til en dobbel pendelmekanisme. Pendlene reagerer på slag på langs og på tvers. Svake fjærer demper følsomheten mot små forstyrrelser. Bevegelse av pendelmekanismen løsner sperrehaken. Tennstempelet som står i spenn, vil da kunne skyve ut posisjonsrullen sideveis (radielt), og skytes så inn mot tennsatsen. To pigger (tennspisser) på tennstempelet vil ved anslag sette av en friksjonsfølsom tennsats som blant annet består av kvikksølvfulminat (se kapittel 5). Dette antenner et sjikt av rent svartkrutt, og stikkflammen som oppstår, slår gjennom bunnfolien og bringer tennerens ladning av rent kvikksølvfulminat, og deretter tetryl, til detonasjon. Denne detonasjonen setter av påfølgende ledd i tennkjeden, inkludert selve hovedladningen. Tennsats og tenner er oppgitt å være vanntett montert ved lodding av en tynn messingskive, som perforeres av tennstempelspissene ved anslag.

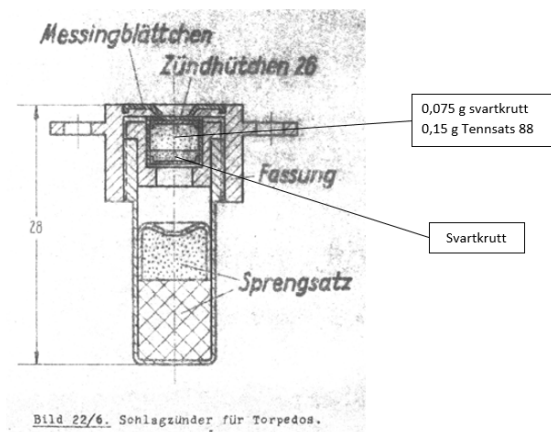
Et armert og ellers intakt tennapparat av denne typen (i en torpedo som har vært avfyrt) er svært følsomt for bevegelser, spesielt dersom de små fjærene som demper følsomheten til pendelmekanismen er korrodert eller skadet. Å bare snu på mekanismen (rulle torpedoen) vil i

et slikt tilfelle være kritisk. På de fleste Pi 4c kan man fjerne en maskinskrue fra topplokket (benyttes også til tetthetsprøving med trykkluft), og deretter skru et gjenget spesialverktøy inn i tennstemplet for å låse posisjonen. Dersom dette ikke er mulig, skal tennapparatet ikke flyttes.

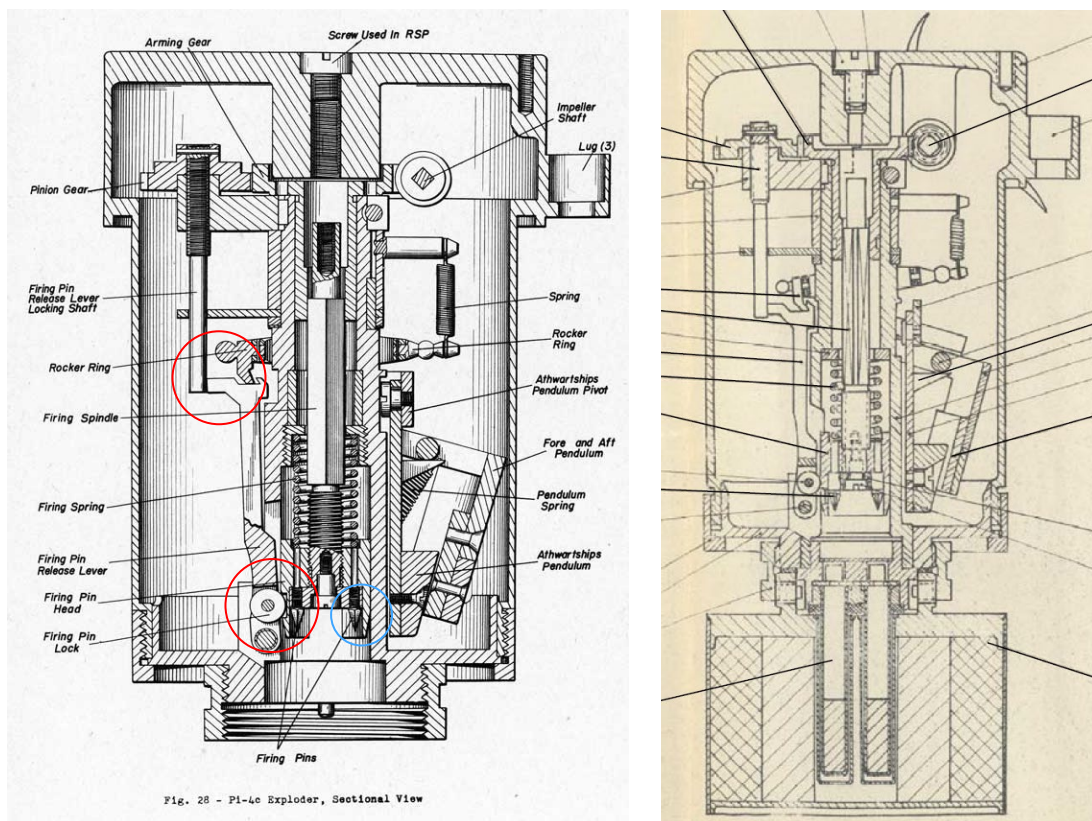
For et ikke-armert tennapparat er det to sikringsmekanismer (se figurene 6.3 og 6.4):

- (A) Pendelstaget og dermed tennstemplets posisjonsrulle er sperret med en gjenget sikringsbolt. Etter avfiring av torpedoen blir denne sikringsbolten skrudd tilbake, drevet av et lite turbinhjul som roteres av vannstrømmen via et snekkedrev. Etter en viss fluktavstand er sikringsbolten dermed ute av funksjon.
- (B) Tennstemplet består av bevegelige deler, slik at de to tennspissene i utgangspunktet sitter tilbaketrukket på en egen holder i en slags krage på stempelhodet. Turbinhjulets rotasjon skyver tennspissholderen nedover via et gjengeparti på stempelhodet, som er låst av stempelrullen i sikring (A).

Et ikke-armert og intakt tennapparat er i utgangspunktet en robust konstruksjon som tåler bevegelser og slag godt. Militær ammunisjon og komponenter er dimensjonert for normal håndtering og fall fra en viss høyde. FFI har ikke data for tålegrensene til Pi 4c, men ut fra konstruksjonen vil den mest sårbare situasjonen være slag forfra i lengderetningen som kan overbelaste pendelstag, sikringsbolt og sperremekanisme og i tillegg bryte av messingskruen som holder fremre del av tennspissholderen. Tilstrekkelig harde slag kan i prinsippet også forplante seg direkte til kvikksølvfulminatet i tennsatsen. Det siste anser vi som irrelevant for alle situasjoner som kan oppstå med U-864.



Figur 6.2: Tenner til torpedo. Det er ikke endelig bekreftet at dette er identisk med tenneren benyttet i Pi 4c, men likevel antatt at komponentene er representative [21].



Figur 6.3: Pi 4c, hentet fra henholdsvis *Mine Disposal Handbook* [19] og en tysk kilde [21]. På venstre figur viser røde sirkler hovedkomponentene i sikring (A), mens blå sirkel indikerer at tennspissene skjermes av en krage på tennstempelet før armering. Dette er sikring (B).

6.3 Tilstand

Fra tilgjengelig dokumentasjon kan det se ut som at tennapparatet har et hus av messing. Det er ikke klart om det er et ønske om korrosjonsbestandighet som er bakgrunnen for dette, eller om det har produksjonstekniske årsaker. En tredje mulighet er at hus av messing bidrar til den ekstra magnetiske utløsermekanismen mot en stålkappe på hovedpendelen, men dette er ikke relevant her.

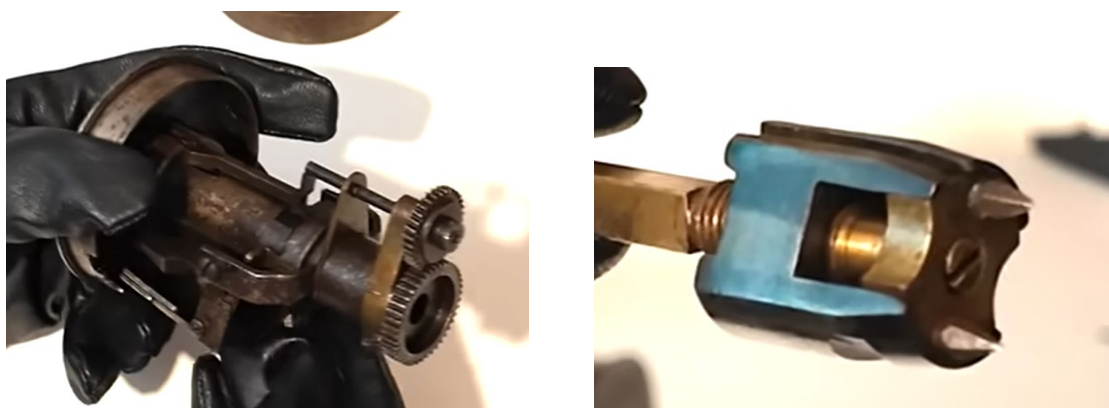
Et tennapparat hentet opp fra U-534 i 1993 viser små tegn til korrosjon, bortsett fra at pendlenes dempefjærer er ute av funksjon [20]. DNV anslår i tidligere rapporter at korrosjon for messing av marin kvalitet over tid kan være 0,001–0,005 mm/år [22]. En beholder med eksempelvis 3 mm veggtykkelse vil dermed forbli intakt over flere hundre år. Ordinær messing kan korrodere markant raskere, gjennom utvasking av sink. Pakninger og skruforbindelser kan være styrende for vanninntrengning.

