

Rapport

Fakultet for medisin og helsevitenskap
Institutt for sirkulasjon og bildediagnostikk

Dekompresjon ved overflateorientert dykking

En videre vurdering

Dekompresjon ved overflateorientert dykking

En videre vurdering

Andreas Møllerløkken, PhD

3/7/2017

Innhold

Sammendrag	3
Executive summary	3
Innledning.....	5
Overflatedekompresjon innen petroleumsnæringen i Norge.....	6
Kort om den norske dykke- og behandlingstabellen.....	6
Kort om Navy Experimental Diving Unit, NEDU	7
Møte med U.S. Navy.....	7
U.S. Navy rev 6	8
Siste dekompresjonsstopp	11
Sannsynlighet for TFS	15
Datainnsamling.....	18
Revisjon 7 av U.S. Navy Diving Manual	18
Kort sammenligning av U.S. Navy dykketabell og NDBT (3. utg).....	20
Mer om sannsynlighet for TFS.....	21
Validering av dekompresjonstabeller.....	23
Trykkfallssyke (TFS).....	23
Måling av gassbobler ved hjelp av ultralyd	24
Copernicus.....	25
Total dekompresjonstid.....	26
18 meter, 70 og 120 min bunntid.....	28
24 meter, 40 og 70 min bunntid.....	29
30 meter, 30 og 50 min bunntid.....	30
36 meter, 25 og 40 min bunntid.....	31
48 meter, 15 og 30 min bunntid.....	32
Sannsynlighet for TFS for utvalgte dybder og bunntider	33
18/70 og 18/120	34
24/40 og 24/70	35
30/30 og 30/50	36
36/25 og 36/40	37
48/15 og 48/30	38
Erfaringer gjort av Försvarsmakten i Sverige	39

Trenger vi endret fokus?	42
Hvor er vi på vei?	42
Sluttkommentar	44
Referanser	46

Sammendrag

To tidligere PTIL rapporter har identifisert kortere dekompresjonstider i de norske dykke- og behandlingstabellene sammenlignet med andre, internasjonalt anerkjent dykketabeller. Spesiell oppmerksomhet har vært knyttet til revisjon seks av U.S. Navy Diving Manual.

På bakgrunn av dette ble det gjennomført et møte med U.S. Navy (USN) for nærmere diskusjoner om blant annet total dekompresjonstid, sannsynlighet for trykkfallssyke, stoppdypde for siste dekompresjonsstopp og bruk av oksygen på dekompresjon. USN understreker at det i revisjon seks er etablert dekompresjonstider når man benytter luft som pustegass gjennom hele dykket, som ikke står i stil til den beskjedne reduksjonen i sannsynlighet for trykkfallssyke dette medfører. Dekompresjonstider og estimater for sannsynlighet for trykkfallssyke er satt opp for å illustrere dette forholdet.

I revisjon seks har USN endret dybden for siste dekompresjons stopp fra tidligere tre meter (10 fot) til seks meter (20 fot); denne endringen er operasjonelt bestemt. For å redusere sannsynligheten for trykkfallssyke gjennomgående i sine prosedyrer, har USN innført oksygen under dekompresjon for alle dykk som krever mer enn 15 min dekompresjon. Alle dekompresjoner som er lengre enn 30 min, skal gjennomføres som overflatedekompresjon med oksygen.

I Sverige har Försvarsmakten gjennomført en rekke utprøvinger i 2015 relatert til revisjon seks av U.S. Navy Diving Manual. I rapporten er det beskrevet nærmere hva disse utprøvingene har vært rettet mot, og hvilke erfaringer man har gjort seg.

Til slutt i rapporten blir det kort kommentert hvorfor det fremdeles er viktig med fortsatt kunnskapsinnhenting for å underbygge og øke både forståelse og kunnskap knyttet til fortsatt trygg og sikker overflateorientert dykking. Kontinuitet i kunnskapsbygging vil være overførbart til bemannede undervannsoperasjoner også utenfor PTILs virkeområde.

Executive summary

Two former reports from the Norwegian Petroleum Safety Authorities have identified shorter decompression times in the Norwegian diving and treatment tables compared with others, internationally renowned dive tables. Particular attention has been linked to audit six of U. S. Navy Diving Manual.

On this basis, a meeting was held with U. S. Navy (USN) for further discussions on i. a. total decompression time, the probability of decompression sickness, stop depth for last decompression stops and the use of oxygen in decompression. USN underlines that the audit six have established total decompression times when using air as breathing gas

throughout the dive that only gives modest reductions in the probability of decompression sickness. Selected total decompression times and estimates of the probability of decompression sickness have been put into tables to illustrate this relationship.

In audit six of the U.S. Navy Diving Manual, USN have changed the last decompression stop depth from former three metres (10 feet) to six metres (20 feet); this change is based on operational demands. To reduce the probability of decompression sickness consistently in its procedures, the USN introduced oxygen during decompression for all dives that require more than 15 min of decompression. All decompressions that is longer than 30 min will be implemented as surface decompression using oxygen.

In Sweden, the Swedish Armed Forces (Försvarsmakten) have conducted a series of experimental trials in 2015 related to audit six of the U. S. Navy Diving Manual. The report describes what these trials have been aimed at, and what experiences they have made themselves.

Finally, the report comment on why it is important to continue the acquisition of knowledge to support and increase the understanding and knowledge related to the continued safe and secure activity of surface supplied diving. Continuity in building knowledge will be transferable to manned underwater operations also outside the PSA scope.

Innledning

To tidligere rapporter initiert av Petroleurstilsynet (PTIL), Alf O. Brubakks rapport "God reise hjem" ¹ og rapport fra NUI v/ Kåre Segadal "Sammenligning av dekompresjonstabeller for overflateorientert dykking" ² har vist at de norske dykke- og behandlingstabellene (NDBT) angir til dels betydelig kortere dekompresjonstider enn hva sammenlignbare dekompresjonstabeller gjør. Spesiell oppmerksomhet har vært rettet mot revisjon seks av U.S. Navy Diving Manual, og PTIL har stilt spørsmål ved om det kan ligge for stor usikkerhet i NDBT.

Det ble senere berammet et møte i Norsk Olje og Gass sitt nettverk for undervannsentreprenører den 24. november 2015, hvor tema var resultatene i NUI rapport 2014-01 ². Det kom fram på dette møtet at industrien ikke så utfordringer knyttet til bruken av NDBT når den brukes i sammenheng med NORSOK U-100/103. PTIL ønsket likevel utdypende førstehåndsinformasjon både fra U.S. Navy og fra erfaringer gjort hos Forsvarsmakten i Sverige, for å undersøke konklusjonene i rapportene fra Alf O. Brubakk og Kåre Segadal videre.

Med denne bakgrunn ble det inngått en kontrakt mellom NTNU og PTIL for å frembringe ytterligere kunnskap om hvordan NDBT er sammenlignet med revisjon seks av U.S. Navy Diving Manual.

Til orientering: 1. desember 2016 ble revisjon 7 av U.S. Navy Diving Manual publisert. Revisjon 7 er ikke tatt med i drøftinger i denne rapporten.

Overflatedekompresjon innen petroleumsnæringen i Norge

Bemannende undervanns-operasjoner innen petroleumsrelaterte virksomhetsområder, er regulert gjennom Norsok U-103 for arbeid som foregår innaskjærs³, og gjennom U-100⁴ for arbeid som foregår offshore. For overflateorientert dykking skal dykkingen foregå etter NDBT. Volumet av slik dykking offshore er rapportert å være svært lavt; i 2015 var det rapportert 17 manntimer⁵. Rapporterte hendelser er dermed også naturlig nok lite; siste trykkfallssyke (TFS) var rapportert inn i 1999.

Kort om den norske dykke- og behandlingstabellen

Den norske dykke- og behandlingstabellen har sitt utgangspunkt i Royal Navy tabell 11. Denne ble tilpasset av Arne Johan Arntzen og Svein Eidsvik ved å redusere oppstigningshastigheten fra Royal Navy, samt at de la restriksjoner på lengre dekompresjoner i sjø. Per i dag benyttes en fjerde revisjon av NDBT som ble sluppet den 15. januar 2017.

Tabellene har, til tross for sine revisjoner og gode erfaringsgrunnlag, aldri vært gjenstand for noen validering. Sikkerheten i norsk tabell er dermed basert på erfaring, og vi har ingen egen regnemodell for det norske tabellverket. Det eksisterer heller ingen database med innsamlet materiale å bygge videre på. Tabellen er anerkjent og blir referert til av offentlige instanser. Operatørene innen Norsk olje og gass (NOROG) har per i dag, når de benytter TFS som endepunkt for sikkerheten i en tabell, ingen problemer med NDBT slik den benyttes sammen med NORSOK U-100/103.

Kort om Navy Experimental Diving Unit, NEDU

Navy Experimental Diving Unit, NEDU, er hovedsenteret til U.S. Navy for utvikling, testing og evaluering av dykke-relaterte og hyperbare tjenester. I tillegg utføres forskning og utvikling innen biomedisinske problemstillinger, samt innenfor omgivelsesfysiologi. Rådene som kommer fra denne enheten, gis videre til den amerikanske marines øverste ledelse for å støtte operasjonelle behov. NEDU har som visjon å være den mest anerkjente leverandøren av forskning, testing og utvikling innen dykking ment for militær aktivitet. Med historie tilbake til 1927, er de i dag anerkjent for å være nettopp det visjonen deres uttaler. For ytterligere informasjon,

se: <http://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/SUPSALV/NEDU/faceplate-v7n1apr03p4-5.pdf>

Møte med U.S. Navy

Et møte ble arrangert ved NEDU sin base i Panama City, Florida, USA. Olav Hauso, John Arne Ask og Bjarne Sandvik representerte PTIL, Andreas Møllerløgken representerte NTNU, og NEDU var representert med Wayne A. Gerth, David Doolette og Keith Gault.

Hensikten med møtet var å få diskutert inngående den til da siste revisjonen av de amerikanske dykketabellene, revisjon seks. I det følgende er momenter som dybde for siste dekompresjonsstopp, sannsynlighet for TFS, datainnsamling og videre revisjonsarbeid av U.S. Navy Diving Manual diskutert, i tillegg til selve bakgrunnen for revisjon seks.



Fra venstre: Bjarne Sandvik, Olav Hauso, John Arne Ask og Andreas Møllerløyken

U.S. Navy rev 6

Revisjon seks av U.S. Navy Diving Manual ble publisert i 2008⁶. Revisjonen kom i stand som følge av flere sammenfallende faktorer. U.S. Navy erkjente å ha hatt utfordringer med noen TFS på lange, dype dykk. I tillegg var det et sterkt ønske innad i U.S. Navy om å få sammenstilt en tabell som kunne benyttes i hele flåten. I forkant av revisjon 6, hadde U. S. Navy tre dykke-tabeller; dykkemanualen standard luft tabell, egen tabell for overflatedekompresjon med oksygen (OD-O2) samt egen tabell med overflatedekompresjon med bruk av luft. Alle disse tabellene hadde opprinnelse på 1940- og 1950-tallet, og hadde alle noe ulike beregningsgrunnlag. Dette resulterte for eksempel i forskjellige dybder og bunntider mellom tabellene. For eksempel gikk OD-O2 tabellen kun til 170 fot, mens luftdykketabellen gikk til 190 fot. U.S. Navy ville gjennom revisjon seks få ett sett med tabeller som kunne være konsistente, og som kunne muliggjøre planlegging av dykk etter tabell, uavhengig av om man skulle dykke standard luft, bruke oksygen i vannet eller dykke med overflatedekompresjon.

Et annet ønske kom som følge av utviklingen av en håndholdt computer i U.S. Navy. Computeren ble utviklet parallelt med en overflateenhet (dykkermonitor) som dykkerleder benytter. Ingen av de eldre tabellene var egnet for kontinuerlig beregning av dekompresjonsprofiler slik man gjør i en computer, og det var og i noen tilfeller stor usikkerhet knyttet til hvordan noen av tabellene ble beregnet i utgangspunktet.

Et tredje argument for revisjon seks, var ønsket om å kunne benytte oksygen på dekompresjon i vann for på den måten å redusere sannsynligheten for TFS. U.S. Navy ville promotere bruk av oksygen på alle dekompresjoner som krevde mer enn 15 minutter dekompresjon i vann. Noe slikt var ikke å finne i de tidligere tabellene, og dette ble bindeleddet mellom de korte luft-tabellene (dekompresjon < 15 minutter) og de lengre OD-O2 tabellene (dekompresjon > 30 min).

Revisjon 6 ble med andre ord ikke utviklet som en følge av noe usikkerhet med tanke på sannsynlighet for TFS i tabellen, men som et behov for å få en tabell som var uniform for alle dykkerne deres. For å få til dette, var det nødvendig å ha en anerkjent algoritme som utgangspunkt. U.S. Navy bruker algoritmen fra Thalmann, som er validert gjennom flere år, både gjennom rene matematiske beregninger, men også gjennom mange forsøksdykk. Algoritmen tar som utgangspunkt at kroppen tar opp inertgass (fortrinnsvis nitrogen) på en eksponentiell måte under kompresjon, og kvitter seg med gassen ved en lineær utvasking under dekompresjon. For å prøve ut algoritmen, har de utviklet flere parameter-sett. Disse parametersettene kan sees på som grensebetingelser for selve modellen. For revisjon 6 er det parametersettene som er betegnet VVal-18 og VVal-18M som ligger inne. Et tredje parametersett er også utviklet, og omtales senere i rapporten.

Parametersettet VVal-18 ble utviklet for å gi konstant partialtrykk oksygen under dykking med luft og nitrox. Dette parametersettet gav tilfredsstillende resultater, men fikk veldig lange dekompresjoner med luft (se ⁷). For å redusere dekompresjonstiden, ble parametersettet modifisert, og det fikk da navnet VVal-18M. VVal-18M gir generelt kortere dekompresjonsstopp enn tilsvarende tabell som benytter parametersettet VVal-18; dette var hovedintensjonen med utviklingen av VVal-18M. Modifiseringen av parametersettet skjer på en bekostning av sannsynlighet for TFS, som blir noe høyere med kortere dekompresjonstider. Med andre ord, å velge mellom VVal-18 og VVal-18M luft prosedyrer innebærer kompromisser. VVal-18 luft prosedyrer baserer seg på en konsistent bruk av Thalmann-algoritmen for alle dykk. Dette resulterer i lange dekompresjoner, med noe lavere sannsynlighet for TFS. VVal-18M prosedyrene ligger mellom de gamle U.S. Navy prosedyrene og de gitt av VVal-18, men på bekostning av «trofasthet» til algoritmen og med tidvis noe forhøyet sannsynlighet for TFS (se tabeller senere i rapporten).

Etter sammenligninger mellom VVal-18 og VVal-18M sammen med den gamle USN56, er anbefalingene fra U.S. Navy at man enten skal benytte luft som pustegass på dykket, men dekomprimere med oksygen, eller gjøre overflatedekompresjon med oksygen ⁷. Kun luft gjennom hele dykket er ikke like bra siden det gir lange dekompresjonstider som ikke gir tilsvarende reduksjoner i sannsynlighet for TFS. Da er det bedre å bruke de eldre tabellene (USN56).

U.S. Navy erkjenner at de lange dekompresjonstidene man får når man benytter luft som pustegass, ikke gjenspeiles i en vesentlig reduksjon av sannsynlighet for TFS. En vesentlig reduksjon i sannsynlighet for TFS oppnås ved å benytte oksygen på dekompresjon.