Det er uklart hvor lang tid det tar før det kommer til sjøvann inne i et lukket torpedorør, siden degradering av pakninger og korrosjon på stålet ved pakningene vil skje over tid. Etter at dette inntreffer, er det en ny tidskonstant for tiden det tar før sjøvann kan trenge inn i tennapparatet.

Skjøter og eventuelle pakninger vil antakelig være styrende også her. Gjennomføring for turbinhjulet kan være et svakt punkt.

Det er nylig utgitt en tilleggsstudie av korrosjonsmekanismer i regi av DNV [23], se kap. 6.4. Uformelle observasjoner fra dette arbeidets gang [24] er at tennapparat hentet fra U-534 i 1993 ikke har vært utsatt for sjøvann innvendig (figur 6.4). Tennapparatets hus av messing vil være delvis beskyttet dersom torpedostridshodet er av stål, siden stridshodet da vil fungere som en stor offeranode.

Det er ikke mulig å si om torpedorørene i U-864 er vannfylt i dag, eller når det eventuelt har skjedd. Ved vanntrykk på 16 bar kan fylling av tennapparater antas å skje forholdsvis hurtig dersom prosessen først starter, og volumet av eventuell gjenværende luftlomme blir høyst 6 % av opprinnelig volum.



Figur 6.4: Tennapparat fra ubåten U-534. Venstre: Innvendig mekanisme. Høyre: Tennstempel med bevegelig tennspissholder, omtalt som sikring (B). Skjermdump fra video [20].

6.4 Effekt av korrosjon

I slutfasen av dette arbeidet har det kommet bedre informasjon om korrosjonsmekanismer og -hastigheter, gjennom en egen rapport fra DNV [23]. Basert på dette er vår konklusjon at begge sikringsmekanismene (A) og (B) sannsynligvis er intakte. For sikring (B) grenser denne sannsynligheten til sikkerhet.

Bakgrunnen for dette er at korrosjonsrater for komponenter i et tennapparat fylt med oksygenfattig sjøvann i DNVs tilleggsstudie [23] er estimert til følgende:

- Karbonstål som anode mot messing: 0,002–0,02 mm/år
- Messing som anode mot rustfritt stål: 0,001–0,002 mm/år

Som fremgår av tabell 6.1, vil hovedkomponenten i sikring (A) bare ved høyeste antatte korrosjonsrate over en periode på 80 år miste det meste av sin mekaniske styrke. Det er noe usikkerhet om nedre opplagringspunkt av vippearmer, men dette er av mindre betydning siden sikring (B) vil være intakt. Her er det bare, så langt vi kan bedømme fra tilgjengelige kilder,

komponenter av messing (figur 6.5). Den kritiske skrueforbindelsen vil være tilnærmet upåvirket, også dersom messing er anode mot et stempelhode av rustfritt stål.

Tabell 6.1: Total korrosjon under ulike betingelser etter 30 år (tiden etter heving av U-534) og 80 år (tid etter senkingen av U-864). Gul farge indikerer at bolt i sikring (A), som er antatt å være en 4 mm stålbolt, har mistet vesentlig mekanisk styrke.

	Korrosjonsrate [mm/år]			
	0,001	0,002	0,01	0,02
30 år	0,03	0,06	0,3	0,6
80 år	0,08	0,16	0,8	1,6

Resten av dette kapittelet ble skrevet før DNVs nye rapport ble ferdigstilt, men er beholdt tilnærmet urørt for fullstendighetens skyld.

Det er nyttig å se nærmere på hvilken effekt korrosjon innvendig i Pi 4c kan ha. Følgende komponenter er spesielt relevante:

- (1) Tennstempelets fjær
- (2) Tennstempel
- (3) Sperrehake
- (4) Sikringsbolt
- (5) Pendelstagets opplagring
- (6) Posisjonsrulle
- (7) Skrue for tennspissholder

Enkelt sagt kan tennstempelet utløses bare dersom følgende er tilfelle samtidig:

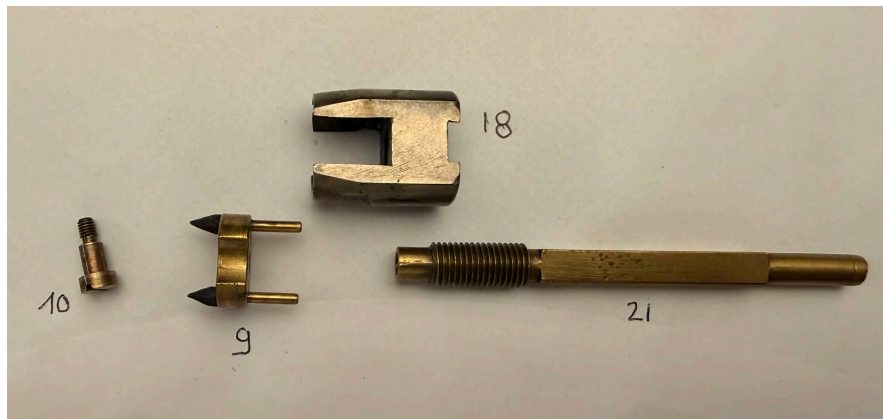
- Hovedfjæren har tilstrekkelig reststyrke/fjærkraft.
- Tennstempelet kan gli tilstrekkelig friksjonsfritt.
- Sperrehake og sikringsbolt er ute av funksjon samtidig, eller pendelstagets opplagring ryker.

I tillegg må følgende inntreffe for å gi en omsetning av tennsatsen :

- Stempelets tennspissholder løsner i det stempelhodet går i endestopp (stripping av gjengene på skrue (10 i figur 6.5).
- Tennspissholder har tilstrekkelig energi til å perforere messingplate og tennsats.
- Den friksjonsfølsomme tennsatsen er intakt (ikke utsatt for fukt).

Dersom alle komponenter er av samme materiale og korroderer med samme hastighet, synes det klart at korrosjon vil gjøre tennapparatet mer stabilt over tid. Dette skyldes flere forhold. For det første vil fjærens restkraft reduseres hurtigere enn kapasiteten til sikringsbolten; kraften er proporsjonal med med henholdsvis d^4 (hvor d er diameter på fjærtråd) og d^3 (hvor d er diameter på bolt). I tillegg vil tennstempelet korrodere fast i sleiden siden korrosjonsprodukter som nevnt tar opp flere ganger mer volum enn stål. Det er en liten usikkerhet knyttet til pendelstagets

opplagring, hvor godstykkelsen er liten. Korrosjonens låsing av tennstempel mot sleide vil dog antakelig gå raskere, forutsatt at klaringer estimert fra tegninger (figur 6.3) er realistiske.



Figur 6.5: Tennstempel fra restaurert tennapparat [21]. Nr 18 kan være av rustfritt stå, men denne informasjonen er noe usikker. Øvrige deler er av messing.

Fra bilder og ulike beskrivelser synes det som tennapparat Pi 4c har komponenter av ulike materialer. Det kan anses som nesten sikkert at huset er av messing. At hovedpendelen har en del av magnetisk materiale (på grunn av en ekstra magnetisk utløsermekanisme som ikke er omtalt i dette notatet) kan anses som sikkert. For øvrige komponenter, og også legeringer, er det en usikkerhet. Avhengig av kombinasjoner og arealer var det nødvendig å anta at det kan oppstå galvanisk korrosjon på komponentene. DNVs rapport fra 2026 har tonet ned effekten av dette, men galvanisk korrosjon vil likevel påvirke rekkefølgen av korrosjon på de ulike materialene.

Følgende kombinasjoner er mest relevante:

- *Kombinasjon 1*
Alle materialer er identiske – se ovenfor
Tennapparatet vil bli mer stabilt over tid, siden hovedfjæren mister fjærkraft hurtigere enn sikringsbolten mister styrke. I tillegg vil tennstempleet korrodere fast i sleiden.
- *Kombinasjon 2*
Sikringsbolt av stål, hovedfjær av bronse, sleide av stål, tennstempel av messing
Tennapparatet vil mest sannsynlig være stabilt over tid. Selv om hovedfjæren er intakt, vil sleiden sannsynligvis korrodere fast raskere enn det oppstår svikt i sikringsbolten.
- *Kombinasjon 3*
Sikringsbolt av stål, hovedfjær av bronse, sleide av messing, tennstempel av messing
Tennapparatets stempel kan over tid utløses spontant eller ved slag. Utfallet bestemmes av om tennspissholderens sikring (B) er intakt, og om tennsatsen er tørr.

Tennspissholderens sikring (B) består av en messingskrue M3 som er gjenget i messing. Skruen holder tennspissholderens masse på ca. 6 g. Dersom tennstempleet slås i endestopp av

hovedfjæren (estimert til 7–9 m/s), vil skruen oppleve en høy slagbelastning. Det må antas at sikringen er testet i designfasen og i utgangspunktet fungerer. FFI har ikke beregnet dette detaljert, men kinetisk energi for tennspissholderen ved 9 m/s er om lag 0,25 J. Energien for uttrekk av intakt skrueforbindelse er i området 1,5 J (3000 N bruddkraft ved 0,5 mm forlengelse i skjær og 150 N/mm² skjærstyrke). Det vil være liten vanninntrengning i gjengepartiet, og denne sikringen vil være blant de lengst overlevende komponentene i tennapparatet. Det kreves betydelig korrosjon for å redusere styrken fra en sikkerhetsfaktor seks ned til én eller mindre.

Den friksjonsfølsomme tennsatsen vil sannsynligvis bli inaktiv ved kontakt med vann, jf. kapittel 5. Ifølge originale beskrivelser [21] er denne montert under en tynn messingskive som er loddet fast. Selve tennkapselen er av kobber og er loddet fast til holderen. Loddetinn/bly ligger nært messing i spenningsrekkefølgen, men vil være anodisk med svært god elektrisk forbindelse. Potensialforskjellen er dog ikke stor, og anodematerialet av karbonstål vil ofres først. Neste svake punkt er folien i bunnen som skal gjennombrennes av svartkruttsatsen. Det er noe usikkert hvor lenge tennkapselen holder tett.

Samlet er det rimelig å anta at friksjonsladningen inaktiveres hurtigere enn svekkelse av tennspissholderens sikring (B) utvikler seg.

6.5 Andre mulige feiltilstander

Mekanisk antenning fra deformasjoner etter vannlekkasje

Den slagfølsomme tennsatsen er komponert for å være spesielt følsom for friksjon. Som nevnt tidligere vil den mest sannsynlig uskadeliggjøres permanent ved oppfukting. Man kan likevel tenke seg at lekkasje inn i tennapparatet oppstår mens tennsatsen fremdeles er vanntett. Dette vil gi et høyt statisk trykk mot øvre messingskive og selve tennkapselen, og man bør være sikker på at dette ikke kan gi tilstrekkelig og hurtig og stor nok deformasjon til at det oppstår indre «gnissing» og antenning.

Enkle beregninger viser at en messingskive med riktig diameter og tykkelse 0,8 mm vil stå imot et trykk i området 100–200 bar med en defleksjon på 0,005–0,01 mm. For å stå imot et trykk på 16 bar behøves en messingskive på 0,2–0,3 mm. Dette er lavere enn samlet tykkelse av messingskive og tennsats. Lekkasje vil oppstå gradvis gjennom mikrohull (*pinholes*) i tennapparatets hus, eller sammenføyninger. Dette vil gi en gradvis vannfylling og trykkøkning som tar fra flere sekunder til flere minutter eller mer. Fra geometriske betraktninger kan det utelukkes at en vannstråle kan treffe direkte mot tennerne og gi dynamisk belastning på messingskiven. Samlet sett kan man for alle praktiske formål utelukke at tennsatsen vil bli aktivert av en vannlekkasje alene.

Opprinnelig torpedering

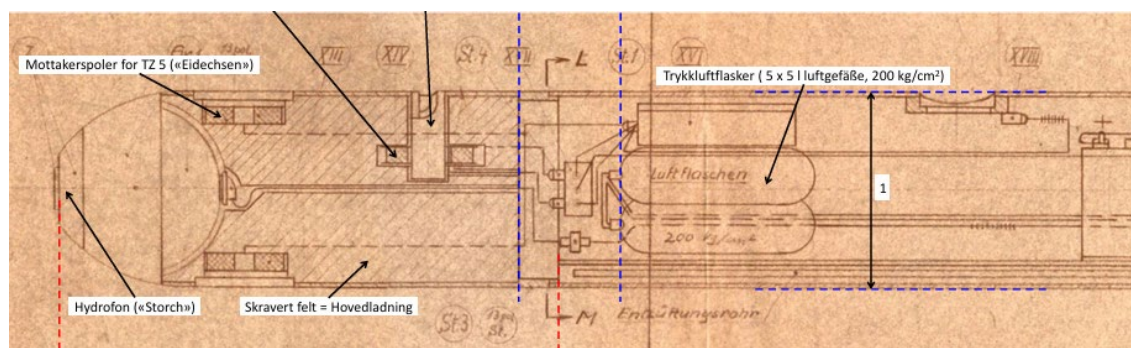
Tennapparater har overlevd opprinnelig torpedering uten å løses ut. En avstand av størrelsesorden 30 m gir et estimert maksimaltrykk på 8–10 MPa. Det er vanskelig å se at sjokklast fra torpederingen kan gi opphav til mekaniske feiltilstander som kan føre til at tennapparatet utløses i ettertid. Spesielt er det vanskelig å se at sikringsmekanismen (B) kan ha blitt påvirket. Eksamplene vil ikke ha hukommelse fra en slik hendelse.

Produksjonsfeil, monteringsfeil eller sabotasje

Feilaktig montering eller sabotasje under produksjon kan ikke utelukkes fullstendig.

7 Konsekvens av brudd i luftflasker

De elektriske torpedoene har flere små luftflasker med 200 bar trykk for ulike kontroll- og styresystemer. Disse er lokalisert like bak stridshodet, se figurene 7.1 til 7.3. Tidligere har man antatt at disse flaskene vil lekke luft gradvis over tid [25]. Selv om dette høres sannsynlig ut, er det likevel ytret bekymring knyttet til om en plutselig brist i en slik flaske kan få stridshodet til å detonere.



Figur 7.1: Plassering av luftflasker bak stridshodet i torpedo TV [21].

Størrelsesordenen for nødvendig trykk for sjokkinitiering av de ulike komponentene i en torpedo er gitt i tabell 7.1. Trykket i luftflaskene tilsvarer 20 MPa, noe som i seg selv er langt fra tilstrekkelig.

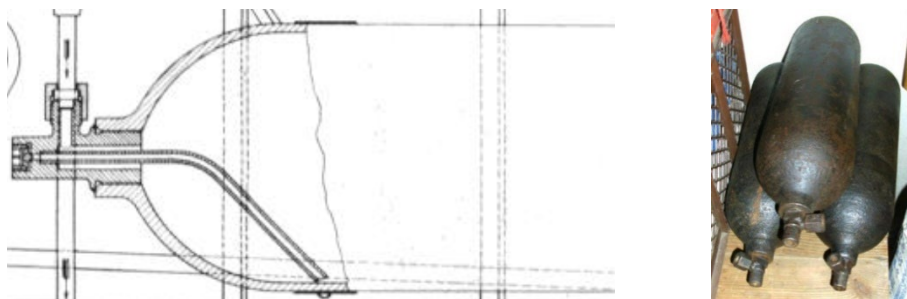
Tabell 7.1: Nedre grense for sjokkinitiering av eksplosiver. For standard eksplosiver er ikke én spesifikk referanse oppgitt, da tallene kan variere noe.

Sprengstoff	Sjokkinitiering [MPa]	Referanse
TNT (referanse)	> 2000	-
S2	> 2000	Estimert av FFI
S18	> 3000	Estimert av FFI
Tetryl	> 900	-
PETN	> 800	-
Blyazid PVA (referanse)	> 400	[26]
Kvikksølvfulminat	> 200	[16]

Treff av fragmenter mot stridshodet kan imidlertid skape et sjokk som ikke er direkte relatert til trykket i flaskene. Vi har derfor sett på et teoretisk, verst tenkelig tilfelle hvor nippelen til en

luftflaske brått slipper taket, som resultat av korrosjon av gjengepartiet, uten at det har forekommet lekkasjer på forhånd. Fra tegninger kan luftnippelen noe forenklet representeres som et sylindrisk prosjektil med en masse på ca. 400 g.

Denne situasjonen er simulert med det numeriske programmet *Autodyn*. Det er antatt at prosjektilet kan gli friksjonsfritt ut av en luftbeholder (200 bar) med «løpslengde» på 28 mm og inn i et vannfylt reservoar⁴. Vann er en rimelig antakelse pga. hypotesen om korrosjon. Vann gir på den ene siden større bremskraft enn luft, men samtidig vil akselerasjonen i større grad fortsette utenfor luftbeholderen siden luften i mindre grad lekker ut til sidene og dermed kan fortsette å skyve på prosjektilet.



Figur 7.2: Snitt av tilsvarende 5 liters luftflasker, her fra aktre gyrorom i en TIII-torpedo, samt fotografi av samme [21].

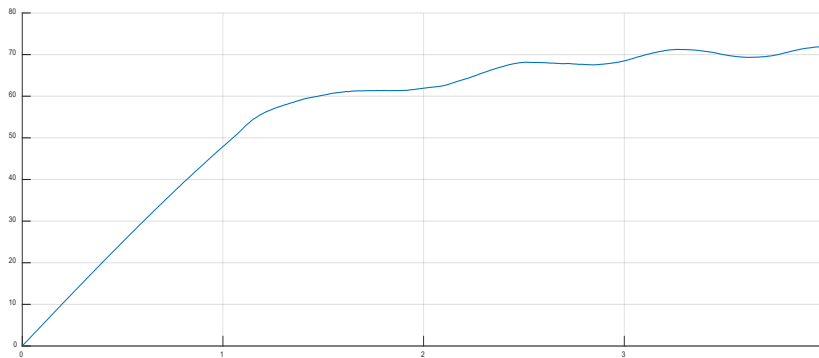
Nippelen er koblet til minst ett tverrgående luftrør som kan bremse bevegelsen, men denne effekten er ikke inkludert i beregningen. Resultatet er at stålsylinderen på 400 g akselereres til en hastighet på 60 m/s etter ca. 30 mm og øker hastigheten ytterligere til om lag 70 m/s etter 150 mm. Avstanden til stridshodet er ca. 250 mm.

Det kraftigste sjokket som kan oppstå ved slike kollisjoner, er ved et perfekt treff mellom to plane flater, og dette er det mulig å beregne ved standard bruk av impedans-matching av Hugoniot-kurvene for henholdsvis eksplosivet og stål [27]. Ved en hastighet på 70 m/s vil dette være om lag 280 MPa ved anslag mot TNT. [28–30]. Dette er av samme størrelsesorden som sjokkinitieringstrykket for kvikksølvfulminat, men den relle situasjonen vil avvike mye fra det teoretisk optimale anslaget⁵.

For det første er ikke bakplaten av stridshodet flatt, og prosjektilet vil heller ikke være en plan sylinder. Innledende simuleringer med hydrokoden *Impetus* viser eksempelvis at maksimaltrykket som overføres gjennom bakplaten og til eksplosivet dersom prosjektilet har et neseparti som er kuleformet, reduseres med om lag 75 %.

⁴ Et godt estimat følger trivielt fra flasketrykket; dette er den lineære delen av kurven i figur 7.3.