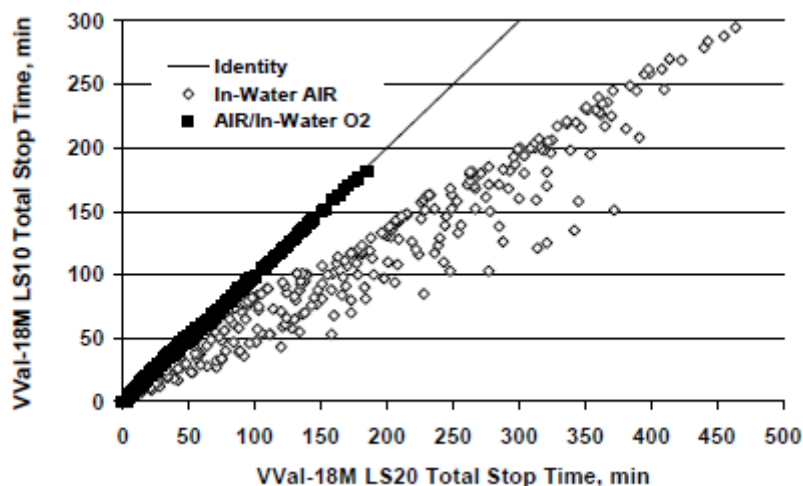
Siste dekompresjonsstopp

En vesentlig endring i revisjon 6 av U.S. Navy sin dykketabell, er at siste dekompresjonsstopp i vann er flyttet fra tidligere tre meter, til nå seks meter (eller mer korrekt, fra 10 fot til 20 fot). Dette er gjort med bakgrunn i ønsker fra operasjonelle enheter hos U.S. Navy, og er ikke innført med tanke på redusert sannsynlighet for TFS.

Veien tilbake til overflaten ønskes i utgangspunktet så kort som mulig for alle dykkere. Tid brukt på dekompresjon er av enkelte sett på som et nødvendig onde. Det er nødvendig å la kroppen kvitte seg med overskuddet av inert-gasser (i all hovedsak nitrogen) den har tatt opp underveis i dykket. Gradienten som bygges opp, øker på vei mot overflaten. Det betyr at man «puster ut» mest effektivt på de grunnere dekompresjonsstoppene. At U.S. Navy nå har innført siste stopp i vann på seks meter, går dermed på bekostning av den større utvaskingsgradienten for nitrogen man har på tre meter. For å oppnå den samme effekten, må tiden på seks meter økes. Dette er med på å forlenge total dekompresjonstid.

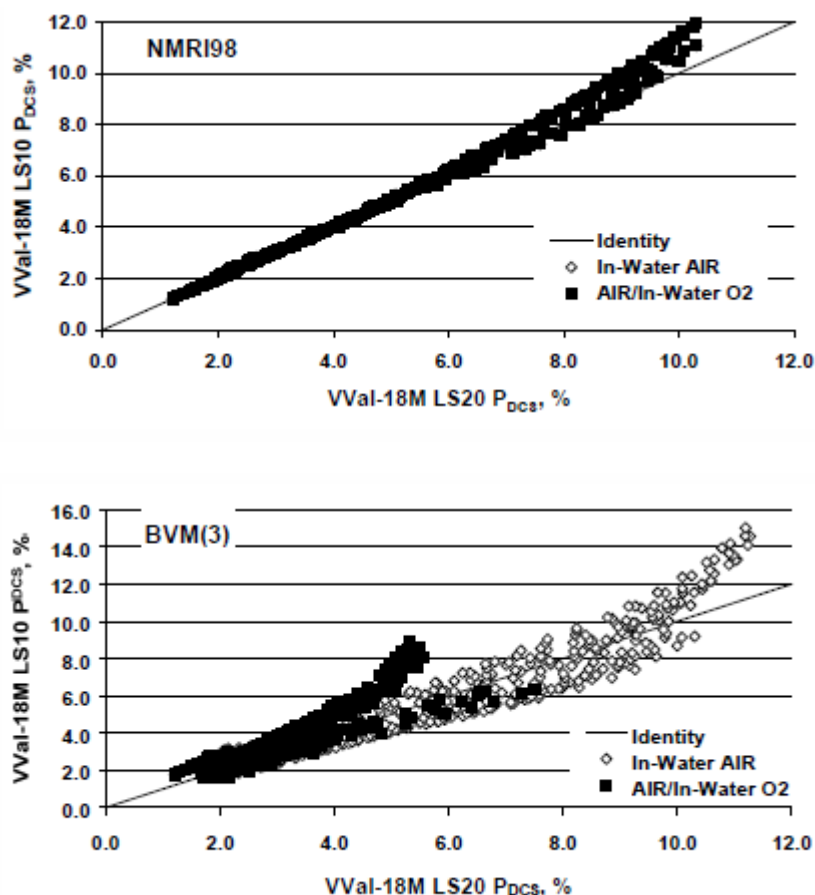
Det å kunne ta siste stopp på seks meter har flere operasjonelle fordeler, men det går som sagt på bekostning av den større utvaskingsgradienten man ville hatt om man foretok det siste dekompresjonsstoppet på tre meter. Nok en gang er det hensynet til det å bruke oksygen på dekompresjon som tillegges vekt.

Figur 1 viser total dekompresjonstid om man benytter parametersettet VVal-18M og gjennomfører siste dekompresjonsstopp på seks- eller tre meter (20 fot eller 10 fot). De åpne firkantene indikerer total stopptid om man benytter luft under hele dekompresjonen, mens de fylte markørene viser total stopptid om man benytter oksygen på dekompresjon. Identitetslinja indikerer hvor total stopptid ville ligget om total stopptid ville vært identisk mellom siste stopp på tre- og seks meter. Man ser at et dykk som for eksempel vil kreve 200 min total stopp-tid om man stopper på seks meter, vil kreve et sted mellom 100 og 150 min total stopptid om man tar siste stopp på tre meter. Videre viser figuren effektene av å benytte oksygen på dekompresjon, ved at total stopptid reduseres selv om siste stopp er på seks meter.



Figur 1. Total stopptid ved å endre siste dekompresjonsstopp fra seks meter til tre meter (20 fot til 10 fot). Hentet fra, og gjengitt med tillatelse fra Gerth og Doolette 2007 ⁷. Identitetslinja illustrerer hvor stopptidene hadde ligget om de hadde vært identiske for om man stopper på seks meter (x-aksen) eller om man stopper på tre meter (y-aksen). De hvite firkantene illustrerer total stopptid når det benyttes luft på dekompresjon, og siste stopp er på seks meter.

Hvordan virker dette på sannsynlighet for TFS? Det kan illustreres med figur 2 og figur 3, som er hentet fra Gerth og Doolette ⁷. Figur 2 viser sannsynlighet for TFS etter beregningsmodellen NMRI98, og figur 3 viser de samme beregninger etter bruk BVM (3) modellen. For detaljer rundt de spesifikke modellene, se ⁸ for NMRI98 samt ⁹ og ¹⁰ for BVM(3).



Figur 2 & 3. Effekt av å endre siste dekompresjonsstopp fra seks meter til tre meter på sannsynlighet for TFS ved bruk av NMRI98 og BVM(3). Gjengitt med tillatelse fra Gerth og Doolette⁷. I figur 2 overlapper prosedyrene med luft og oksygen, men ved å holde siste stopp på seks meter klarer de å ha alle profilene sine (også de eksepsjonelle) innenfor en sannsynlighet for TFS på 10%. Figur 3 viser samme beregning ved bruk av boble-volum modellen som gir litt større spredning i resultatene. Men illustrerer at man med bruk av oksygen holder alle profiler til en sannsynlighet for TFS til under 10 %.

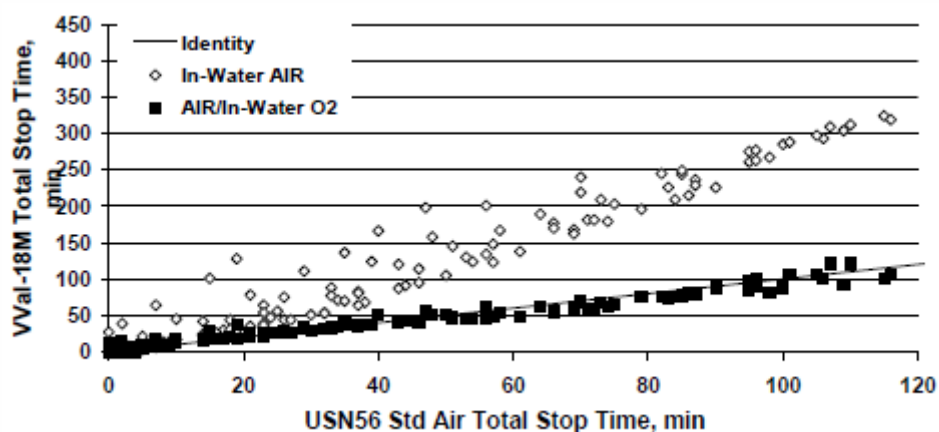
Figur 1 viser vesentlige forskjeller i total stopp tid, men man ser av figur 2 og 3 at det er små forskjeller i beregnet sannsynlighet for TFS om man sammenligner siste stopp på tre eller seks meter. Sammenlignet med tilsvarende tid og dybde-kombinasjoner i U.S. Navy Standard Air Decompression Table (USN56) (revisjon fem), så er beregningene for sannsynlighet for TFS betydelig lavere ved bruk av oksygen på dekompresjon enn bare med bruk av luft i revisjon fem. Men siden beregninger av sannsynlighet for TFS med bruk av VVal-18 og VVal-18M med luft som pustegass ikke viser særlige endringer annet enn betydelig lengre totale stopptider, anbefales ikke disse luftprosedyrene.

Videre viser de med sine beregninger, at om forholdene tillater det, så bør man ha siste dekompresjonsstopp på tre meter og ikke på seks meter om man kun benytter luft som pustegass.

Siste dekompresjonsstopp på seks meter er innført etter operasjonelle krav i U.S. Navy. Om man dykker kun med luft medfører dette betydelig lengre dekompresjonstider, enn om man har siste stopp på tre meter. Om forholdene tillater det, anbefaler derfor U.S. Navy at man tar siste dekompresjonsstopp på tre meter.

Sannsynlighet for TFS

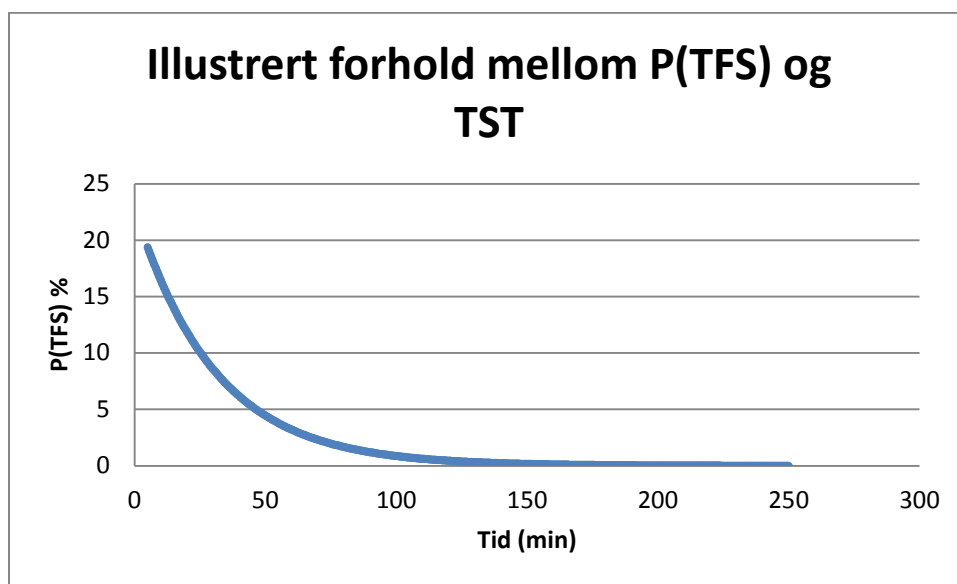
Fra NUI rapport 01-14² er det vist til at den beste enkelt-parameteren til bruk ved vurdering av sikkerhet i tabeller, er total dekompresjonstid. Herunder at jo lengre dekompresjon, desto mer konservativ og sikker vil en prosedyre være. I det videre er begrepene total dekompresjonstid og total stopptid benyttet for å betegne tiden det tar for en dykker å forlate bunnen og til han er tilbake på overflaten. Figur 4 viser total stopp tid fra den tidligere versjonen av U.S. Navy Diving Manual (USN56) og total stopp tid etter bruk av parametersettet VVal-18M i revisjon seks. VVal-18M luft/O2 tabellen legger seg på identitetslinja med USN56 tabellen. Videre ser man at VVal-18M luft tabellen er generelt lengre enn den gamle USN56 tabellen, tidvis med ganske store marginer.



Figur 4: Total stopp tid med VVal-18M på luft og VVal-18M luft med O2 på dekompresjon mot total stopp tid på den forrige U. S. Navy tabellen (USN56)⁷. Gjengitt med tillatelse. Ved bruk av kun luft på dekompresjon (de hvite firkantene) er total stopptid betydelig lengre sammenlignet med identitetslinja for forrige versjon av den amerikanske dykketabellen. Ved å benytte oksygen på dekompresjon, de svarte firkantene, ser man at total stopptid legger seg på identitetslinja.

Utviklingen av parametersettene til Thalmann-algoritmen bak revisjon 6 av U.S. Navy's dykketabell, ble gjort gjennom verifiserende testing ved NEDU. Men, verken tabellen som baserer seg på VVal-18 eller VVal-18M har vært gjenstand for gjennomgående verifisering slik de har hatt tradisjon for å gjøre tidligere i U. S. Navy med omfattende mann-tester. For å evaluere tabellene, har de i stedet beregnet sannsynlighet for TFS for hver profil ved hjelp av to sannsynlighets-modeller for TFS og tid til symptomdebut, nemlig NMRI98 og BVM(3). For mer informasjon om disse, henvises leseren til¹¹,⁹ og¹⁰.

Når man ser på sikkerheten i en tabell, er det to faktorer som må vurderes i forhold til hverandre; total dekompresjonstid, og sannsynlighet for TFS. Uavhengig av hvordan man dekomprimerer, vil sannsynlighet for TFS øke med økende bunntid og dybde. En tabell med én sannsynlighet for TFS for alle tid/dybde-kombinasjoner vil derfor ikke være mulig. Men hva som er anerkjent og dermed akseptabelt, må være opp til hvert enkelt miljø å definere. Det er i så måte viktig å ha en formening om i hvilket område av sannsynlighetsskalaen man opererer med. Samtidig er det også viktig å reflektere over at sannsynligheten aldri kan bli null. Forholdet mellom sannsynligheten for TFS og total stopp-tid er illustrert i figur 5.

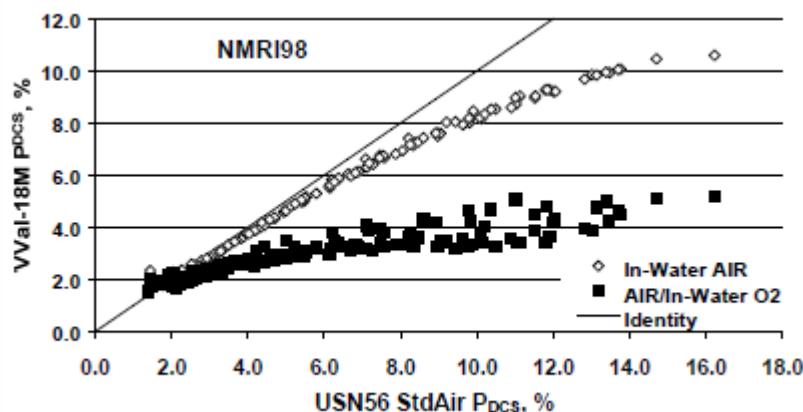


Figur 5. Illustrert forhold mellom sannsynlighet for TFS ($P(TFS)$) og total stopp tid (TST) angitt i minutter.