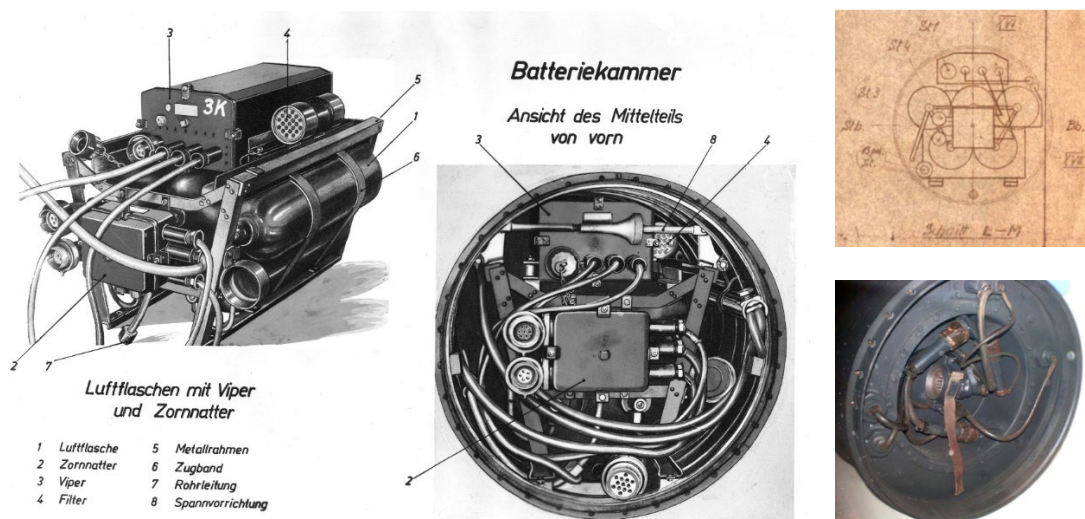
⁵ Merk at for en mer nøyaktig beregning er det nødvendig å også ta hensyn til varigheten, ikke bare maksimalt trykk. Man benytter da gjerne størrelsen *critical energy fluence*, som inneholder trykk, tid, tetthet og sjokkhastighet. Uten en full simulering av hele stridshodet, vil det være vanskelig å benytte denne størrelsen i dette tilfellet.



Figur 7.3: Hastighet for stålprosjektil [m/s] som funksjon av tid [ms]. Prosjektilet representerer luftnippelen på en 5 liters luftflaske.

I tillegg er det flere andre effekter som vil bidra:

- Luftnippelen hindres (delvis) av lufrør og komponenter.
- Sjøkket vil fortynnes ved utbredelse inne i stridshodet.
- Det kan oppstå tilfeldige refleksjoner i ulike grenseflater inne i stridshodet.
- Grenseflatene mellom hovedladning, tennapparat og tennere kan ha klaringer.
- Det er mulighet for redusert følsomhet for kvikksølvfulminat.

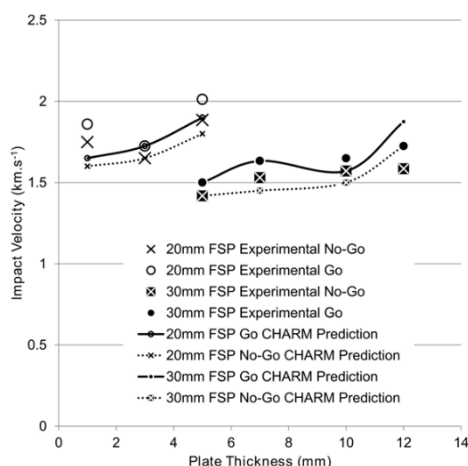


Figur 7.3: Luftflaskemodul (venstre), modul i torpedo sett fra stridshode (midten), plassering av de fem flaskene (høyre øverst) og stridshodets bakplate (høyre nederst) [21].

Det gir ekstra innsikt å sammenlikne med eksperimentelle data fra ulike beskytningstester. Slike tester benyttes nettopp for å si noe om sikkerhet i praktisk bruk.

For granater fylt med TNT viser figur 7.4 at man må opp i hastigheter i området 1000 m/s for 20 og 30 mm fragmentsimulatorer med masse på henholdsvis 27 og 98 g for å skape en detonasjon bak en 4 mm plate [31].

Eksperimentene var utformet mot sprengstoff som ikke var innesluttet, altså slik at det ikke oppstod refleksjoner som kunne øke trykket. Merk også at fragmentene var sylindriske, slik at teoretisk beregnet trykk (1500 m/s) blir av størrelsesorden 10 GPa [28–30]. Dette illustrerer at de teoretiske resultatene i stor grad påvirkes av for eksempel små avvik i geometri.



Figur 7.4: Fragmentbeskytning mot mål av TNT [31].

En annen illustrativ test er den såkalte *Steven Impact Test*, hvor et 1200 g stålprosjektil skytes mot sprengstoff med en tynn stålplate foran, og en tykkere bak, se figur 7.5. Testen ble utviklet for å: «... [increase] the fundamental knowledge and practical predictions of impact safety hazards for confined and unconfined explosive charges» [32].



Figur 7.5: Steven Impact test [32–33] En «puck» av sprengstoff er plassert bak en 3,18 mm tykk frontplate, med en bakplate på 19 mm, innesluttet langs radien av en teflonring og 26,7 mm stål.

Resultater gjengitt i [33] viser at ingen av sprengstofftypene TNT, Comp-B, ANFO eller C4 reagerte ved hastigheter opp til 190–200 m/s, som var øvre grense i testen. Det spekuleres i referansen at friksjon spiller størst rolle, slik at sprengstoff som inneholder «smøremidler», som C4 og ANFO, vil være robuste. For TNT og Comb B pekes det på at det lave smeltepunktet for TNT kan bidra. Ulike typer *plastic bonded explosives* (PBX) er derimot betydelig mer følsomme, med grenseverdier på 34–45 m/s. Fra figur 7.5 er det også klart at det oppstår en betydelig klem-effekt ved høye hastigheter som kan gi høye trykk- og skjæreffekter. Komposisjonen av sprengstofftypene S2 og S18 tilsier at de vil ha mer til felles med de mer ufølsomme typene nevnt ovenfor enn med PBX.

For fullstendighetens skyld nevnes også fallhammertest. Det er eksempelvis kjent at TNT kan bringes til detonasjon ved anslagshastigheter på ca. 6 m/s, avhengig av standard og metode. I en slik test klemmes imidlertid en liten sprengstoffmengde med stor kraft over svært kort tid mellom to metallflater. Det er vist gjennom simuleringer at det i en slik test kan oppstå store flytkastigheter og høye lokale spenninger i sprengstoffet på rundt 600 MPa eller mer innenfor brøkdelen av et sekund [34]. Hypotesen er at sprengstoffet antennes i lokale hot-spots, primært som følge av viskoplastisk oppvarming.⁶ Loddets hastighet i en fallhammertest er derfor uten relevans når det gjelder brudd i luftflasker.

I sum er det rimelig å konkludere med at omsetning av sprengstoffet fra svikt i en luftflaske som gir fragmenttreff, ikke vil finne sted. Selve hendelsen (løsnet nippel og fullt lufttrykk) er også teoretisk og oppkonstruert.

Heller ikke tennapparatet vil svikte som følge av en slik belastning. Spesielt vil tennapparatets sikring (B) være upåvirket.

8 Oppsummering og vurdering av praktiske konsekvenser

8.1 Generelt

Kystverkets oppdrag til FFI har vært å kartlegge hva slags ytre belastninger torpedoer i vraket tåler under operasjoner på kort sikt, og ved eventuell tildekking av vraket på kort og lang sikt. Spesielt nevnes utlegging av masser for tildekking av vraket, langsiktig sammensynking og deformasjon av vraket, og eventuell brist i interne luftflasker. Det er også stilt spørsmål ved om innfylling av masse inne i trykkskrog og mellom torpedorør kan redusere muligheten for detonasjon, om en detonerende torpedo kan føre til at flere torpedoer går av (sympatetisk detonasjon), og i hvilken grad en detonasjon vil føre til spredning av kvikksølv.

I tillegg er det stilt spørsmål ved i hvilken grad vrakdeler vil bli deformert under eventuell utlegging av tildekkingsmasse, underforstått om slik deformasjon kan påføre torpedoene belastninger som kan føre til en detonasjon.

⁶ Effektene som oppstår i en fallhammertest er benyttet i definisjonen av *radikal dynamisk sammenklemming* på slutten av kapittel 8.1.

Foregående kapitler har vurdert torpedoenes sprengstoff, tennapparater, brudd i luftflasker og konsekvens av detonasjon under overdekning. I dette kapitlet er hensikten å belyse praktiske konsekvenser av denne innsikten for videre arbeid med vraket. De faglige resultatene, som er basert på detaljert faglig innsikt og beregninger, blir da benyttet som inngangsverdier til mer overordnede tekniske vurderinger.

Nøkkelspørsmålene er om torpedoene i U-864 kan detonere som følge av belastninger og bevegelser som kan oppstå under håndtering av vraket i ulike operasjoner. Eksempler på operasjoner kan være prøvetaking, mudring, tømning av kjølkasser, tildekking, flytting eller heving.

Videre er det av interesse om torpedoer etter en eventuell tildekking kan tenkes å detonere på lenger sikt som følge av belastninger fra sammensynking eller kollaps av vraket, eller bevegelser fra jordskjelv. Detonasjon helt uten ytre påvirkning kan utelukkes.

En detonasjon kan i teorien enten inntreffe som følge av at tennapparatet utløses, eller ved at eksplosiver påføres belastning direkte. Det er derfor nødvendig å forstå både eksplosivkjemi og fysiske forhold, så vel som tennapparatenes konstruksjon, virkemåte og holdbarhet.