Figur 5 viser at det er et tilnærmet eksponentielt forhold mellom tid nødvendig til dekompresjon og sannsynlighet for TFS. Figuren illustrerer at om man skal redusere denne sannsynligheten, må man øke tid til dekompresjon ganske betraktelig. Dermed må man alltid gjøre vurderingen om den ekstra tiden i vannet er verdt reduksjonen i sannsynlighet for TFS opp mot de andre faktorene som da vil gjøre seg gjeldende for dykkeren (for eksempel termisk balanse og hydreringsstatus). Man kan selvfølgelig også snu på dette argumentet og si at man skal begrense bunntiden, og her må det i tilfelle vurderes hva som er formålstjenlig.

Når man sammenligner sannsynlighetene for TFS så ser man at både ved å bruke parametersettet VVal-18M luft og parametersettet VVal-18M luft/O₂ holder man seg under identitetslinja sammenlignet med USN56 tabellen (figur 6). Dette betyr at sannsynlighetene for TFS er lavere i rev 6 enn den var i USN56. Den reduserte sannsynligheten for TFS er spesielt merkbar der man introduserer oksygen på dekompresjon. Også for de profilene hvor man benytter luft på hele dekompresjonen ligger sannsynlighetene lavere enn i den gamle

tabellen, men det er her riktig å påpeke at for brorparten av dykkeprofilene som da ligger innenfor de akseptable grensene for sannsynlighet for TFS (inntil 5%) så er det i praksis ingen forskjell – altså ingen reduksjon i sannsynlighet for TFS.



Figur 6. Sannsynlighet for TFS beregnet med parametersettet VVal-18M mot sannsynlighet for TFS beregnet fra USN56⁷. Gjengitt med tillatelse. Med bruk av luft under dekompresjon (de åpne/hvite firkantene) ligger beregningene omtrent likt med identitetslinja. Ved bruk av oksygen (de svarte boksene) reduseres sannsynligheten for TFS betydelig i forhold til identitetslinja.

I den tidligere U.S. Navy tabellen (USN56) var sannsynlighet for TFS på rundt 5% så lenge stopptidene var under 30 min. Dette er videreført i revisjon seks, hvor U. S. Navy aksepterer en sannsynlighet for TFS på 5% for normale dykk. For eksepsjonelle eksponeringer er akseptabel sannsynlighet for TFS satt til 10%. For parametersettet VVal-18 hvor det benyttes oksygen på dekompresjon, er sannsynlighetsestimatene for TFS for det meste under 5%. Og da de modifiserte parametersettet, viste også de nye beregningene at sannsynlighet for TFS var identisk, og litt lavere, enn estimatene for parametersettet VVal-18. For nærmere detaljer, se ⁷.

Tabellene i revisjon 6 er ikke testet ved hjelp av mann-dykk slik tidligere praksis har vært i U.S. Navy. I stedet blir sannsynlighet for TFS beregnet. For normale eksponeringer er akseptabel sannsynlighet for TFS satt til 5%, for eksepsjonelle eksponeringer er akseptabel sannsynlighetsgrense satt til 10%.

Datainnsamling

For å kunne vurdere godhet i dykketabeller, er tilgang på gode og robuste data et viktig moment. Når en tabell/prosedyre er under utvikling hos U. S. Navy, foregår alt av simuleringer og testdykking ved NEDU. Men så fort tabellen/prosedyren er godkjent og sendt ut til hele U.S. Navy, får de ingen systematisk tilbakemelding til NEDU. Man antar at om det skulle oppstå utfordringer relatert til prosedyren/tabellen, så vil NEDU få en tilbakemelding på dette.

PTIL har en egen dykkedatabase, DSYS, hvor aktiviteter rapporteres inn på et årlig grunnlag. Denne databasen henter data kun fra offshore-relatert dykking. For inshore dykking som ligger utenfor PTILs virkeområde, finnes ingen slik oversikt. Under møtet med U.S. Navy fremgikk det at et slikt system heller ikke finnes i U.S. Navy. Med sitt omfang og aktivitet, med blant annet rundt 4000 aktive dykkere (Wayne Gerth, NEDU, personlig meddelelse), ville man kunne etablert en stor database innen kort tid. U.S. Navy fant PTIL sin måte å registrere på som interessant, men har ingen pågående initiativer for å få etablert noe tilsvarende hos seg.

Revisjon 7 av U.S. Navy Diving Manual

Det har i etterkant av revisjon 6 av U.S. Navy Diving Manual blitt utarbeidet et nytt parametersett, VVal-79. I arbeidet med revisjon seks kom det fram at bruk av parametersettene VVal-18 og VVal-18M resulterte i lengre ikke-dekompresjonsgrenser enn hva man hadde fra den tidlige dykketabellen som har vært konstant i U.S. Navy's dykkemanual fra 1959 og helt fram til revisjon 6 ble sluppet i 2008. Utprøving av disse lengre ikke-dekompresjonsgrensene førte imidlertid til flere alvorlige tilfeller av TFS, noe som ikke var akseptabelt. Dette gjorde sitt til at U.S. Navy løste utfordringene rent praktisk ved å beholde ikke-dekompresjonsgrensene fra den gamle tabellen på de profilene som nå ville tillate lengre ikke-dekompresjonsgrenser. På den måten gikk U.S. Navy bort fra en konsistent bruk av Thalmann-algoritmen. Utviklingen av VVal-79 har gjort at U.S. Navy igjen kan benytte Thalmann algoritmen gjennomgående. Nye ikke-dekompresjonsgrenser er utarbeidet, og VVal-79 skal også benyttes i den dykkecomputeren og dykkeplanleggeren som U.S. Navy har utviklet. Dermed har U.S. Navy igjen fått et parametersett som kan benyttes i alle dykke-operasjonene de gjennomfører, som baserer seg på en konsistent bruk av Thalmann-algoritmen. Dette vil bli implementert i neste revisjon av U.S. Navy sin tabell. For utfyllende detaljer rundt VVal-79, se ¹².

U.S. Navy Diving Manual Revision 7 ble utgitt den 01.12.2016. Det har ikke vært anledning til å gå nærmere inn i denne i forbindelse med den foreliggende rapporten.

Nedenfor er de viktigste punktene fra møtet med U.S. Navy oppsummert.

- Revisjon 6 kom som følge av flere faktorer, men sannsynlighet for TFS var ikke en av faktorene.
- U.S. Navy ville innføre oksygen på dekompresjon på dykk med lang dekompresjon (dekompresjon >15 min).
- For alle dykk med dekompresjon > 30 min skal man benytte overflatedekompresjon med oksygen.
- Innføring av siste dekompresjonsstopp på seks meter var et operasjonelt krav; om forholdene tillater det anbefaler de likevel å gjennomføre siste stopp på tre meter så lenge man benytter luft på dekompresjon.
- Total dekompresjonstid må alltid vurderes sammen med sannsynlighet for TFS.
- Sannsynlighet for TFS øker med økende bunntid og dybde.
- U.S. Navy erkjenner at de lange dekompresjonstidene på luft ikke gir vesentlig endringer i sannsynlighet for TFS. Sannsynlighet for TFS reduseres ved å innføre O2 på dekompresjon.
- NEDU får ingen tilbakemeldinger fra de operative miljøene, med mindre det oppstår problemer – altså ingen systematisk datainnsamling per i dag.
- Utgangspunktet for tabellen var en akseptert sannsynlighet for TFS på 5%.

Kort sammenligning av U.S. Navy dykketabell og NDBT (3. utg)

Tabell 1 oppsummerer hovedtrekkene når man sammenligner NDBT og U.S. Navy rev 6. Oversikten er tenkt som et hjelpemiddel for de som vil se nærmere på hvordan NDBT som er anerkjent i Norge er bygget opp sammenlignet med den amerikanske dykketabellen.

Tabell 1. En kort sammenligning av U.S. Navy revisjon 6 og NDBT (3. utg).

	U.S. Navy Diving Table (rev 6)	NDBT (3. utg)
Validert algoritme	Ja	Nei
Beregnet P(TFS)	Ja	Delvis
P(TFS) normale dykk	5%	5%
P(TFS) eksepsjonelle dykk	10%	6-7%
Innhenting av erfaringsdata	Nei	Nei
Tillatt dekompresjonstid i vann	30 min	35 min
Oksygen i vann på dekompresjoner >15 min og < 30 min	Ja	Nei
Dekompresjoner > 30 min	OD-O2	OD-O2 (>35 min)

P(TFS) – sannsynlighet for trykkfallssyke; OD-O2 – overflatedekompresjon med oksygen

Mer om sannsynlighet for TFS

Et dykk vil alltid innebære en viss sannsynlighet for TFS, uavhengig av hvilken tabell man benytter. En kan med andre ord ikke si at en bestemt profil er sikker eller ei, men heller si at profilen er forbundet med en sannsynlighet for TFS ¹³.

Det er tidligere gjort beregninger hos U.S. Navy for å undersøke om man kunne holde sannsynligheten for TFS konstant gjennom en tabell. Det ble konkludert med at tid til dekompresjon og tilgjengelig tid til å utføre arbeid under vann før dekompresjon ikke ville bli gjennomførbar. Det ligger implisitt i det å gjøre arbeid under vann, at risikoen nødvendigvis øker både med dybden man arbeider på, samt lengden på dykket.

I U.S. Navy beregner de sannsynlighet for TFS i sine dykketabeller ved å gjøre nytte av to forskjellige modeller; en probabilistisk modell (USN93D) samt en modell som beregner boble-volum (BVM). Modellene baserer seg på i overkant av 3000 gjennomførte dykk, både med luft og nitrox som pustegass. Modellene viser at de grunne, lengste dykkene har større sannsynlighet for TFS enn de dypeste, korte dykkene. Innenfor ikke-dekompresjonsgrensen i tabellen, ligger gjennomsnittlig sannsynlighet for TFS i henhold til begge modellene, på litt over 2%, «(...) implying that DCS risks of this magnitude are commonly, but implicitly, accepted.» ¹³.

I Norge, og med tanke på NDBT, har det aldri blitt gjennomført noen validering av dykketabellen. NDBT har vist seg å være robust om man ser på tilfeller av rapportert TFS som endepunkts mål for om tabellen er god eller ei. Ved å sammenligne NDBT med den forrige utgaven av de amerikanske (USN56), ser man at de også er veldig like. Man kan dermed si at tabellene opererer med omtrent samme områder for sannsynlighet for TFS. Norske prosedyrer ligger på nivå med U.S. Navy, og da med en gjennomsnittlig sannsynlighet for TFS på litt i overkant av 2% (ikke-dekompresjons dykk).

I et tidligere arbeid gjennomført sammen med Arbeidstilsynet, ble sannsynlighet for TFS i NDBT (3. utgave) beregnet for ikke-dekompresjonsdykk i dybdeområdet 12 – 39 meter (tabell 2) ¹⁴. Beregningene herifra viser at antagelsen ovenfor er rimelig.

Tabell 2. Beregning av sannsynlighet for TFS (pDCS) innenfor ikke-dekompresjonsdykk (NDL) i henhold til norsk dykke- og behandlingstabell. Gjengitt fra rapport ATIL¹⁴.

depth	NDL	pDCS	Confidence Interval	
[m]	[min]	[%]	[%]	[%]
12	135	2,063	1,535	2,715
15	85	1,917	1,457	2,477
18	60	1,912	1,483	2,428
21	40	1,631	1,249	2,095
24	30	1,488	1,116	1,948
27	25	1,473	1,09	1,95
30	20	1,368	0,992	1,845
33	15	1,258	0,889	1,736
36	10	0,969	0,625	1,446
39	10	1,079	0,711	1,58

Validering av dekompresjonstabeller

Trykkfallssyke (TFS)

En dekompresjonstabell har tradisjonelt blitt validert ved å gjennomføre en lang rekke testdykk med påfølgende klinisk observasjon av dykkerne for evt forekomst av TFS. De tidligere modellene ble dermed prøvd ut etter et deterministisk prinsipp. Man kunne sette opp en rekke regler, som, hvis de ble brutt, ville gi en usikker prosedyre. Ulempen i denne metoden er at risiko ikke kan tallfestes. Sikkerheten i en dykkeprofil kunne dermed bare evalueres ved å sammenligne dybder og bunntider. En vanlig antagelse var dermed at om stoppdybden ikke var veldig forskjellig mellom to profiler, så ville den profilen med lengst stopp-tid være den mest konservative, og dermed mest trygg.

Ved innføring av sannsynlighetsmodeller for TFS har man fått et annet verktøy for å si noe om sikkerheten i en tabell. Probabilistiske modeller er utviklet for å kunne beregne sannsynlighet for TFS for en hvilken som helst dekompresjonsprofil. Dermed er det mulig systematisk å variere dekompresjonsstopp og tider for til slutt å ha en dekompresjonstabell hvor sannsynlighet for TFS er spesifisert. En probabilistisk modell vil da ikke bare vise hvilken dekompresjonsprofil som er forbundet med hvilken sannsynlighet for TFS, men vil også gi et estimat på forskjellen i sannsynligheten ^{15 16}.

Bak de tidligere tabellene til U.S. Navy og de algoritmene de har benyttet, ligger det flere tusen manndykk hvor suksesskriteriet har vært nettopp om det har oppstått TFS eller ei ^{17 18}. Det var ingen andre kriterier som ble benyttet. Kriteriet TFS eller ei ble heller ikke videre spesifisert. I de eldre rapportene kan man ikke finne detaljer som sier noe om hvor mange type I og hvor mange type II TFS det har vært. I 1987 ble det holdt en workshop under den årlige konferansen til Undersea and Hyperbaric Medical Society (UHMS), hvor man så på validering av dekompresjonstabeller ¹⁹. Der kommer det fram at innenfor U.S. Navy blir TFS benyttet som endepunkt. Det skilles mellom type I og type II, men «skin-bends» blir ikke ansett som et endepunkt. Videre benytter de ofte doppler-målinger, men disse blir ikke tillagt noen vekt i forhold til å endre profiler ²⁰. Det blir heller ikke tydelig sagt, men man forstår at type I TFS ikke vil føre til endring av en prosedyre, men at det er først ved alvorlig TFS (type II) at man vil endre på prosedyrene. Dette stemmer godt overens med uttalelser fra Van Liew og Flynn ²¹ som beskriver at akseptabel sannsynlighet for TFS vil variere i forhold til omgivelsene og det aktuelle dykket.

Medisinsk sett er det diagnosen TFS som benyttes ved trykkrelatert hendelse i forbindelse med dykking. Dette gjør at det fremdeles er TFS som regnes som det beste målepunktet for validering/utprøving av prosedyrer ²². Men det er sider ved dette som er problematisk. Om man skal undersøke om en dykkeprofil er "trygg" for TFS, kan et sted å starte være å sette grensen ved den sannsynligheten for TFS man opererer med i tabellen; 5 %. Om sannsynlighet for TFS skal være mindre eller lik 5%, og man tar utgangspunkt i en vanlig, 95%

binomisk fordeling, vil man da måtte gjennomføre 72 dykk uten noen symptomer på TFS. Og om man får ett tilfelle av TFS, så trenger man 37 nye dykk uten TFS for fremdeles å holde seg innenfor kriteriet. Om man ønsker å sette en lavere terskel for akseptabel sannsynlighet for TFS, si til mindre eller lik 1%, så vil en med denne binomiske fordelingen (TFS eller ikke-TFS) måtte gjennomføre 369 symptomfrie dykk. Om man får ett tilfelle av trykkfallsyke, må antall dykk økes til 558.

Ved et akseptkriterie på 5% ser det umiddelbart ikke så umulig ut å gjennomføre det antall test-dykk som beregningene tilsier. Men det er da viktig å huske på at dette gjelder for kun en profil; altså en kombinasjon av tid og dybde. Om man skulle gjennomført undersøkelser av en dykketabell, om det så bare er deler av en dykketabell, vil antallet tid/dybde-kombinasjoner fort gjøre dette til en svært utfordrende øvelse – både logistisk sett og ikke minst økonomisk.

En annen utfordring ved å benytte TFS som endepunkt, er at dette er en vanskelig diagnose å stille. Og om man skal benytte statistikker fra gjennomførte behandlinger, vil det også være viktig med en samtidig gjennomgang av klassifiseringene, nettopp fordi diagnostikken ved TFS er sammensatt og til dels avhengig av den enkelte dykkerleges erfaring.

Et tredje argument, som er det viktigste argumentet i denne sammenhengen etter min vurdering, er de åpenbare etiske utfordringene man stilles ovenfor om man med vitende og vilje skal påføre noen en alvorlig skade. Det finnes heldigvis gode alternativer til slik utprøving.

Måling av gassbobler ved hjelp av ultralyd

Alternativet for utprøving av dykkeprosedyrer til påvisning av TFS eller ei, er å benytte ultralyd for å monitorere dannelse av vaskulære gassbobler i sentrale blodårer. Måling av gassbobler er ikke et diagnostisk verktøy for TFS, men det er i dag internasjonal enighet om at mengden av gassbobler er relatert til sannsynlighet for TFS²³. Det er imidlertid ingen lineær sammenheng mellom mengde bobler og risiko, men den negative, prediktive verdien er funnet å være god. Det betyr at om man ikke finner noen gassbobler etter en dekompresjon, så er det lite trolig at man vil få TFS. Følgelig bør alle dykk tilstrebe å gi færrest mulige vaskulære bobler etter dykket.

Ultralyddeteksjon av vaskulære bobler og boblenes betydning for mulig utvikling av TFS har vært debattert siden man begynte å se etter bobler ved hjelp av ultralyd. Sentralt i alt arbeidet som har blitt gjort, er sammenstillingen av data fra Sawatsky²⁴, hvor 3499 dykkere ble monitorert ved hjelp av Doppler, og boblesignaler ble gradert ved hjelp av Kisman-Masurel skalaen. Disse dataene viste at man ved de laveste boblegradene (KMI) hadde en

sannsynlighet for TFS på ca 1%, mens man ved de høyere boblegradene (KM IV) hadde en sannsynlighet for TFS på ca 10%.

Senere studier har og vist at man kan ha store mengder bobler uten å få noen tilfeller av TFS, og begrepet "stille bobler" har vært brukt om dette. Dette har vært bakgrunn for den mest utbredte motforestillingen mot å benytte gassbobler som et mål på sannsynlighet for TFS, at boblene ikke har noen diagnostisk verdi. Men, flere er nå enige om at boblene har en verdi i forbindelse med å undersøke responser etter dykk, og peker på at boblene, potensielt sett, kan være mer informative enn lave insidenstall på TFS siden de observeres jevnlig etter dykk²⁵.

En annen stor fordel ved å benytte vaskulære bobler som et mål på dekompresjonsstress, er at man ikke trenger å prøve ut et utfall helt til TFS. TFS er som tidligere nevnt veldig sjeldent. I Norge er det innenfor overflateforsynt dykking offshore ikke meldt om tilfeller av TFS siden 1999⁵. Det skal nevnes at volumet av slik dykking heller ikke har vært stort. Ved innaskjærs dykking er forholdene mer uoversiktlige. Til tross for at alle mistanker om TFS er meldepliktige, og til tross for at vi har svært få behandlingssteder for TFS i Norge, finnes det i dag ingen oversikt over hvor mange som hvert år behandles for TFS etter dykking innaskjærs, hverken i arbeidsdykking eller fritidsdykking. Det er satt søkelys på dette fra Arbeidstilsynets side med bakgrunn i svært mange alvorlige ulykker de siste 10 årene, hvor det har vært ca. ett dødsfall hvert år i forbindelse med dykking (Lisbeth Tveit, ATIL, personlig meddelelse). Vi vet også fra tidligere undersøkelser, at det har vært avdekket omfattende underrapportering i forhold til TFS²⁶. Så lenge man ikke har fått mer systematiske oversikter tilgjengelig, er det ingen grunn til å tro at dette ikke fremdeles er tilfelle.

Sist, men ikke minst, vil man ved å benytte gassbobler som et mål på dekompresjonsstress kunne redusere antall testdykk nødvendig i en valideringsprosess betydelig. Doolette et al.²⁵ har vist at om man skal skille på én boblegrad, trenger man 50 testdykk om man skal ha en styrke i testen på 80%. Det er og utviklet metoder som muliggjør sammenligning av prosedyrer hvor antall testpersoner/testdykk som trengs er vesentlig lavere enn dette²⁷. Her benyttes Bayesiansk statistikk slik at man kan estimere sannsynlighet for TFS basert på mengde gassbobler målt ved hjelp av ultralyd, og kunnskapen man har om sammenhengen mellom vaskulære bobler og sannsynlighet for TFS.

Copernicus

Et tredje verktøy som kan hjelpe i evalueringen av dekompresjonsprosedyrer, er en modell som er utviklet ved NTNU; Copernicus. Selve Copernicus-modellen er godt dokumentert gjennom doktorgraden til Christian R. Gutvik²⁸. Kort fortalt er denne modellen bygget opp fra et fysiologisk perspektiv hvor arbeidsbelastning målt med hjerterefrekvensmålinger inngår i beregning av vaskulære bobler. Modellen har som mål å holde mengde gassbobler under et visst nivå for å angi en optimal dekompresjon for dykkeren.

Sammen med modellen er det utviklet en bobleestimator²⁹. Denne bygger på de samme dataene som ligger til grunn i Copernicus. Man kan her få beregnet en maksimal boblegrad på spesifiserte dykkeprofiler. Modellen er validert fra en rekke publiserte, internasjonale arbeider. Selv om det ved sammenligning med DCIEM eller U.S. Navy er snakk om et beskjedent antall dykk, så viser den en mulighet til å kunne beregne et dekompresjonsstress før dykket gjennomføres. Til nå er modellen basert på 457 menneskedykk hvor det er gjennomført boblemålinger. Nøyaktigheten til modellen vil kunne optimaliseres ytterligere med flere innsamlede datapunkter.

Total dekompresjonstid

Total dekompresjonstid har blitt benyttet for å sammenligne forskjellige dykketabeller i en tidligere rapport². Her kom det imidlertid ikke frem skillene som er mellom siste stopp på tre- eller seks meter, og skillene som er gjort med bruk av oksygen på dekompresjon. I det følgende er totale stopptider for utvalgte dyp og bunntider fremstilt basert på utvalgte dybder i NUI-rapport 2014-01². I denne sammenheng er det viktig å huske på at vi i Norge setter en begrensning på 35 min stopptid i vann.

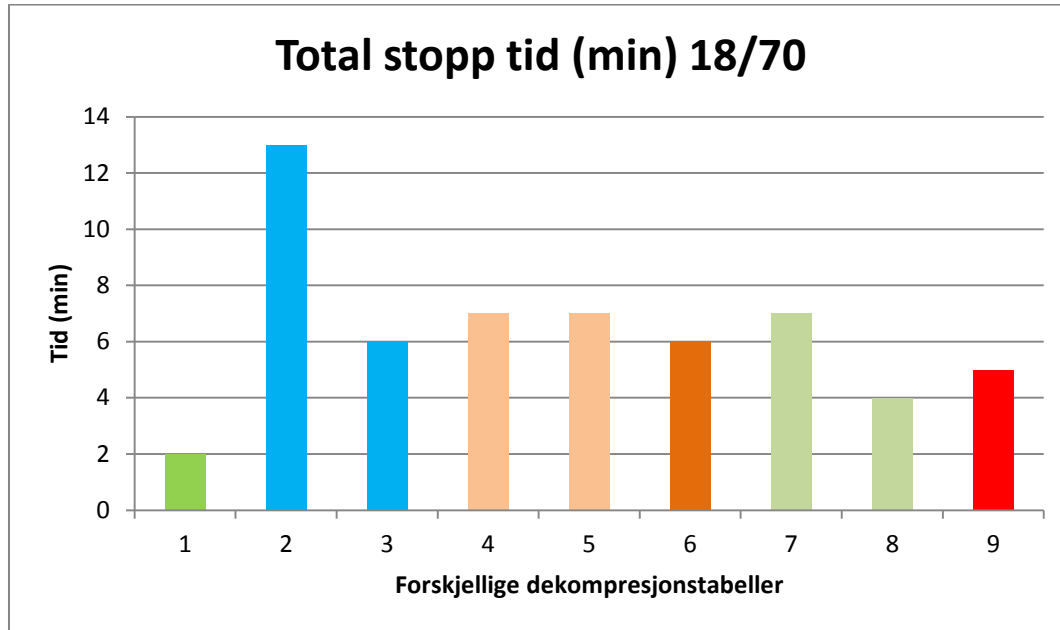
For et dykk til 18 meter i 70 min (Figur 7) ser man hvordan de forskjellige parametersettene benyttes i U.S. Navy revisjon 6 totale stopptider sammenlignet med sist revisjon (USN56) samt NDBT. Om bunntiden forlenges til 120 min (figur 8), ser man tydeligere de forskjellene som oppstår ved å benytte forskjellige parametersett. Den gamle U.S. Navy tabellen angir 25 min total stopp-tid på et slikt dykk, mens i revisjon 6 med VVal-18M parametersettet og stopp på seks meter nå er 75 min total stopp tid. Norsk tabell angir for tilsvarende dykk 30 min dekompresjon. Ved å benytte oksygen på 6 meter, reduserer U.S. Navy total stopp tid fra 75 min til 29 min.

For et dykk til 24 meter i 40 min (figur 9) ser man at total stopptid er lengst om man benytter oksygen på seks meter, og følger parametersettene VVal-18 og VVal-18M. Dette kommer av at U.S. Navy har lagt inn tre minutter med "dødtid" i alle prosedyrer med skifte til oksygen – at det er tre minutter hvor det ikke skjer noen gassutveksling mellom N₂ og O₂, og dermed viser figur 9 at det er profilene med oksygen som har lengst stopp-tid (4 min). Norsk tabell angir 5 min dekompresjon på denne profilen.

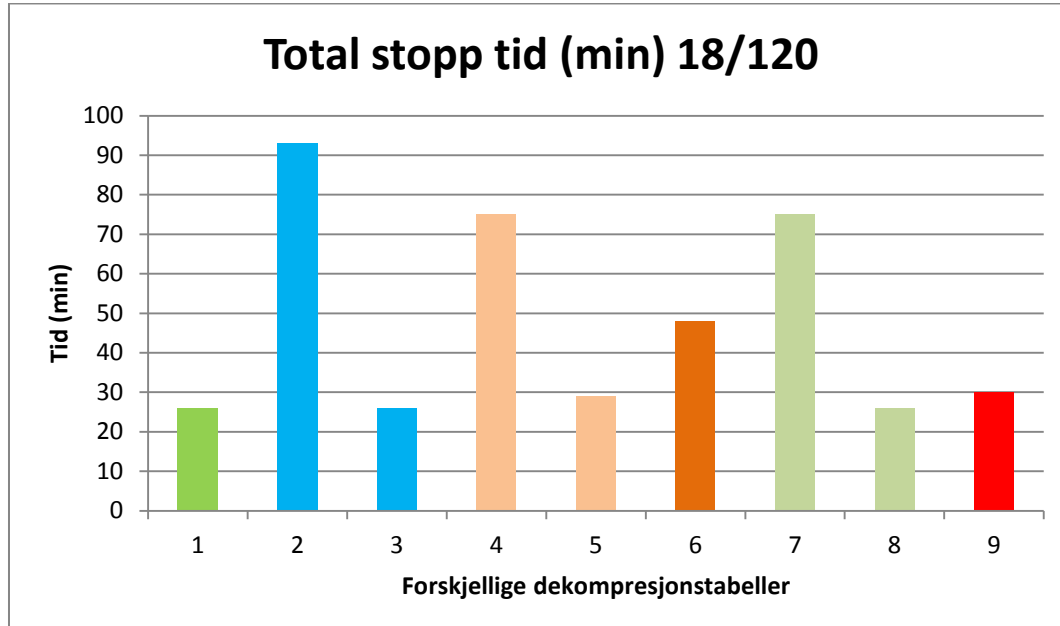
Forlenges bunntiden på 24 meter til 70 min (figur 10) ser man at USN56 gir litt over 20 min total stopp tid. NDBT (3. utgave) angir 25 min dekompresjon på denne profilen. Etter revisjon seks ble denne økt til nesten 90 min. Det modifiserte parametersettet reduserte total stopp tid til ca 54 min. Ved bruk av oksygen ble total stopptid ytterligere redusert til 25 min.

For dykk til 30, 36 og 48 meter er tendensene de samme (figur 11-16). Man ser økningen i total stopptid i revisjon seks ved å benytte VVal-18 (søyle 2 i alle figurer), og effektene av modifiseringen av parametersettet til VVal-18M (søyle 4 i alle figurer). Videre ser man reduksjon i total stopp-tid ved å benytte oksygen på dekompresjon, søyle 3 og 5 i alle figurer. Og man ser hva NDBT (3. utgave) angir av total dekompresjonstid på de samme dybdene (søyle 9 i alle figurer).