Kapittel 6 viser at for tennapparatene av type Pi 4c er det så godt som sikkert at minst én av to fysiske sikringsmekanismer er intakte. På lang sikt kan begge disse svekkes av korrosjon, men uten at dette synes å utgjøre noen stor fare. Dette skyldes både en forventet oppfukning av tennsatsen før siste sikring svekkes, og at korrosjon over tid vil skape nye barrierer for tennstempelets funksjon. Det kan slutes at tennapparatet med høy sannsynlighet⁷ ikke vil sette av en torpedo, og at det er direkte påvirkning på sprengstoffet av andre årsaker som må vurderes.

Det er kjent at sprengstoff kan beholde sine eksplosive egenskaper selv under langvarig lagring, og også at enkelte typer kan utvikle en økt følsomhet for ytre påvirkning. Noen ganger kan det i tillegg dannes ekstra følsomme forbindelser, for eksempel gjennom reaksjon med metaller.

For U-864 er egenskaper for de ulike sprengstoffkomponentene i torpedoene beskrevet i kapittel 5. Det er antatt at hovedladningene består av sprengstoff av enten type S2 eller S18. I tillegg er det en tennladning (overdrager) av noen hundre gram PETN, en tenner med kvikksølvfulminat og tetryl og til sist en friksjonsfølsom tennsats som inneholder en miks av svartkrutt og blandingen *Zündsatz 88*. Det holder at én av disse komponentene bringes til detonasjon for å sette av en torpedo i sin helhet, og det bør legges til grunn at alle er virksomme i 2026.

For eksplosivene i stridshoder og tennapparater er det sannsynliggjort at selv om enkelte av disse vil endre seg, vil det ikke oppstå nye forbindelser som har høyere følsomhet for slag og friksjon enn forbindelsene som allerede var til stede i utgangspunktet. Spesielt kan det nevnes at det for S18 antakelig *ikke* vil dannes tetraamminkobber(II)nitrat grunnet begrenset mulighet for kontakt med metall. Videre vil dannelse av kobberpikrat fra tetryl ha følsomhet omtrent som kvikksølvfulminat, mens eventuell dannelse av kobberfulminat fra kvikksølvfulminat vil brytes

⁷ Ordet «sannsynlighet» benyttes her i en generell og ikke definert statistisk betydning.

ned til ikke-eksplosive forbindelser over tid. Slagtennsatsen av svartkrutt / *Zündsatz* 88 vil bli permanent deaktivert ved gjennomfukting.

Som beskrevet i kapitlene 5 og 7, er hovedladningene lite følsomme for «langsomme» slag og trykk, med unntak av situasjoner hvor sprengstoffet klemmes kraftig mellom to harde flater med svært liten avstand, slik at det oppstår høye lokale flythastigheter og høyt trykk over kort tid. Det er hensiktsmessig å definere denne typen hendelse som følger:

Definisjon 1: Radikal dynamisk sammenklemming

En situasjon hvor et materiale klemmes kraftig mellom to harde flater med svært liten avstand, slik at det oppstår store lokale tøyningssrater, høye lokale flythastigheter og høyt trykk over kort tid. Fallhammertest av sprengstoff er et kjent eksempel.

8.2 Belastninger fra slag og bevegelser under håndtering av vraket

Utgangspunktet er at torpedoer og tennapparater er laget for å tåle håndtering og uhell, samt store og brå bevegelser fra ubåtens gange og stamping på overflaten i røff sjø. Torpedolasten har tidligere overlevd både torpederingen i 1945 og en antatt hard landing mot havbunnen. FFI har forsøkt å finne eksempler på at rystelser fra detonerende dypvannsbomber har satt av torpedoer, men dette synes ikke å være dokumentert. Slike hendelser kan likevel ikke utelukkes.

Tennapparatene vil med høy sannsynlighet fortsatt ha minst én intakt sikringsmekanisme, og denne er av en type som fremstår robust for slag.

Torpedoer med tennapparater i torpedorør er hindret fra å rulle og er generelt godt beskyttet. Bevegelser av vrakdelene som kan gi direkte sammenstøt mot torpedorør (for eksempel å miste vraket fra en løfteanordning slik at det lander med baugen først) må imidlertid unngås, da dette i teorien kan medføre radikal dynamisk sammenklemming (definisjon 1 ovenfor) og dermed bringe eksplosivene til detonasjon direkte.

Bevegelse av eventuelle torpedoer i torpedorum vil dempes i vannfylte omgivelser, men også i luft vil rulling skje i lav hastighet og gi moderate slag ved bråstopp. Torpedoene her har ? ikke innmonterte tennapparater. Slag mot torpedoene vil ikke forårsake en trykkbølge i eksplosivet som kan skape detonasjon, og det vil ikke kunne oppstå radikal dynamisk sammenklemming.

Tidligere studier har antatt at interne luftflasker i torpedoene vil ventilere kontrollert. Et eventuelt plutselig brudd (noe som vil være uventet) i en slik flaske kan resultere i fragmenter som treffer stridshodet i bakkant, hvor en hel luftnippel vil være *worst case*.

En samlet vurdering av beregnet hastighet, teoretiske betraktninger, innledende simuleringer og sammenlikning med eksperimenter fra litteraturen (kapittel 7) tilsier at dette ikke kan føre til detonasjon av stridshoder.

8.3 Tildekking

FFI har ikke gjennomført detaljert modellering av deformasjon av form- eller trykkskrog, men det er gjennomført overslagsberegninger som støtte for kvalitative vurderinger for torpedorør.

Dersom trykkskroget er trykkavlastet (vannfylt), utgjør overdekning en moderat last i forhold til vanntrykk på store dyp, som skroget er bygget for å tåle. Selv om man tar hensyn til skader og dokumentert korrosjon, og at last fra tildekking ikke er fullstendig isotrop, anses dette å være uproblematisk. Dersom skroget er tett og luftfylt, kan det ikke utelukkes at svekkelse fra korrosjon medfører at trykkskroget på aktuell vanndybde nærmer seg tålegrensen. Ventilering før tildekking kan i så fall gjennomføres som tiltak. Innfylling av finkornet granulær masse (sand) kan vurderes som et langsiktig stabiliserende tiltak.

Forenklete simuleringer viser at overdekning av utstikkende deler av torpedorør ikke medfører fare. Skulle det mot formodning oppstå noe deformasjon, vil det skje i innfestingen mot trykkskroget og ikke påvirke torpedostridshodene. De fire torpedorørene er festet til hverandre med spesielle koblingsstykker, noe som gir økt stivhet til konstruksjonen. Overslagsberegningene tar ikke hensyn til dette. Formskroget må forventes å gi etter, og om man ønsker å eliminere plutselig og ukontrollert nedfall av tildekkingsmasse og deler av formskroget på utstikkende torpedorør, kan innfylling av finkornet masse mellom trykk- og formskrog vurderes.

8.4 Mulighet for detonasjon på lang sikt

Basert på vurdering av tennapparater og eksplosiver vurderer vi at muligheten er lav for at torpedoer skal detonere dersom de blir værende i vraket, både på kort og lang sikt.

Eksplosivene, både i tennapparater og hovedladninger, kan fortsatt være virksomme, men tåler godt høye og langsomme belastninger som ved sammensynking av masser og gradvis svikt av vraket.

Tennerne, som er mest følsomme, sitter forholdsvis godt beskyttet inne i en hovedladning som rent mekanisk virker dempende. Det kan oppstå glidning og friksjon mellom korroderte bøsninger og sprengstoff, men med lav glidehastighet og god kjøling fra det omkringliggende sjøvannet vil slike effekter ikke forventes å utgjøre noen fare.

Lavfrekvente skjær- og trykkbølger fra jordskjelv vurderes å ikke i seg selv kunne sette av eksplosiver som ligger innesluttet i deformerbare materialer som sand eller vann.

Sprengstoff kan teoretisk detonere ved langsomme støt eller «stemplinger» som gir høye lokale tøyningssrater og stor lokal materialtransport, se definisjon 1 av radikal dynamisk sammenklemming i kapittel 8.1. Dette er kjent (på land) ved graving, hydraulisk pigging eller treff av tunge komponenter ved en kollaps av stive strukturer⁸. Denne typen geometrier, objekter og hendelser er vanskelig å se for seg på U-864, men kan ikke utelukkes helt siden vi ikke kjenner skadeomfanget inne i vraket eller nøyaktig plassering av torpedostridshoder i forhold til tunge strukturer. Samtidig er eventuelle reservetorpedoer på eller under dørken lite

⁸ Eksempelvis planlegger man å fjerne mastene på det britiske skipet SS Richard Montgomery, siden deres fundamenter kan svikte og føre til at mastene faller loddrett ned og «stempler» ammunisjonslasten.

følsomme, siden de ikke har innmonterte tennapparater. De vil også ha sine stridshoder i en posisjon nært inntil fremre torpedobatteri, hvor de er delvis skjermet for nedsynking inntil torpedobatteriet på lang sikt mister mekanisk styrke.

For *torpedoer inne i vraket* kan radikal dynamisk sammenklemming i prinsippet oppstå som en sekundæreffekt av jordskjelv, dersom sprengstoff gradvis har kommet i klem mellom tunge komponenter på forhånd. Om man ønsker å ta høyde for dette, samt plutselig svikt av vraket, vil innfylling av finkornet granulær masse (sand) før kollaps av skroget være til hjelp.

For *torpedoer i torpedorør* med innmonterte tennapparater er det imidlertid vanskelig å se for seg at disse kan bringes til detonasjon ved jordskjelv, grunnet fravær av tunge komponenter utenfor trykkskroget og innkapsling av de følsomme komponentene i hovedladningen. Innfylling av finkornet granulær masse (sand) mellom trykk- og formskrog kan likevel vurderes, se også kapittel 8.3.