18 meter, 70 og 120 min bunntid

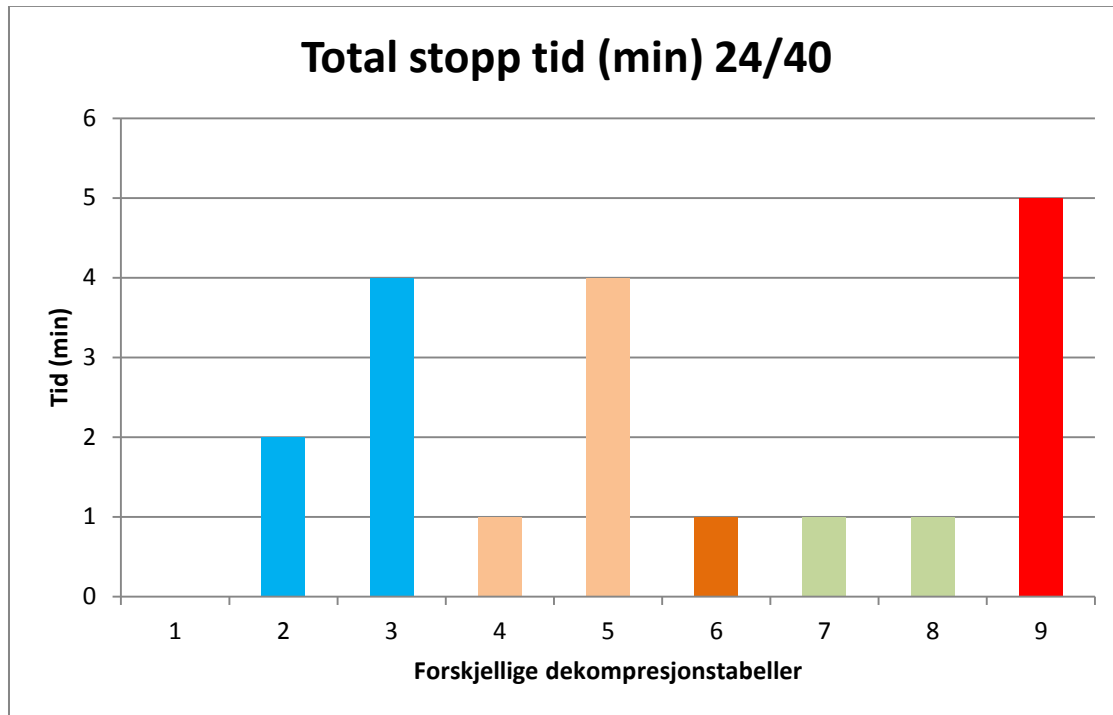


Figur 7. Total dekompresjons-tid (total stopp tid) på et dykk til 18 meter i 70 minutter. 1=USN56; 2=VVal-18, 6 m luft; 3=VVal-18, 6 m O₂; 4=VVal-18M, 6 m luft; 5=VVal-18M, 6 m O₂; 6=VVal-18M, 3 m luft; 7=VVal-79, 6 m luft; 8=VVal-79, 6 m O₂; 9=NDBT

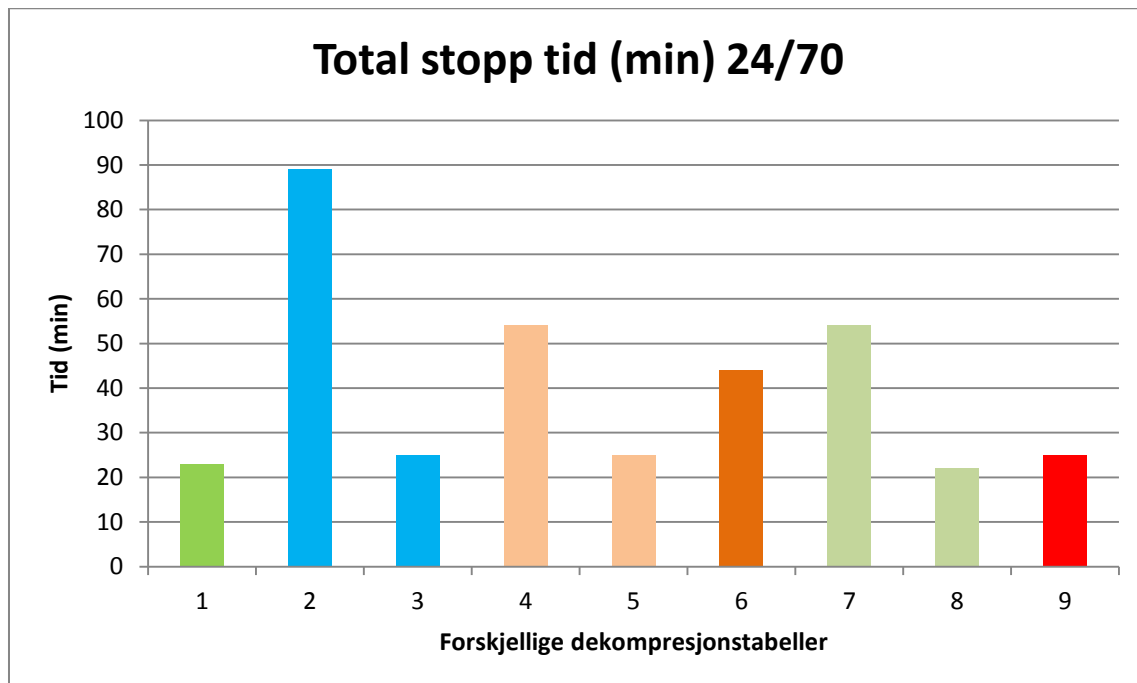


Figur 8. Total dekompresjons-tid (total stopp tid) på et dykk til 18 meter i 120 minutter. 1=USN56; 2=VVal-18, 6 m luft; 3=VVal-18, 6 m O₂; 4=VVal-18M, 6 m luft; 5=VVal-18M, 6 m O₂; 6=VVal-18M, 3 m luft; 7=VVal-79, 6 m luft; 8=VVal-79, 6 m O₂; 9=NDBT.

24 meter, 40 og 70 min bunntid

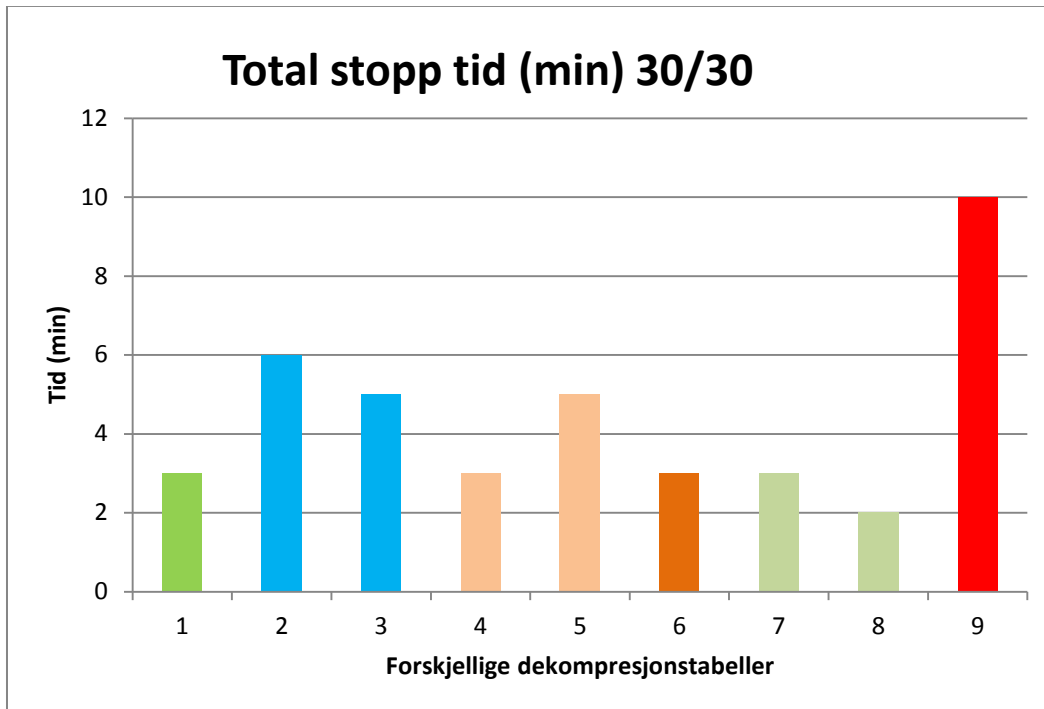


Figur 9. Total dekompresjons-tid (total stopp tid) på et dykk til 24 meter i 40 minutter. 1=USN56; 2=VVal-18, 6 m luft; 3=VVal-18, 6 m O₂; 4=VVal-18M, 6 m luft; 5=VVal-18M, 6 m O₂; 6=VVal-18M, 3 m luft; 7=VVal-79, 6 m luft; 8=VVal-79, 6 m O₂; 9=NDBT.

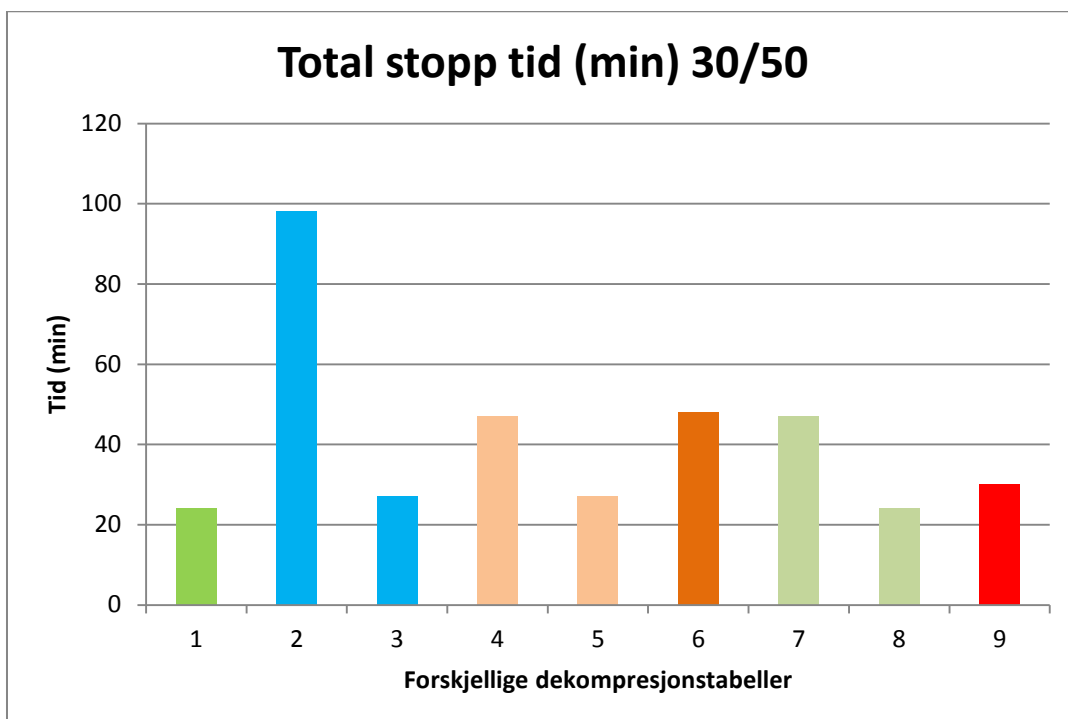


Figur 10. Total dekompresjons-tid (total stopp tid) på et dykk til 24 meter i 70 minutter. 1=USN56; 2=VVal-18, 6 m luft; 3=VVal-18, 6 m O₂; 4=VVal-18M, 6 m luft; 5=VVal-18M, 6 m O₂; 6=VVal-18M, 3 m luft; 7=VVal-79, 6 m luft; 8=VVal-79, 6 m O₂; 9=NDBT.

30 meter, 30 og 50 min bunntid

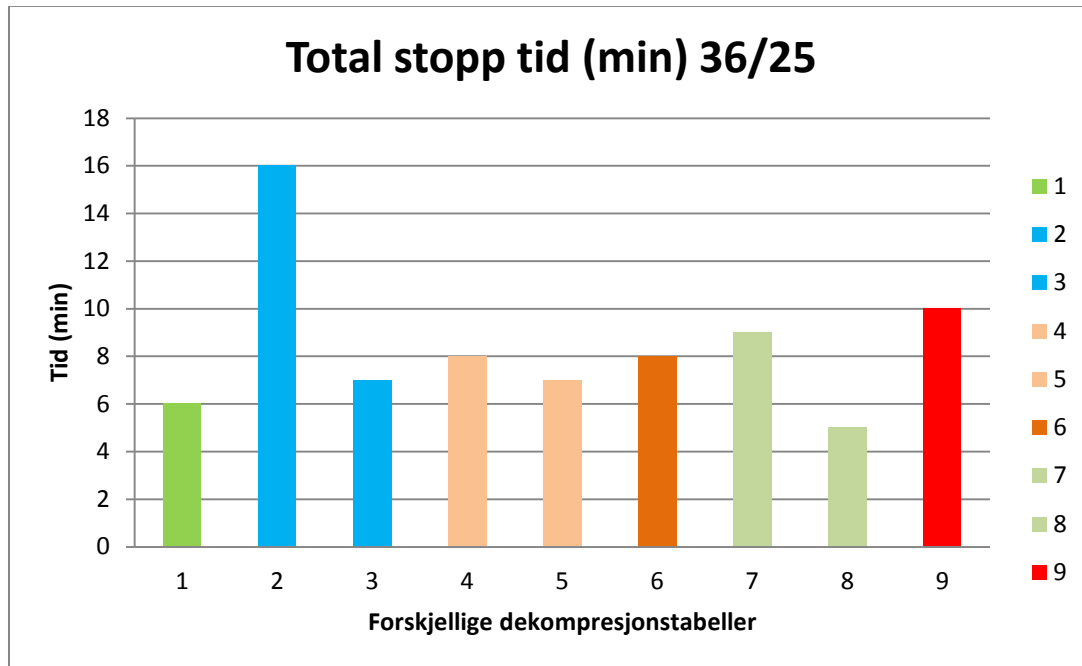


Figur 11. Total dekompresjons-tid (total stopp tid) på et dykk til 30 meter i 30 minutter. 1=USN56; 2=VVal-18, 6 m luft; 3=VVal-18, 6 m O₂; 4=VVal-18M, 6 m luft; 5=VVal-18M, 6 m O₂; 6=VVal-18M, 3 m luft; 7=VVal-79, 6 m luft; 8=VVal-79, 6 m O₂; 9=NDBT.

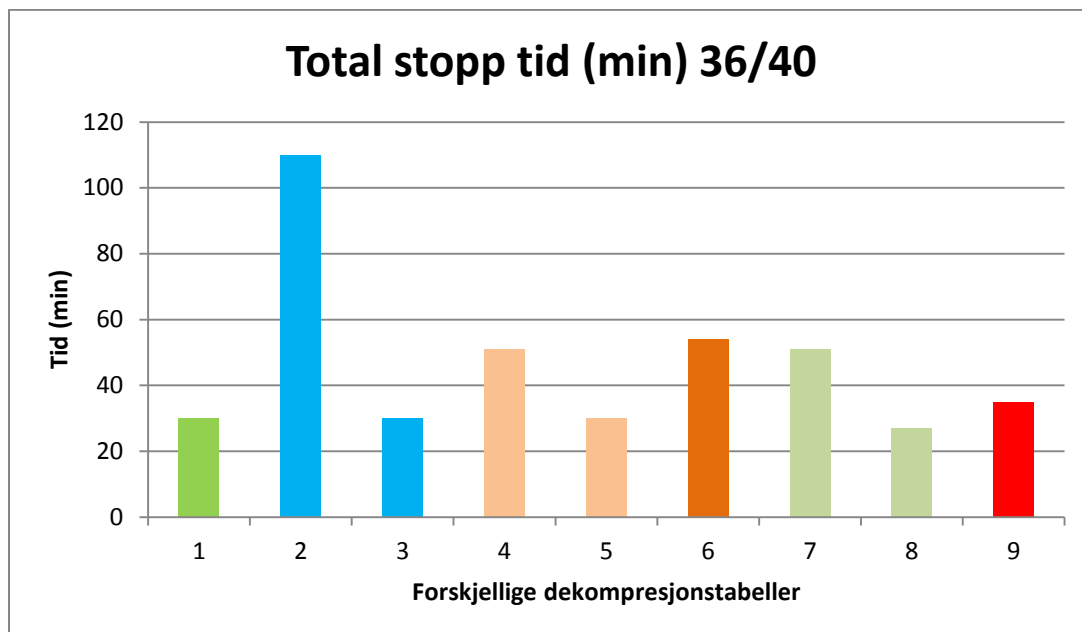


Figur 12. Total dekompresjons-tid (total stopp tid) på et dykk til 30 meter i 50 minutter. 1=USN56; 2=VVal-18, 6 m luft; 3=VVal-18, 6 m O₂; 4=VVal-18M, 6 m luft; 5=VVal-18M, 6 m O₂; 6=VVal-18M, 3 m luft; 7=VVal-79, 6 m luft; 8=VVal-79, 6 m O₂; 9=NDBT.

36 meter, 25 og 40 min bunntid

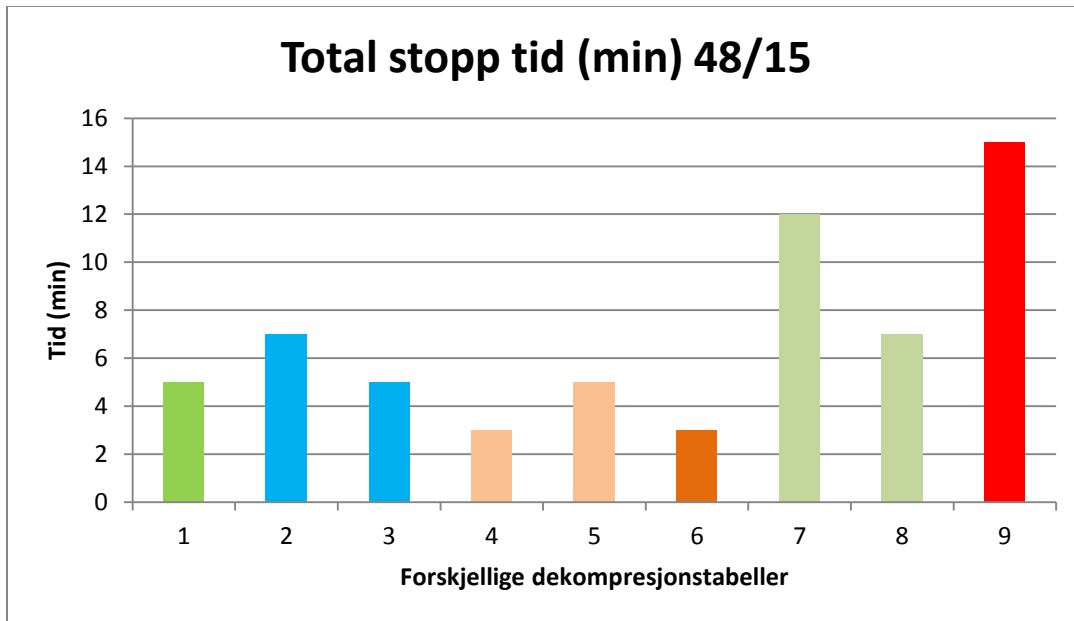


Figur 13. Total dekompresjons-tid (total stopp tid) på et dykk til 36 meter i 25 minutter. 1=USN56; 2=VVal-18, 6 m luft; 3=VVal-18, 6 m O₂; 4=VVal-18M, 6 m luft; 5=VVal-18M, 6 m O₂; 6=VVal-18M, 3 m luft; 7=VVal-79, 6 m luft; 8=VVal-79, 6 m O₂; 9=NDBT.

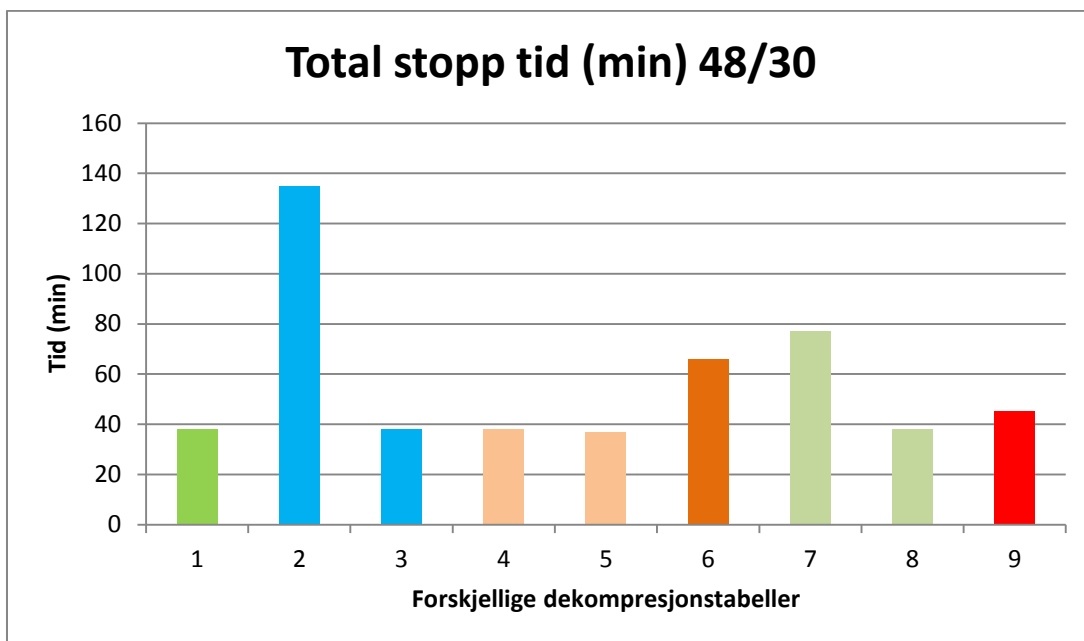


Figur 14. Total dekompresjons-tid (total stopp tid) på et dykk til 36 meter i 40 minutter. 1=USN56; 2=VVal-18, 6 m luft; 3=VVal-18, 6 m O₂; 4=VVal-18M, 6 m luft; 5=VVal-18M, 6 m O₂; 6=VVal-18M, 3 m luft; 7=VVal-79, 6 m luft; 8=VVal-79, 6 m O₂; 9=NDBT.

48 meter, 15 og 30 min bunntid



Figur 15. Total dekompresjons-tid (total stopp tid) på et dykk til 48 meter i 15 minutter. 1=USN56; 2=VVal-18, 6 m luft; 3=VVal-18, 6 m O₂; 4=VVal-18M, 6 m luft; 5=VVal-18M, 6 m O₂; 6=VVal-18M, 3 m luft; 7=VVal-79, 6 m luft; 8=VVal-79, 6 m O₂; 9=NDBT.



Figur 16. Total dekompresjons-tid (total stopp tid) på et dykk til 48 meter i 30 minutter. 1=USN56; 2=VVal-18, 6 m luft; 3=VVal-18, 6 m O₂; 4=VVal-18M, 6 m luft; 5=VVal-18M, 6 m O₂; 6=VVal-18M, 3 m luft; 7=VVal-79, 6 m luft; 8=VVal-79, 6 m O₂; 9=NDBT.

Sannsynlighet for TFS for utvalgte dybder og bunntider

Total stopp-tid/total dekompresjonstid er ikke den eneste faktoren man må se på for å vurdere en tabell, sannsynlighet for TFS er den andre. For å vise hvilke effekter de til dels lange dekompresjonstidene man fikk gjennom revisjon seks av U.S. Navy Diving Manual har for sannsynlighet for TFS, er beregningene for sannsynlighet for TFS satt opp for de dykkeprofilene som er gjennomgått med tanke på total dekompresjonstid. Estimatenes er beregnet ved hjelp av de to beregningsmodellene de benytter i U.S. Navy, og fargekodingen er beholdt fra de foregående figurene for lettere å kjenne igjen hvilken tabell og hvilke parametersett man ser på.

For standardtabellen (luftdykke-tabellen) i NDBT, er det ikke gjort egne beregninger med tanke på sannsynlighet for TFS. Men det har tidligere vært aksept for å sidestille norsk tabell med den amerikanske (den forrige revisjonen). I forhold til total dekompresjonstid, ser man fra figurene 7-14 at det er litt forskjell på de dykkene med kort bunntid. På dykkene med de lengste bunntidene, er norsk tabell svært lik den forrige utgaven av U.S. Navy. Inntil en nærmere beregning av sannsynlighet for TFS på den norske standardtabellen blir gjort, er dette det beste vi har.

Tabell 3 gir estimatene for sannsynlighet for TFS for de utvalgte dykkeprofilene på 18 meter, 70 minutter, og 18 meter, 120 minutter. Fra figur 8 ser vi at total stopp tid gikk fra 25 min i USN56, og til over 90 min i revisjon 6 (VVal-18). I tabell 3 ser man at dette ikke utgjorde noen vesentlig endring i sannsynlighet for TFS. Det er først når man benytter oksygen på dekompresjonen, VVal-18M, 6 m O₂ i tabell 3, at man finner en vesentlig reduksjon av estimatet for sannsynlighet for TFS.

Tabell 4 gir de samme estimatene for profilene på 24 meter i 40 minutter og 24 meter i 70 minutter. Tabellen kan sees i sammenheng med figur 9 og 10. Total stopptid for et dykk på 24 meter i 70 min gikk fra litt over 20 min og til nesten 90 min i revisjon seks av U.S. Navy sin dykketabell. Det gav ingen vesentlig endring i beregningene av sannsynlighet for TFS på denne profilen. Det er først ved å benytte oksygen på dekompresjon at man får en vesentlig endring (en reduksjon) i sannsynlighet for TFS.

Tabell 5 gir estimer for dykkeprofiler på 30 meter i 30 min, og for 30 meter i 50 min, og må sees i sammenheng med figur 11 og figur 12. Det er ikke store endringer for den kortete bunntiden, men når man ser på 30 meter i 50 min, gikk total stopptid i U.S. Navy tabellen fra litt over 20 min i USN56, til nesten 100 min i revisjon seks av U.S. Navy sin dykketabell. Man ser i tabell 5 at denne mangedoblingen av total stopptid kun gav en beskjeden reduksjon i sannsynlighet for TFS. Nok en gang illustrerer dette poenget som også U.S. Navy fremholder, at om man benytter luft på hele dykket så står ikke de veldig lange dekompresjonstidene i stil med de beskjedne reduksjonene man finner i sannsynlighet for TFS. Reduksjonen i sannsynlighetsberegningene blir først vesentlig når man benytter oksygen.

Tabell 6 gir estimer for den forrige U.S. Navy tabellen, samt for de forskjellige parametersettene som er benyttet inn i revisjon 6 av den amerikanske dykketabellen for dykk til 36 meter i 25 min og 36 meter i 40 min. Tabell 7 gir estimatene for sannsynlighet for TFS for dykk til 48 meter i 15 min og 48 meter i 30 min. Tabell 6 og tabell 7 må sees i sammenheng med hhv figurene 13 og 14 og figurene 15 og 16. Det er beskjeden reduksjon i sannsynlighet for TFS til tross for betydelig økning av total

stopp tid, og først når man benytter oksygen på dekompresjon ser man en vesentlig reduksjon av beregnet sannsynlighet for TFS.

18/70 og 18/120

Tabell 3. Sannsynlighet for TFS for dykk til 18 meter, 70 min og 18 meter, 120 min angitt ved bruk av BVM eller NMRI98. Norsk tabell antas å ligge på samme nivå som USN56. Data hentet fra ⁷, samt ¹².

Dykkeprofil (meter / bunntid (min))	18/70		18/120	
	P(TFS) BVM	P(TFS) NMRI98	P(TFS) BVM	P(TFS) NMRI98
USN56	1,919 (1,417 – 2,543)	2,219 (1,709 – 2,834)	4,006 (3,446 – 4,626)	4,999 (4,040 – 6,098)
VVal-18, 6 m luft	1,784 (1,322 – 2,357)	2,014 (1,560 – 2,561)	4,246 (3,608 – 4,957)	4,507 (3,770 – 5,336)
VVal-18, 6 m O2	1,626 (1,164 – 2,214)	1,825 (1,389 – 2,357)	2,736 (2,226 – 3,325)	3,061 (2,287 – 4,006)
VVal-18M, 6 m luft	1,777 (1,296 – 2,380)	2,084 (1,605 – 2,661)	4,218 (3,617 – 4,884)	4,632 (3,862 – 5,500)
VVal-18M, 6 m O2	1,587 (1,123 – 2,183)	1,777 (1,353 – 2,293)	2,579 (2,070 – 3,173)	2,829 (2,067 – 3,775)
VVal-18M, 3 meter luft	1,822 (1,346 – 2,414)	2,15 (1,653 – 2,749)	3,867 (3,321 – 4,473)	4,731 (3,816 – 5,784)
VVal-79, 6 meter luft	1,777 (1,296 – 2,380)	2,07 (1,585 – 2,657)	4,218 (3,617 – 4,884)	4,571 (3,819 – 5,418)
VVal-79, 6 meter O2	1,564 (1,097 – 2,167)	1,765 (1,302 – 2,342)	2,476 (1,962 – 3,082)	2,679 (1,935 – 3,611)

P(TFS) i %. Angitt med snitt og laveste samt høyeste verdi i parentes.

BVM – sannsynlighetsmodell for TFS. Sannsynligheten er her en funksjon av gassboble volum ¹⁰

NMRI98 – Sannsynlighetsmodell for TFS. Basert på teoretiske betraktninger om inertgass-innhold i forskjellige tenkte vev ⁸.

24/40 og 24/70

Tabell 4. Sannsynlighet for TFS for dykk til 24 meter i 40 min og 24 meter i 70 min angitt ved bruk av BVM eller NMRI98. Norsk tabell antas å ligge på samme nivå som USN56. Data hentet fra ⁷, samt ¹².

Dykkeprofil (meter / bunntid (min))	24/40		24/70	
	P(TFS) BVM	P(TFS) NMRI98	P(TFS) BVM	P(TFS) NMRI98
USN56	2,093 (1,521 – 2,811)	2,281 (1,734 – 2,946)	3,921 (3,231 – 4,708)	4,442 (3,606 – 5,402)
VVal-18, 6 m luft	1,982 (0,297 – 7,123)	1,929 (1,475 – 2,481)	4,142 (3,457 – 4,915)	3,722 (3,148 – 4,365)
VVal-18, 6 m O2	1,719 (0,187 – 7,221)	1,681 (1,274 – 2,181)	2,731 (2,106 – 3,480)	2,633 (2,043 – 3,338)
VVal-18M, 6 m luft	2,043 (0,327 – 7,095)	2,009 (1,542 – 2,573)	4,035 (3,372 – 4,783)	3,99 (3,334 – 4,731)
VVal-18M, 6 m O2	1,719 (0,187 – 7,221)	1,681 (1,274 – 2,181)	2,731 (2,106 – 3,480)	2,633 (2,043 – 3,338)
VVal-18M, 3 meter luft	2,067 (1,509 – 2,765)	2,044 (1,573 – 2,612)	3,771 (3,107 – 4,529)	3,99 (3,238 – 4,854)
VVal-79, 6 meter luft	2,043 (0,327 – 7,095)	2,022 (1,522 – 2,634)	4,035 (3,372 – 4,783)	3,944 (3,293 – 4,679)
VVal-79, 6 meter O2	1,745 (0,194 – 7,250)	1,666 (1,213 – 2,238)	2,615 (1,997 – 3,361)	2,521 (1,945 – 3,212)

P(TFS) i %. Angitt med snitt og laveste samt høyeste verdi i parentes.

BVM – sannsynlighetsmodell for TFS. Sannsynligheten er her en funksjon av gassboble volum ¹⁰

NMRI98 – Sannsynlighetsmodell for TFS. Basert på teoretiske betraktninger om inertgass-innhold i forskjellige tenkte vev ⁸.

30/30 og 30/50

Tabell 5. Sannsynlighet for TFS for dykk til 30 meter i 30 min, samt 30 meter i 50 min angitt ved bruk av BVM eller NMRI98. Norsk tabell antas å ligge på samme nivå som USN56. Data hentet fra ⁷, samt ¹².