8.5 Spredning av kvikksølv ved en eventuell detonasjon

Dette spørsmålet er behandlet i kapittel 4. FFI har ikke kunnet utelukke at én torpedo kan sette av sine nærmeste naboer, og har derfor gjennomført forenklete simuleringer av en samtidig detonasjon av fire torpedoer i forskipet i et tildekket vrak. Beregningene er konservative, ved at alle lag av masser behandles som væsker og dermed gir en for stor omrøring.

Resultatene viser at mengden kvikksølv som kan føres høyt oppover i vannsøylen sammen med detonasjonsproduktene er svært liten. Avhengig av hvilken faktisk konsentrasjon av kvikksølv som finnes i sedimentene, kan det være snakk om noen få gram. Noe forurensede sediment kan i tillegg suges opp innenfor en sirkel med radius 6 m på opprinnelig havbunn, og raskt legges seg på toppen av overdekningen innenfor en radius på 10 m. Dersom innholdet fra en eller flere flasker eller «hot spots» berøres, kan berørt mengde kvikksølv være større (noen titalls kilo), men dette vil bare delvis kunne suges opp gjennom overdekningen. Mengden er ikke tallfestet. Dette kvikksølvet vil i hovedsak synke nært detonasjonspunktet, som forklart i kapittel 4. Deler av det kan imidlertid også, avhengig av partikkelstørrelse, transporteres noe lenger med eventuell strøm før det legger seg. Dette er ikke kvantifisert, men vil ha et omfang som er flere størrelsesordener mindre enn ved torpederingen i 1945.

8.6 Stikkordsmessige svar på oppdragets opprinnelige spørsmål

For ordens skyld besvares oppdragets opprinnelige spørsmål (i bearbeidet form) summarisk i tabellen nedenfor. Ordet «sannsynlighet» må her tolkes med forsiktighet, i retning av «teknisk mulighet, vurdert etter beste faglige skjønn». Tabellen bør bare benyttes sammen med resten av dette notatet.

1	Kan brist av en intern trykktank sette av et stridshode?	Svært lav sannsynlighet (samlet for hendelse og utfall.)
2	Hva slags ytre belastninger tåler torpedoer i torpedorør, -rom og -beholder?	Se kapittel 5–8.
3	Hvilke deformasjoner av vrakdeler vil oppstå under utlegging av tildekkingsmasse?	Dette er ikke beregnet i detalj, men er vurdert for torpedorør.
4	Kan utlegging av masse detonere torpedoer?	Lav sannsynlighet, og kan reduseres til svært lav med ekstra tiltak.
5	Kan langsiktig deformasjon, kollaps og sammensynking føre til detonasjon?	Lav sannsynlighet, og kan reduseres til svært lav med ekstra tiltak.
6	Kan innfylling av masse redusere risikoen for detonasjon?	Ja, se punktene 4 og 5. Forholdsvis fin granulær masse er å foretrekke.
7	Vil en detonerende torpedo sette av sine naboer?	Sannsynligheten er betydelig for torpedoer i torpedorør.
8	Hvilken spredning av kvikksølv vil forekomme ved en eventuell detonasjon?	Spredningen i stillestående vann blir i all hovedsak lokal, over et område med radius 10 m. Kvikksølvpartikler kan fraktes lenger med strømmen før de synker, avhengig av deres størrelse og overdekningens tykkelse.

Referanser

- [1] P. M. Sparrevik, E. Eek, R. T. Klinkvort, G. R. Eiksund, *A Submarine Full of Mercury*, Copyright 2017, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2017.
- [2] Peter Hennessy, James Jinks, *The Silent Deep: The Royal Navy Submarine Service Since 1945*. Penguin Books, 2015, sitert i Wikipedia: British 21-inch torpedo, https://en.wikipedia.org/wiki/British_21-inch_torpedo.
- [3] Axel Niestlé, personlig kommunikasjon, e-post til Eirik Svinsås 25. februar 2026.
- [4] *Rapport om hvordan ammunisjonssikkerhet påvirker ulike alternativer for håndtering av kvikksølv i ubåtvraket U-864 og forurensede sedimenter ved vraket, vedlegg C: Ammunisjonsbeholdning i Kriegsmarines Type IX D2 ubåt, U-864, Forsvarsmateriell maritime kapasiteter*, 2025.
- [5] *Mulige tiltak for heving av last*, DNV GL AS, 2014, vedlegg V3.06 til *Sentralt styringsdokument for Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Alt.3 Heving av last og tildekking av vrak og forurenset havbunn*, Kystverket, 2014.
- [6] *Material Testing of PressureHull Specimen on U-864*, DNV GL AS, 2014, vedlegg V3.07 til *Sentralt styringsdokument for Miljøtiltak ved vraket av U-864 – Alt.3 Heving av last og tildekking av vrak og forurenset havbunn*, Kystverket, 2014.
- [7] Niestlé, Axel, *German U-boat losses in World War II – Ammunition carried aboard U-864 during its final patrol in February 1945*, UR-Report No 002/2024, 2024.
- [8] *EOD Calculator* version 1.0.0.0, internt FFI beregningsprogram, beskrevet i: Ove Dullum, *Dokumentasjon av EOD calculator*, FFI-rapport 18/00458 (Unntatt offentlighet).
- [9] *Håndbok i våpenvirkninger*, Temahefte 5, *Undervannsdetonasjoner*, Forsvarets forskningsinstitutt og Forsvarsbygg, 2019.
- [10] J. R. Blake, *The Kelvin impulse: application to cavitation bubble dynamics*, The Journal of the Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics, 30(2):127–146, 1988.
- [11] Impetus Afea AS/AB. *IMPETUS Solver*, version 10.1.2. <https://www.impetus.no/>.
- [12] Grégoire Allaire, Sébastien Clerc, Samuel Kokh, *A Five-Equation Model for the Simulation of Interfaces between Compressible Fluids*, Journal of Computational Physics, Volume 181, Issue 2, 2002, Pages 577-616, ISSN 0021-9991, <https://doi.org/10.1006/jcph.2002.7143>.
- [13] Benjaminsen et al. *Kystverkets vurderinger og anbefalinger etter undersøkelse og kartlegging av U-864 i 2025*. Foreløpig rapport, 2025.
- [14] *Encyclopedia of Explosives and Related Items*, Volume 1–10, Picatinny Arsenal, USA, 1960–1983.
- [15] *Dictionary of Explosives, Ammunition and Weapons (German Section)*, Picatinny Arsenal Technical Report No. 2510, USA, 1958.

-
-
- [16] T. M. Klapötke, *Energetic Materials Encyclopedia*, Volume 1–3, De Gruyter, 2021.
- [17] R. Matyáš, J. Pachman, *Primary Explosives*, Springer, 2013.
- [18] R. Meyer, J. Köhler, A. Homburg, *Explosives, Sixth Edition*, Wiley-VCH, 2007.
- [19] *Mine Disposal Handbook*, U.S. Navy Bomb Disposal School, 1945, hentet fra San Francisco Maritime National Park Association: <https://maritime.org/doc/minedisposal/index.php#toc>
- [20] Drachinifel, *German torpedo fuses, how do they work?*, YouTube, ukjent publiseringsdato, tilgjengelig på <https://www.youtube.com/watch?v=ei70qsCWAnw>
- [21] Håvard Hovdet, personlig kommunikasjon, mars 2026
- [22] *Salvage of U864 - Supplementary Studies - Study no. 1: Corrosion*, Report no. 23916-1 revision no. 01, Det Norske Veritas (2008)
- [23] Brit Graver: *Assessment of galvanic corrosion inside firing device in a torpedo detonator in U-864*, Report no.: 2026-3093, Rev. 0, Det norske veritas, 2026
- [24] Brit Graver, personlig kommunikasjon, mars 2026
- [25] *Salvage of U864– Study No. 1: Corrosion*, DNV Report 23916-1, 2008
- [26] F. W. Davies, A. B. Zimmerschied, F. G. Borgardt, L. Avrami, (1976). *The Hugoniot and Shock Initiation Threshold of Lead Azide. The Journal of Chemical Physics*, 64(6), 2295–2302, 1976
- [27] Marc A. Meyers, *Dynamic properties of materials*, John Wiley & Sons, 1994
- [28] V. Bushman, I. V. Lomonosov and K. V. Khishchenko: *Shock Wave Database*, <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/index.php>
- [29] R. F. Trunin, M. Yu. Belyakova, M. V. Zhernokletov, Yu. N. Sutulov, *Shock Compression of Metallic Alloys*, Izv. Akad. Nauk SSSR. Fiz. Zemli 2, 99-106 (1991) [in Russian] (Bull. Acad. Sci. USSR, Physics of the Solid Earth, 1991)
- [30] S. P. Marsh (Ed.), *LASL Shock Hugoniot Data*, Univ. California Press, Berkeley, 1980
- [31] Richard Townsley and Andrew Wood: *TNT Hazard Response & Applicability to Counter-Rocket, Artillery and Mortar*, QinetiQ, Fort Halstead, Sevenoaks, Kent, TN14 7BP, United Kingdom.
- [32] K. S. Vandersall, L. L. Switzer, F. Garcia: *Threshold Studies on TNT, Composition B, and C-4 Explosives using the Steven Impact Test*, 56th Meeting of the Aeroballistics Range Association Houston, TX, United States, 2005.
- [33] K. S. Vandersall, L. L. Switzer, F. Garcia: *Threshold Studies on TNT, Composition B, C-4, and ANFO Explosives using the Steven Impact Test*, 13th International Detonation Symposium Norfolk, VA, United States, 2006.
- [34] P. J. Rae, P. M. Dickson: *Some Observations About the Drop-weight Explosive Sensitivity Test*, *Journal of Dynamic Behavior of Materials* (2021) 7:414–424.