Dykkeprofil (meter / bunntid (min))	30/30		30/50	
	P(TFS) BVM	P(TFS) NMRI98	P(TFS) BVM	P(TFS) NMRI98
USN56	2,4 (1,763 – 3,191)	2,255 (1,684 – 2,958)	4,257 (3,424 – 5,218)	4,426 (3,550 – 5,437)
VVal-18, 6 m luft	2,111 (1,509 – 2,876)	1,915 (1,446 – 2,490)	4,473 (3,692 – 5,358)	3,456 (2,883 – 4,105)
VVal-18, 6 m O2	2,004 (1,422 – 2,746)	1,733 (1,304 – 2,260)	2,985 (2,240 – 3,892)	2,503 (1,940 – 3,177)
VVal-18M, 6 m luft	2,322 (1,674 – 3,136)	1,98 (1,495 – 2,573)	4,301 (3,506 – 5,210)	3,87 (3,177 – 4,661)
VVal-18M, 6 m O2	2,004 (1,422 – 2,746)	1,733 (1,304 – 2,260)	2,985 (2,240 – 3,892)	2,503 (1,940 – 3,177)
VVal-18M, 3 meter luft	2,413 (1,774 – 3,205)	2,048 (1,549 – 2,656)	4,091 (3,282 – 5,027)	3,809 (3,059 – 4,678)
VVal-79, 6 meter luft	2,322 (1,647 – 3,136)	1,996 (1,470 – 2,650)	4,301 (3,506 – 5,210)	3,833 (3,104 – 4,673)
VVal-79, 6 meter O2	1,938 (1,353 – 2,695)	1,708 (1,232 – 2,310)	2,841 (2,104 – 3,747)	2,407 (1,836 – 3,098)

P(TFS) i %. Angitt med snitt og laveste samt høyeste verdi i parentes.

BVM – sannsynlighetsmodell for TFS. Sannsynligheten er her en funksjon av gassboble volum ¹⁰

NMRI98 – Sannsynlighetsmodell for TFS. Basert på teoretiske betraktninger om inertgass-innhold i forskjellige tenkte vev ⁸.

Tabell 6. Sannsynlighet for TFS for dykk til 36 m i 25 min og 36 m i 40 min angitt ved bruk av BVM eller NMRI98. Norsk tabell antas å ligge på samme nivå som USN56. Data hentet fra ⁷, samt ¹².

Dykkeprofil (meter / bunntid (min))	36/25		36/40	
	P(TFS) BVM	P(TFS) NMRI98	P(TFS) BVM	P(TFS) NMRI98
USN56	2,75 (2,033 – 3,633)	2,422 (1,799 – 3,188)	4,63 (3,647 – 5,778)	4,474 (3,517 – 5,595)
VVal-18, 6 m luft	2,434 (1,804 – 3,210)	2,073 (1,558 – 2,704)	5,004 (4,115 – 6,012)	3,671 (3,017 – 4,417)
VVal-18, 6 m O2	2,32 (1,677 – 3,130)	1,961 (1,466 – 2,571)	3,337 (2,452 – 4,427)	2,714 (2,017 – 3,570)
VVal-18M, 6 m luft	2,477 (1,826 – 3,282)	2,199 (1,658 – 2,861)	4,797 (3,852 – 5,887)	4,184 (3,417 – 5,062)
VVal-18M, 6 m O2	2,32 (1,677 – 3,130)	1,961 (1,466 – 2,571)	3,337 (2,452 – 4,427)	2,714 (2,017 – 3,570)
VVal-18M, 3 meter luft	2,705 (1,979 – 3,607)	2,31 (1,748 – 2,993)	4,595 (3,633 – 5,715)	4,12 (3,312 – 5,054)
VVal-79, 6 meter luft	2,461 (1,812 – 3,267)	2,152 (1,589 – 2,851)	4,751 (3,809 – 5,838)	4,035 (3,224 – 4,977)
VVal-79, 6 meter O2	2,201 (1,567 – 3,007)	1,854 (1,337 – 2,507)	3,105 (2,238 – 4,189)	2,516 (1,796 – 3,427)

P(TFS) i %. Angitt med snitt og laveste samt høyeste verdi i parentes.

BVM – sannsynlighetsmodell for TFS. Sannsynligheten er her en funksjon av gassboble volum ¹⁰

NMRI98 – Sannsynlighetsmodell for TFS. Basert på teoretiske betraktninger om inertgass-innhold i forskjellige tenkte vev ⁸.

Tabell 7. Sannsynlighet for TFS for dykk til 48 meter i 15 min og 48 m i 30 min angitt ved bruk av BVM eller NMRI98. Norsk tabell antas å ligge på samme nivå som USN56. Data hentet fra ⁷, samt ¹².

Dykkeprofil (meter / bunntid (min))	48/15		48/30	
	P(TFS) BVM	P(TFS) NMRI98	P(TFS) BVM	P(TFS) NMRI98
USN56	2,79 (2,044 – 3,715)	2,048 (1,456 – 2,802)	5,659 (4,338 – 7,218)	5,168 (3,972 – 6,581)
VVal-18, 6 m luft	2,597 (1,795 – 3,631)	2,047 (1,508 – 2,719)	6,103 (4,965 – 7,395)	4,395 (3,501 – 5,433)
VVal-18, 6 m O2	2,285 (1,627 – 3,122)	1,882 (1,373 – 2,522)	3,996 (2,807 – 5,493)	3,163 (2,333 – 4,184)
VVal-18M, 6 m luft	2,853 (2,095 – 3,789)	2,134 (1,567 – 2,840)	5,862 (4,577 – 7,360)	5,051 (3,967 – 6,315)
VVal-18M, 6 m O2	2,285 (1,627 – 3,122)	1,882 (1,373 – 2,522)	3,983 (2,801 – 5,472)	3,089 (2,265 – 4,106)
VVal-18M, 3 meter luft	2,938 (2,171 – 3,883)	2,214 (1,624 – 2,948)	5,621 (4,311 – 7,166)	5,036 (3,882 – 6,397)
VVal-79, 6 meter luft	2,334 (1,694 – 3,134)	1,9 (1,383 – 2,550)	5,833 (4,576 – 7,295)	4,824 (3,813 – 6,001)
VVal-79, 6 meter O2	1,973 (1,265 – 2,943)	1,576 (1,120 – 2,161)	3,941 (2,763 – 5,426)	3,078 (2,288 – 4,046)

P(TFS) i %. Angitt med snitt og laveste samt høyeste verdi i parentes.

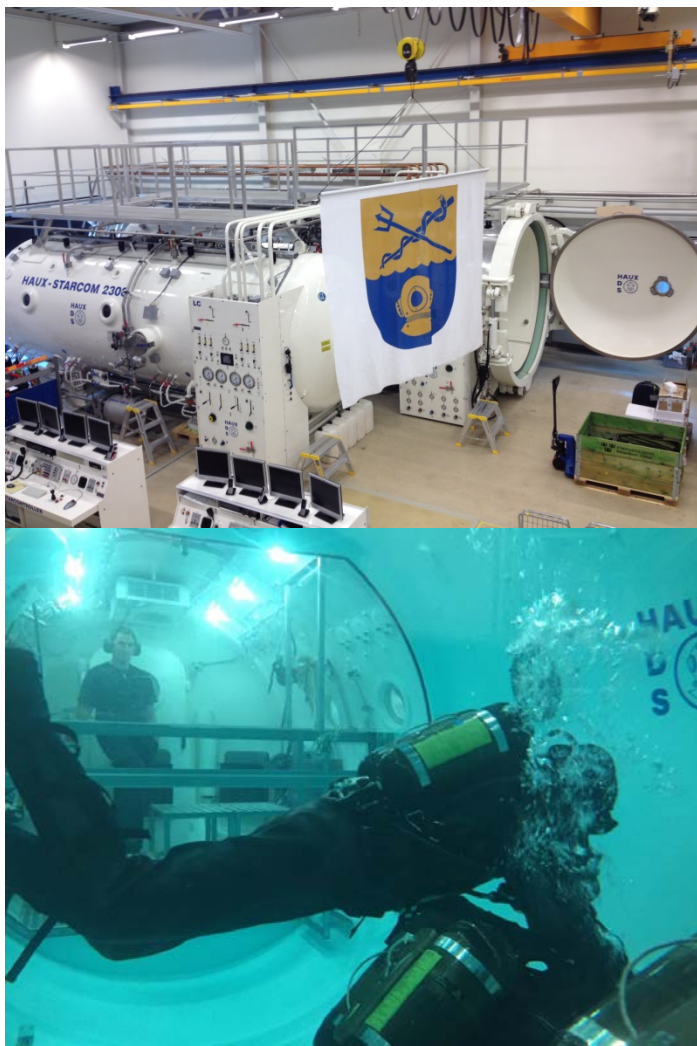
BVM – sannsynlighetsmodell for TFS. Sannsynligheten er her en funksjon av gassboble volum ¹⁰

NMRI98 – Sannsynlighetsmodell for TFS. Basert på teoretiske betraktninger om inertgass-innhold i forskjellige tenkte vev ⁸.

Erfaringer gjort av Försvarsmakten i Sverige

Försvarsmaktens dykkerskole ligger i Karlskrona, hvor de nylig har oppgradert sitt kammersystem for å møte behovene for utprøving av dykkeprosedyrer og dykkerutstyr. I tillegg gjennomføres det forskningsprosjekter knyttet til omgivelsesfysiologi, og Försvarsmakten stilte fasilitetene til rådighet for en internasjonal konferanse i 2015 hvor man belyste bruk av ultralyd for monitorering av gassbobler i forbindelse med barofysiologisk forskning. Denne konferansen endte med en internasjonal konsensus-artikkel for hvordan man bør planlegge, gjennomføre og rapportere resultater om man skal gjøre ultralyd-målinger av gassbobler i forbindelse med dykkeforsøk²³.

Gjennom prosjektperioden ble det gjennomført flere telefonmøter og møter med den ansvarlige for forskningen innen baromedisinske utfordringer ved Karlskrona, Mikael Gennser. De erfaringene som er hentet inn her, er gjengitt med tillatelse fra han.



Øverste bilde: Kammeranlegget i Karlskrona (foto: Andreas Møllerløgken).

Nederste bilde: Dykker under forsøk (foto: David Smart).

Försvarmakten har gjennom flere år gjennomført test-dykking, hvor de i tillegg til operasjonelle tilpasninger også systematisk har benyttet ultralyd for å undersøke forekomst av vaskulære bobler etter dykk. I vurdering av tabeller bruker Försvarmakten den statistiske sammenhengen mellom forekomst av vaskulære bobler etter et dykk og sannsynlighet for TFS. Dersom man ikke finner noen bobler, er sannsynligheten svært lav for at man vil få TFS. Gjennom årene er dette dokumentert i flere vitenskapelige artikler. Försvarmakten benytter dermed et objektivt mål på dykkestress mot sine prosedyrer, og lar ikke vurderingene alene basere seg på tilfeller av TFS eller ikke.

I 2015 ble det gjennomført en rekke forsøksdykk i kammeranlegget i Karlskrona. Testdykkene som ble gjennomført denne gang, var 51/10, 24/25 og 40/20 (maks dybde, m/bunntid, min). Dykkene ble gjort med «open circuit» utstyr med luft som pustegass, og dykkene fulgte U.S. Navy revisjon 6 sine tabeller. Forekomst av vaskulære bobler etter disse dykkene ble studert, samt hvordan et første dypt dykk ville påvirke et påfølgende, grunnere dykk. I tillegg ønsket Försvarmakten å få sammenstilt data fra testdykking gjennomført noen år tilbake med de gamle U.S. Navy tabellene.

Alle dykk ble gjort av Försvarmaktens dykkere, og ble gjennomført i våtkammeret i Karlskrona. Kompresjonshastighet var 20 m/min, og dekompresjonshastighet var 9 m/min. Under alle dykkene var dykkerne i lett bevegelse. Etter dekompresjon, og etter at dykkerne var ute av kammeret, startet monitoreringen av vaskulære gassbobler. To systemer ble benyttet om hverandre, en Doppler og en 2D skanner. Systemene er vist å være kompatible med hverandre³⁰. Målinger ble gjennomført hvert 5. min i de første 30 min, og deretter hvert 15. min i 120 min etter avsluttet dykking.

Til sammen 72 dykk ble gjennomført fordelt på fire dykkeprofiler. På dag en av test-runden gjennomførte dykkerne først et dyp-dykk til 51 meter med 10 min bunntid, etterfulgt av et dykk til 24 meter med 25 min bunntid. Overflateintervallet mellom dykkene var 4 timer. Dagen etter gjennomførte dykkerne et dykk til 40 meter med 20 min bunntid, hvor de hadde et dekompresjonsstopp på 6 meter i 7 min. En annen gruppe dykkere gjennomførte kun dykket til 40 meter i 20 min. Det var ingen forskjell i forekomst av vaskulære bobler mellom dykkene. Ved beregning av sannsynlighet for TFS så de likevel en mulig forskjell mellom dykk som blir gjort enkeltvis sammenlignet med et identisk dykk som blir gjennomført sist i en serie.

Når det gjelder siste dekompresjonsstopp som ble utprøvd, hadde det stor effekt på å redusere mengde gassbobler etter dykket til 51 meter i 10 min. For de andre dykkene utgjorde ikke dette sikkerhetsstoppet noen forskjell med tanke på bobleforekomster.

Hvilke erfaringer er så gjort?

En av profilene, 40 meter, 20 min, gav opphav til to tilfeller av TFS i ledd. Disse fikk behandling med standard behandlingstabell, U.S. Navy tabell 6. I tillegg fikk ytterligere tre dykkere normobar oksygen for å redusere høy bobleforekomst etter dykket. Basert på disse

utprøvingene ser dette dykket ut til å ha en større sannsynlighet for TFS enn den som er estimert av Gerth og Doolette (1,7 – 3,4%) ⁷.

Forsøkene som ble gjennomført ved DNC, Karlskrona, ble også sammenlignet med tidligere dykk gjennomført ute i åpent vann under mer realistiske forhold. Her har det vært avdekket utfordringer knyttet til andre faktorer enn selve dekompresjonen, men det ligger utenfor denne rapportens omfang å komme inn på dette. Et viktig poeng fra erfaringene til Forsvarsmakten, er knyttet til påstanden i U.S. Navy revisjon 6, at man kan dykke tabellen uten å ta hensyn til de omkringliggende faktorer. Dette stemmer ikke med de erfaringene som Forsvarsmakten har. Med omkringliggende faktorer menes det som mer folkelig omtales som J-faktorer. Dette er alt man kan tenke seg influerer på dykkeprofilen, slik som strømningsforhold i sjøen, temperatur, dykkerens alder, fysiske form, om dykkeren er varm eller kald og liknende. Det er svært viktig for sikkerheten til dykkeren at man tar hensyn til flere faktorer enn dybde og tid alene.

En annen faktor de har undersøkt, er effekten av siste dekompresjonsstopp på tre eller seks meter. Her fant de heller ingen økt sikkerhet ved å stoppe på seks meter, men vil fortsette med dette inntil det er etablert annen eventuell prosedyre. Her har og Forsvarsmakten uttalt at om dykkerleder ser det som formålstjenlig, så kan han legge inn et sikkerhetsstopp på tre meter i tre minutter.