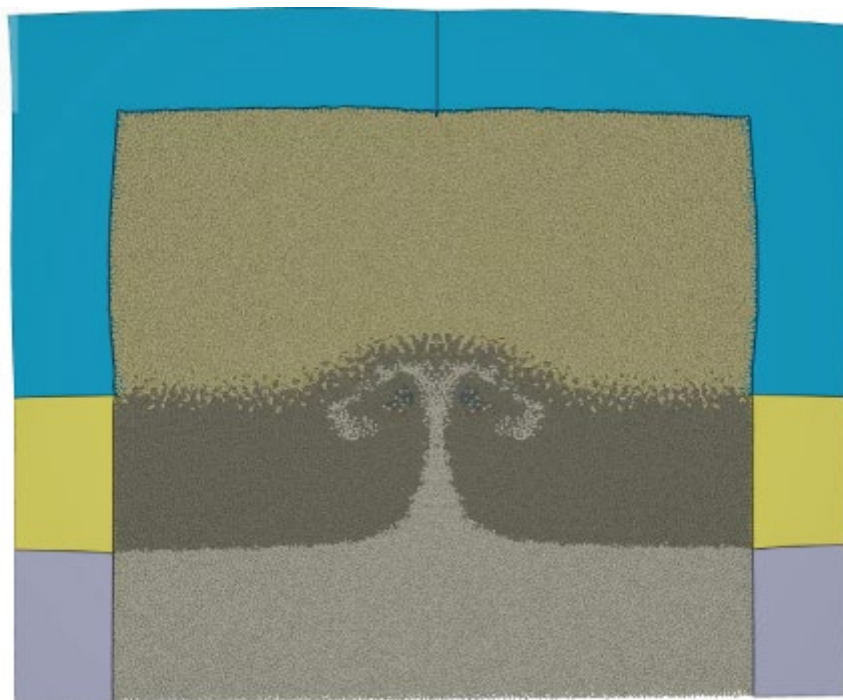
Vedlegg 1 – Detonasjonssimuleringer i Impetus Afea

I dette vedlegget presenteres et utvalg simuleringer utført i Impetus Afea. Alle simuleringene er gjennomført med samme oppløsning, gitt ved:

- kvadratiske heksaedriske elementer med størrelse 1 m.
- SPH-partikler med 0,2 m partikkel-partikkel avstand.
- CFD-celler med størrelse 0,1 m.

Case 1 og 2 nedenfor ble kjørt med noe avvikende materialmodeller, siden endelige materialparametere og relevant sjøbunntykkelse ikke var fastsatt.

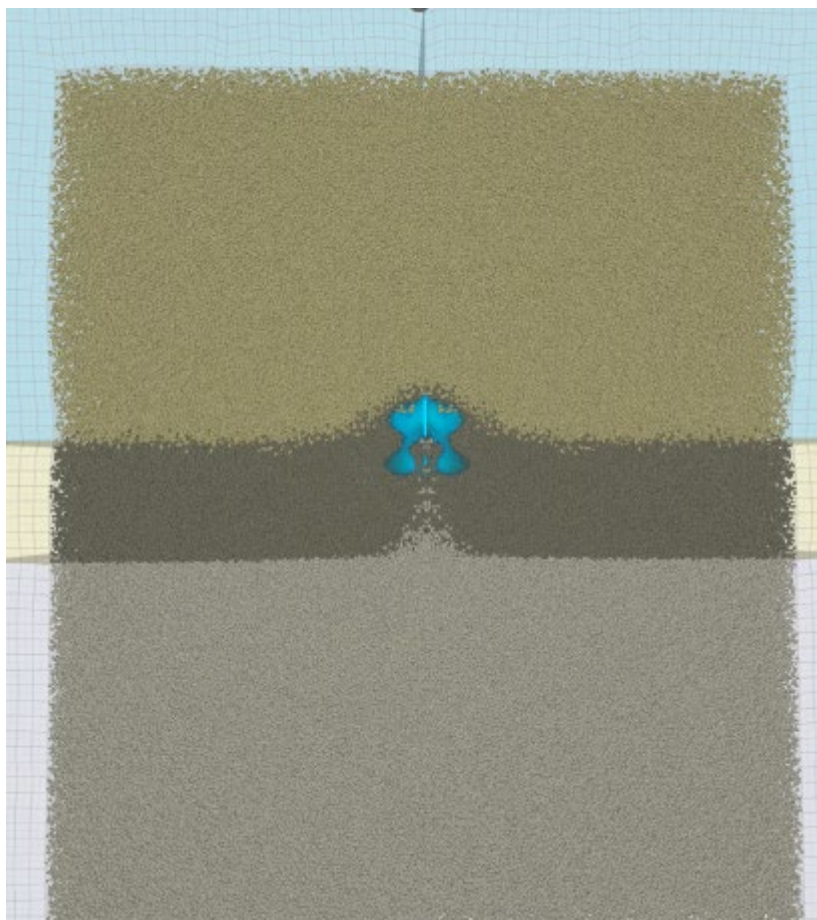
Case 1



Figur V.2.1: Slutttilstand ved detonasjon av 1300 kg TNT. Eksplosivet er begravet under 8 m sand, og sjøbunnen er 8 m tykk. Detonasjonen induserer transport av partikler fra sjøbunn, gjennom overdekning og til vannet. Materialelegenskaper er gitt i tabellen under.

Lag	Materiale	Tykkelse	Tetthet	Bulk-modul	Lydhastighet	Impedans (rho*c)
Sjøbunn	Hardpakket sand	8	2020	1e10	2225	4.5e6
Overdekning	Hardpakket sand	8	2020	1e10	2225	4.5e6
Vann	Vann	15	1000	2.25e9	1500	1.5e6

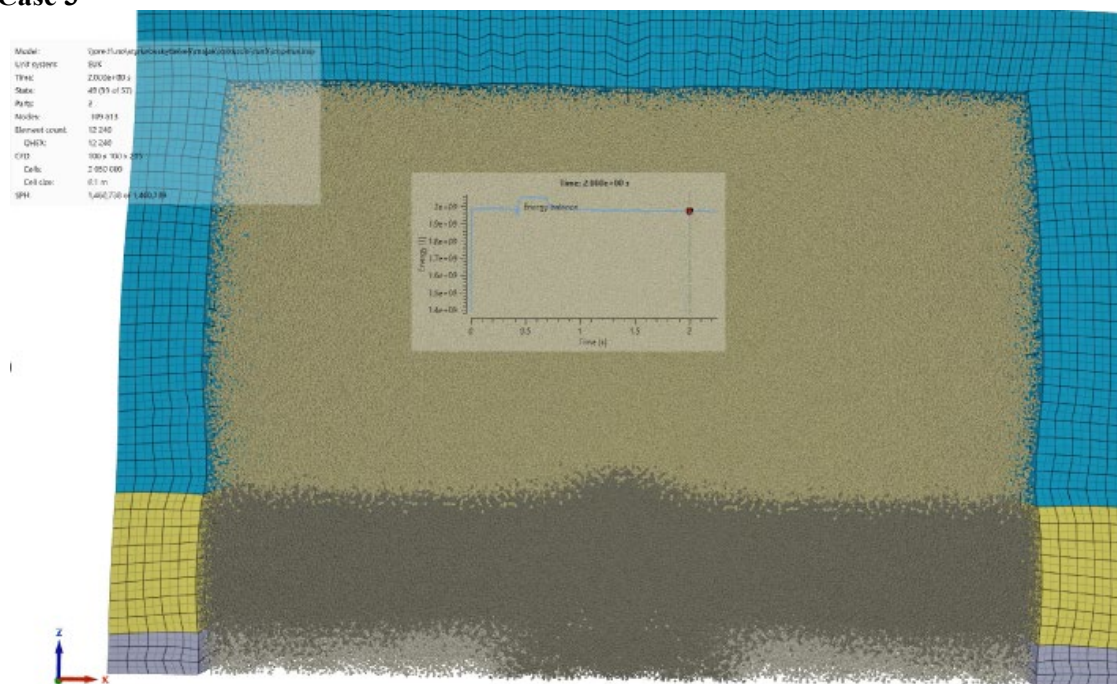
Case 2



Figur V.2.2: Slutttilstand ved detonasjon av 1300 kg TNT. Eksplosivet er begravet under 8 m sand, og sjøbunnen er 25 m tykk. Detonasjonen induserer transport av partikler fra sjøbunn, gjennom overdekning og til vannet. Materialelegenskaper er gitt i tabellen under.

Lag	Materiale	Tykkelse	Tetthet	Bulk-modul	Lydhastighet	Impedans ($\rho \cdot c$)
Sjøbunn	Hardpakket sand	25	2020	1e10	2225	4.5e6
Overdekning	Hardpakket sand	8	2020	1e10	2225	4.5e6
Vann	Vann	25	1000	2.25e9	1500	1.5e6

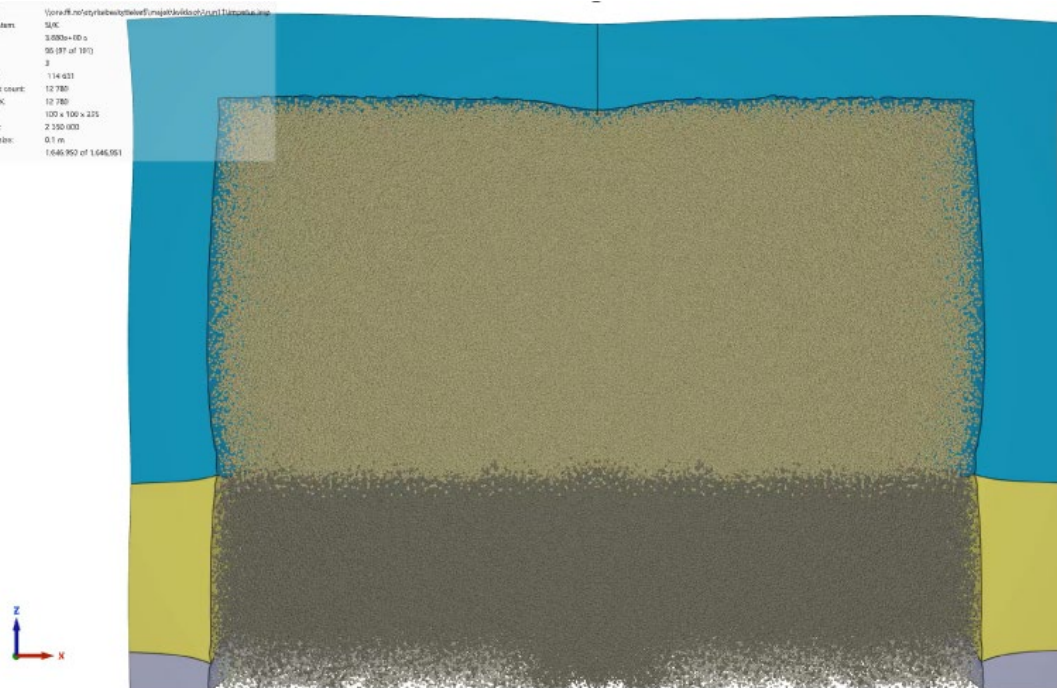
Case 3



Figur V.2.3: Slutttilstand ved detonasjon av 1300 kg TNT. Eksplosivet er begravet under 8 m sand, og sjøbunnen er 2,5 m tykk. Detonasjonen induserer ingen transport av partikler fra sjøbunnen til vannet, fordi detonasjonsboblen kolliderer med fjellet og bryter opp. Materialelegenskaper er gitt i tabellen under.

Lag	Materiale	Tykkelse	Tetthet	Bulk-modul	Lydhastighet	Impedans (rho*c)
Sjøbunn	Leire	2.5	1200	2.6e9	1471	1.8e6
Overdekning	Våt sand	8	2000	6.5e9	1802	3.6e6
Vann	Vann	25	1000	2.25e9	1500	1.5e6

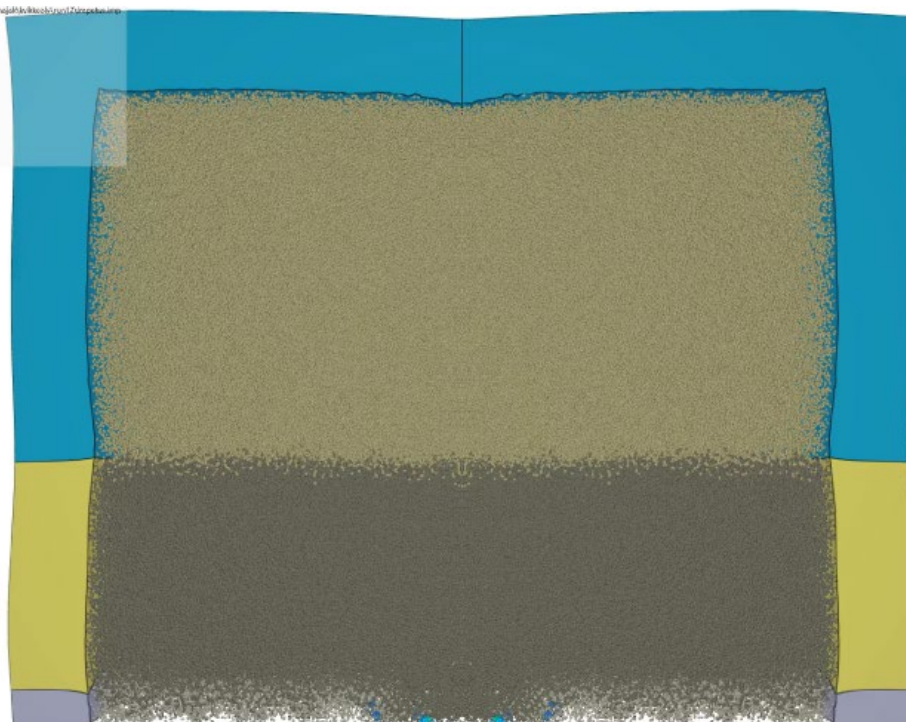
Model: <http://www.fishbase.org/species/10471>
 Unit system: SI/CG
 Time: 3.000e+00 s
 Size: 95 (97 of 190)
 Parts: 8
 Nodes: 114 433
 Element count: 12 780
 CHEK: 12 780
 CD: 100 x 100 x 225
 Cells: 2 350 000
 Cell size: 0.1 m
 SPH: 1.646.950 of 1.646.951



Lag	Materiale	Tykkelse	Tetthet	Bulk-modul	Lydhastighet	Impedans (rho*c)
Sjøbunn	Leire	2.5	1200	2.6e9	1471	1.8e6
Overdekning	Våt sand	11	2000	6.5e9	1802	3.6e6
Vann	Vann	25	1000	2.25e9	1500	1.5e6

Case 5

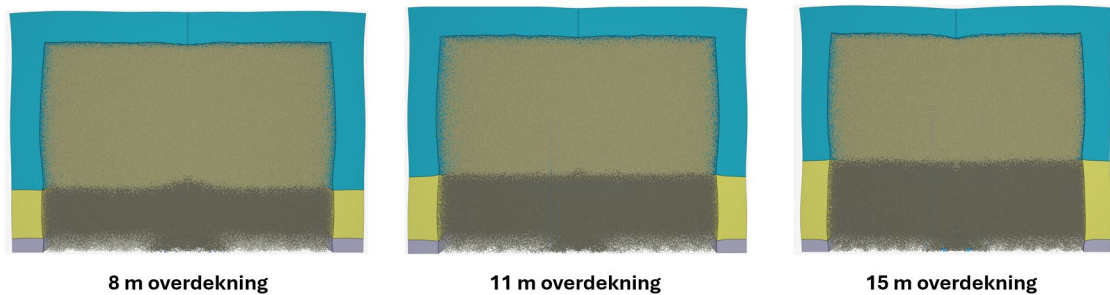
id: 1
 at system: 1000
 nr: 3.042e+00 s
 nr: 05 (05 of 100)
 rbc: 5
 rbc: 121 005
 rbc: 13 500
 rbc: 13 500
 QHEC: 1000 s 1000 s 20%
 D: 2 750 000
 Cell size: 0.1 m
 H: 1,805,232 of 1,805,234



Figur V.2.5: Slutttilstand ved detonasjon av 1300 kg TNT. Eksplosivet er begravet under 15 m sand, og sjøbunnen er 2,5 m tykk. Detonasjonen induserer ingen transport av partikler fra sjøbunnen til vannet, fordi detonasjonsboblen kolliderer med fjellet og bryter opp. Materialelegenskaper er gitt i tabellen under.

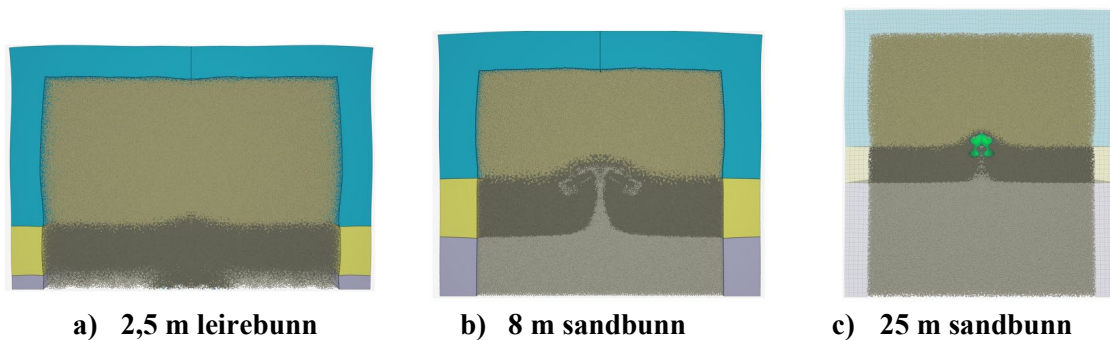
Lag	Materiale	Tykkelse	Tetthet	Bulk-modul	Lydhastighet	Impedans (rho*c)
Sjøbunn	Leire	2.5	1200	2.6e9	1471	1.8e6
Overdekning	Våt sand	15	2000	6.5e9	1802	3.6e6
Vann	Vann	25	1000	2.25e9	1500	1.5e6

Forskjellige tykkelser på overdekning



Figur V.2.6: Slutttilstand etter detonasjon av 1300 kg TNT for ulike overdekningstykkelser. I de tre simuleringene som er vist i figuren, var sjøbunntykkelsen konstant og lik 2,5 m. Det induseres ingen transport av partikler fra sjøbunnen til vannet, fordi detonasjonsboblen kolliderer med fjellet og bryter opp.

Forskjellige tykkelser på sjøbunn



Figur V.2.7: Slutttilstand etter detonasjon av 1300 kg TNT for ulike sjøbunntykkelser. I de tre simuleringene som er vist i figuren, var overdekningstykkelsen konstant og lik 8 m.
a) Ved 2,5 m tykk sjøbunn bryter boblen opp ved kollisjon med fjellet, og det oppstår ingen partikkelstrøm. b) Ved 8 m tykk sjøbunn graver detonasjonsboblen seg ned i sjøbunnen og induserer en partikkelstrøm fra sjøbunnen til vannet. c) Ved 25 m tykk sjøbunn graver boblen seg noe ned og setter opp en mindre partikkelstrøm fra sjøbunnen til vannet.

Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan. Med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

FFIs formål

Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

FFIs visjon

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

FFIs verdier

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.