Forsvarsmakten benytter U.S. Navy revisjon 6 sin tabell, og har i 2015 gjennomført en rekke utprøvinger for å undersøke grad av dykkestress etter forskjellige dykkeprofiler. Gjennom disse utprøvingene har de støtt på utfordringer, og opplevd tilfeller av trykkfallsyke. Det er spesielt rundt 40 meter tabellen ser ut til å ligge svært nær grensen for TFS. De tilfellene de har hatt på denne profilen har vært relatert til ledd. I tillegg har Forsvarsmakten hatt utfordringer med noen andre, mer kompliserte tilfeller av TFS (nevrologiske) som har vist seg å ikke ha noe med tabellen å gjøre, men mer med andre årsaker (feil gass, dårlig oksygendosering). Forsvarsmakten ser nå på muligheten for å benytte oksygen på dekompresjon slik det gjør i U.S. Navy, men vil beholde vurdering av J-faktorene for å ivareta sikkerheten til dykkeren.

Trenger vi endret fokus?

Dekompresjon for overflateorientert dykking er i Norge i dag knyttet til bruk av NDBT. Innenfor offshore-relatert virksomhet er det ikke rapportert TFS siden 1999 med overflateorientert dykking, og volumet av slik dykking er svært lavt. Innaskjærs derimot, hvor tilsynsmyndigheten er ATIL, er det vanskeligere å danne seg et godt bilde av hvordan risiko i undervannsaktiviteten for dykkerne er. Det mangler oversikt over omfanget av dykkeaktiviteten, og det mangler oversikt over de behandlinger som blir gjort hvert år i Norge. Det er med andre ord ingen som i dag kan si nøyaktig hva sannsynlighet for TFS er for dykkeaktiviteten innaskjærs. Men noen indikasjoner finnes. Norsk Bransjeforening for Undervannsentreprenører (NBU) har gjennom en årrekke samlet data i forhold til antall manntimer dykket og rapporterte tilfeller av TFS. Her kommer det fram at det er ett tilfelle TFS per ca 20 000 timer. Det er langt under det man kunne forvente om man legger sannsynlighetsberegningene i tabellen til grunn. Variansen i forbindelse med rapportert TFS og estimer av sannsynlighet i en modell for dekompresjon skyldes i hovedsak to forhold. Det ene er at ikke alle rapporterer alt. Det andre er at under en dykkeoperasjon, så er det svært sjeldent at tabellen dykkes helt ut slik den ville blitt gjort under et kontrollert forsøksdykk. Dermed ser man alltid at operasjonelt ligger insidensen av TFS på under 1/10 av det risikoen forteller i utgangspunktet.

Det er mange sider ved dekompresjonsprosedyrer for overflateforsynt dykking som er forbundet med risiko for uhelse for arbeideren. Hvor stor denne risikoen skal være er også en debatt som må løftes fram, men risikoen vil aldri være null. Det er òg slik at risikoen vil øke med både økt tid og øk dybde under vann.

Et viktig element i det å bli bedre, til å skape større trygghet i våre operasjoner under vannet, vil være at vi i Norge erkjenner at vi trenger en database for eksponeringsdata, som kan knyttes opp mot helsedata/behandlingsdata fra de stedene i Norge hvor man behandler TFS. Selskapsinterne rapporter eller uttalelser fra vitenskapelig dykking eller fra dykking i Forsvaret som omtrent aldri har noen tilfeller av TFS gir ikke gode datagrunnlag for å basere framtidige anbefalinger på. I tillegg vil undersøkelser av hele NDBT og sannsynlighet for TFS være nødvendig for å kunne si noe videre om sikkerheten i bruken av tabellen, både innaskjærs og utaskjærs.

Hvor er vi på vei?

Overflateforsynt dykking er, innenfor petroleumssektoren, en liten del av den totale dykkeaktiviteten som bedrives innunder PTIL's tilsynsområde. Det er strenge restriksjoner på anvendelse av slik dykking, blant annet med en dybdebegrensning ned til 30 meter, noe som helt klart er med på å gjøre denne dykkingen sikker. Når likevel PTIL ønsker å få mer kunnskap fremlagt rundt utfordringer knyttet til nettopp dekompresjon ved

overflateorientert dykking, er det med bakgrunn i de tidligere rapportene fra PTIL som har vist til at NDBT ser ut til å være svært liberal om man sammenligner total dekompresjonstid med andre tabeller. Da trekkes også sammenligningsgrunnlaget utover bare å gjelde de selvpålagte 30 meterne i vannsøylen.

Ved å hente inn mer kunnskap rundt dekompresjonsprosedyrer relatert til overflateforsynt dykking, har det vært med et ønske om å bygge opp kunnskapsgrunnlaget man har for fortsatt å forvalte dykking som en arbeidsoppgave som kan gjennomføres på en sikker måte. Det har opp gjennom historien vært mye fokus på risiko-aspektene relatert til dykking. Det som har manglet, er evnen til å diskutere hvorfor det går så bra som det gjør. Hva er det som gjør at vi opererer så trygt innenfor de rammene vi holder oss til i Norge? Det er mitt ønske at denne rapporten kan være med på å hente fram denne siden av diskusjonen også. Det er viktig å ha oversikt over både risikomomentene man omgir seg med når man gjør en dykkeoperasjon, men man må også evne å ta med seg den erfaringen man sitter på.

Parallelt med denne rapporten, revideres nå NDBT. Om man skal få mer solide grunnlag å bygge på i framtiden, vil det være essensielt å erkjenne at man trenger mer data fra den dykkingen som gjennomføres, data som går utover det å bare rapportere antall TFS og evt nær-uhell. Alf Brubakk tok i sin rapport fra 2012 til orde for å etablere et Centre of Excellence in Diving¹. Dette behovet har ikke blitt mindre med årene, sett ut ifra et forskningsperspektiv. Et grunnforskningsmiljø, som ved NTNU, har utdanning som sin viktigste oppgave, og gjør forskning gjennom utdanning og for utdanning. Fagmiljøet ved Haukeland er i all hovedsak klinisk innrettet, og arbeider primært i en pasientnær, klinisk hverdag for å følge opp yrkesmedisinsk utredning av yrkesdykkere, i tillegg til behandlingstjenesten innenfor hyperbar oksygenbehandling. Miljøene samarbeider i dag i langt større grad enn hva historien har vist, men for kunnskapsutviklingen innen barofysiologi ville mer stimulering av slikt samarbeid være ønskelig.

For å frembringe mer kunnskap i fremtiden, anbefales det at dykkeindustrien ser på hvordan de kan sette opp en bedre database for innsamling av eksponeringsdata fra operatørene som arbeider med bemannende undervannsoperasjoner. En slik database må ikke bare inneholde informasjon om antall manntimer under vann, og uheldige hendelser. Vel så viktig er å få vite antall eksponeringer, dybdeområder, bunntider, dekompresjonshastigheter og evt kommentarer / notater etter dykkene om dykkerne / overflatepersonellet mener det er noe ekstra med dykket. Videre må slike data vurderes opp mot helsedata. Det må settes krav til at alle behandlinger av TFS rapporteres årlig, og at alt materiell som kommer inn sammen med en dykker som skal til behandling for TFS blir tatt godt vare på for evt senere gjennomgang (for eksempel at dykkecomputeren blir lastet ned og lagret, at profilene blir tatt vare på, og at de medisinske miljøene snakker sammen).

Sluttkommentar

NDBT har kortere dekompresjonstider sammenlignet med U.S. Navy revisjon 6 for luftdykk, men beregningene av sannsynlighet for TFS man kan sammenligne med tilkjennegir ingen dramatisk endring i sannsynlighet for TFS. Dette er også på linje med hva U.S. Navy selv uttaler.

Med bruk av U.S. Navy rev 6 godtar man at forskjellige parametersett er benyttet i tabell og i den computeren de benytter. Dette er noe de arbeider med, og i den kommende revisjon 7 vil denne inkonsistensen bli rettet opp ved at tabellverket skal benytte det nyere parametersettet VVal-79. De vil da nok en gang få en tabell som er konsistent bygd opp på en validert modell og med ett og samme parametersett.

I revisjon 6 er det uttalt at "there is no need to use the next deeper depth/next longer time...." Dette er ikke å anbefale. Det er viktig at erfaringen til dykkerlederne fremdeles følges. Det er mange faktorer i tillegg til dybde og tid som har betydning for opptak og utvasking av gasser i kroppen, og disse er forskjellige fra person til person. Den som kjenner dykkerne best, er dykkerleder, og dennes erfaring er viktig å anerkjenne.

På samme måte er det ingen dekompresjonsteoretiske fordeler med å gjennomføre siste dekompresjonsstopp på 6 meter i forhold til på 3 meter. Om man skal stoppe på 6 meter må stoppene gjøres lengre for å oppnå den samme utvaskingsgradienten som man får på tre meter. Alternativt må man se på muligheten for å innføre bruk av oksygen på dekompresjon. At U.S. Navy har innført denne endringen er kun operasjonelt betinget. Det kan helt klart være situasjoner hvor man kunne ønske å ha siste dekompresjonsstopp på 6 meter, for eksempel med kraftig sjøgang. Det vil da være nødvendig å gjøre en risikovurdering mellom å dekomprimere i roligere sjø, men samtidig måtte være der lengre. Den norske dykke- og behandlingstabellen har siste stopp på tre meter.

Försvarsmakten i Sverige benytter boblemålinger for å vurdere risiko i dekompresjonsprofiler. Ved innføring av nye prosedyrer har Försvarsmakten fått samlet inn bobledata fra sin gamle prosedyre, for på den måten å få et objektivt sammenligningsgrunnlag ved innføring av nye prosedyrer/tabeller. En slik innfallsvinkel ville også vært verdifull i Norge.

Omfanget av overflate forsynt dykking innenfor petroleumsnæringen er svært beskjedent. Men det benyttes tabellverk som også gjelder for innaskjærs dykking. For å arbeide videre med fortsatt høyt fokus på god og sikker dykking, vil det være viktig å få etablert en bedre database for både eksponeringsdata og helsedata. Det vil og være en stor fordel å gjennomføre en lang rekke undersøkelser av dekompresjonsprosedyrer ved hjelp av ultralyddeteksjon av bobler etter dykket. Dette kan, sammen med både mer informativ profilinformasjon, og sammen med helsedata gi bedret innsikt i de prosedyrene vi har. Det

vil og være en god kilde til forskning og utviklingsaktivitet som skal støtte opp under den aktiviteten som gjøres i forbindelse med bemannende undervannsoperasjoner.

Referanser

1. Brubakk AO. Kunnskapsstatus og fremtidsperspektiver. God reise hjem - sikker dekompresjon av dykkere. 2012.
2. Segadal K. Sammenligning av dekompresjonstabeller for overflateorientert dykking. 2014.
3. Norge S. Petroleumsrelaterte bemannede undervannsoperasjoner inshore. 2011;U-103N:28.
4. Norge S. Bemannede undervannsoperasjoner - Utgave 5. 2015;U-100:72.
5. Authority PS. Rapport fra PTIL's dykkedatabase DSYS 2015. 2015.
6. Command NSS. U.S. Navy Diving Manual Revision 6. 2008.
7. Gerth WA and Doolette DJ. VVal-18 and VVal-18M Thalmann Algorithm Air Decompression Tables and Procedures. 2007:212.
8. Parker EC, Survanshi SS, Massell PB and Weathersby PK. Probabilistic Models of the Role of Oxygen in Human Decompression Sickness. *J Appl Physiol*. 1998;84:1096-1102.
9. Gerth WA and Vann RD. Development of Iso-DCS Risk Air and Nitrox Decompression Tabela Using Statistical Bubble Dynamics Models. 1996.
10. Gerth WA and Vann RD. Probabilistic Gas and Bubble Dynamics Models of DCS Occurrence in Air and N2O2 Diving. *Undersea and Hyperbaric Med*. 1997;32:275-292.
11. Parker EC, Survanshi SS, Massell PB and Weathersby PK. Probabilistic models of the role of oxygen in human decompression sickness. *SO - Journal of Applied Physiology* 84(3) March, 1998 1096-1102. 1998.
12. Gerth WA and Doolette AL. VVal-79 Maximum Permissible Tissue Tension table for Thalmann algorithm Support of Air Diving. . 2012:80.
13. Tikuisis P and Gerth WA. Decompression Theory. In: A. O. Brubakk and T. S. Neuman, eds. *Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving*. 5th ed. Philadelphia: Saunders; 2003: 419-455.
14. Møllerløkken A and Brubakk AO. Personal Dive Computer. 2011:91.
15. Weathersby PK, Homer LD and Flynn ET. On the likelihood of decompression sickness. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental & Exercise Physiology*. 1984;57:815-25.
16. Weathersby PK, Survanshi SS, Homer LD, Parker E and Thalmann ED. Predicting the Time of Occurrence of Decompression Sickness. *SO - Journal of Applied Physiology* 72(4) 1992 1541-1548. 1992.
17. Thalmann ED. Phase II testing of decompression algorithms for use in the U. S. Navy underwater decompression computer. . 1984.
18. Thalmann ED, Buckingham IP and Spaur WH. Testing of decompression algorithms for use in the U. S. navy underwater decompression computer: Phase I. 1980.
19. Schreiner HR and Hamilton RW. Validation of Decompression Tables. *The 37th Undersea and Hyperbaric Medical Society Workshop*. 1987:167.
20. Harvey CA, Parker JW and Burns AC. Experiences Establishing Decompression Procedures at NSMRL. In: H. R. Schreiner and R. W. Hamilton, eds. *Validation of Decompression Tables: Undersea and Hyperbaric Medical Society*; 1989.
21. Van Liew HD and Flynn ET. A simple probabilistic model for estimating the risk of standard air dives. 2004.
22. Blogg SL and Mollerlokken A. The Use of Venous Gas Emboli to Validate Dive Computers. In: S. L. Blogg, M. A. Lang and A. Mollerlokken, eds. *Proceedings of Validation of Dive Computers Workshop* Trondheim: Akademika Publishing; 2012: 93-98.
23. Mollerlokken A, Blogg SL, Doolette DJ, Nishi RY and Pollock NW. Consensus guidelines for the use of ultrasound for diving research. *Diving and hyperbaric medicine : the journal of the South Pacific Underwater Medicine Society*. 2016;46:26-32.

24. Sawatsky DK. [Thesis] The relationship between intravascular doppler-detected gas bubbles and decompression sickness after bounce diving in humans. *Health Sciences, Recreation*. 1991;Master of Science.
25. Doolette DJ, Gault KA and Gutvik CR. Sample size requirement for comparison of decompression outcomes using ultrasonically detected venous gas emboli (VGE): power calculations using Monte Carlo resampling from real data. *Diving and hyperbaric medicine : the journal of the South Pacific Underwater Medicine Society*. 2014;44:14-9.
26. Brubakk AO, Bolstad G and Jacobsen G. Helseeffekter av luftdykking. Yrkes og sportsdykkere. 1993.
27. Eftedal OS, Tjelmeland H and Brubakk AO. Validation of decompression procedures based on detection of venous gas bubbles: A Bayesian approach. *Aviat Space Environ Med*. 2007;78:94-9.
28. Gutvik CR. A Physiological Approach to a New Decompression Algorithm Using Nonlinear Model Predictive Control. *Department of Circulation and Medical Imaging*. 2011;Doctor Philosophiae.
29. Gutvik CR. Copernicus. 2014.
30. Brubakk AO and Eftedal O. Comparison of three different ultrasonic methods for quantification of intravascular gas bubbles. *Undersea Hyperb Med*. 2001;28:131-6.