

Dekompresjonsprosedyrer for TUP-Dykking

Et beslutningsgrunnlag fra Forfatterkollegiet av Norske Dykke- og behandlingstabeller

til

Norsk Olje og Gass Forum for Dykking og Undervannsintervensjon

Jan Risberg, Olav Sande Eftedal, Andreas Møllerløkken

Innhold

1	SAMMENDRAG	5
2	SUMMARY	5
3	INNLEDNING	6
3.1	HVORDAN DETTE DOKUMENTET BØR LESES.....	6
3.2	FORFATTERSKAP OG INTERESSEKONFLIKT.....	6
3.3	FORMÅL	6
3.4	FORKORTELSER OG DEFINISJONER	6
3.5	ENHETER	7
4	BAKGRUNN	8
5	METODE	8
5.1	INNLEDNING.....	8
5.2	INNHEITING AV TILGJENGELIG INFORMASJON OM DEKOMPRESJONSMETODER VED TUP-DYKKING	9
5.3	AVGRENSNING AV DATAGRUNNLAGET	9
5.4	METODISKE BEGRENSNINGER	9
5.5	VURDERING AV SANNSYNLIGHET FOR TRYKKFALLSSYKE	10
5.5.1	Variabler som er sammenlignet	10
5.5.2	Valg av dybde/bunntidskombinasjoner	10
5.5.3	Beregning av total dekompresjonstid og oksygenpustetid	10
5.5.4	Sammenligning av USN og nederlandske tabeller.....	11
6	RESULTAT	12
6.1	IDENTIFISERING AV TILGJENGELIGE DEKOMPRESJONSTABELLER	12
6.1.1	Søk i lærebøker, litteraturlagere og åpne internett-søk	12
6.1.2	US Navy Diving Manual Rev 7	12
6.1.3	Franske tabeller	13
6.1.4	Canadiske tabeller	15
6.1.5	Nederlandske tabeller	17
6.1.6	S7 og Technip.....	18
6.1.7	SubseaPartner.....	18
6.2	SAMMENLIGNING AV DEKOMPRESJONSTABELLER.....	18

6.2.1	Sammenligning av total dekompresjonstid og oksygenpustetid	18
6.3	OPERASJONELT BRUKSOMRÅDE.....	21
7	DISKUSJON.....	22
7.1	«BOUNCE» DYKKING VS TUP-DYKKING	22
7.2	SANNSYNLIGHET FOR TRYKKFALLSSYKE – ENKELT-DYKK	22
7.2.1	Canadiske og franske tabeller.....	22
7.2.2	Nederlandske og USN tabeller.....	23
7.3	SANNSYNLIGHET FOR TFS – GJENTATT DYKK.....	25
7.4	OPERASJONELL FLEKSIBILITET.....	26
7.5	SPORBARHET IFT ALGORITMER, PARAMETERSETT, AKSEPTKITERIER OG VERIFIKASJON	27
8	KONKLUSJON	28
9	REFERANSER	28
1	VEDLEGG A - DRAFT NDTT TUP DECOMPRESSION PROCEDURES (ENGLISH ONLY)	31
1.1	INSTRUCTIONS FOR USE	31
1.2	TUP TABLE 12 MSW	36
1.3	TUP TABLE 15 MSW	37
	TUP TABLE 18 MSW.....	38
1.4	TUP TABLE 21 MSW	39
1.5	TUP TABLE 24 MSW	40
1.6	TUP TABLE 27 MSW	41
1.7	TUP TABLE 30 MSW	42
1.8	TUP TABLE 33 MSW	43
	TUP TABLE 36 MSW.....	44
1.9	TUP TABLE 39 MSW	45
1.10	TUP TABLE 42 MSW	46
1.11	TUP TABLE 45 MSW	47
1.12	TUP TABLE 48 MSW	48
1.13	TUP TABLE 51 MSW	49
1	VEDLEGG B – GRENSEVERDIER FOR OKSYGENBELASTNING.....	50
1.1	FORMÅL OG BAKGRUNN	50

1.2	AVGRENSNING.....	50
1.3	METODE	50
1.3.1	Litteratursøk	50
1.3.2	Lungefunksjonsforandringer som konsekvens av foreslåtte TUP dekompresjonsprosedyrer	51
1.4	RESULTAT	51
1.4.1	Innledning	51
1.4.2	Bardin og Lambertsen (4) og Hamilton og medarbeidere (9) : UPTD og REPEX	52
1.4.3	Harabin og medarbeidere (7)	54
1.4.4	Vann (10)	55
1.4.5	Shykoff (8).....	56
1.4.6	Arieli (11)	57
1.4.7	Analyse av utvalgte dykkeprofiler relevant for TUP dykking	58
1.5	KONKLUSJON OG ANBEFALINGER	62
1.6	REFERANSER	62

1 SAMMENDRAG

Bakgrunn: Forfatterne av Norske Dykke og Behandlingstabeller (NDBT) har blitt kontaktet av Norsk olje og gass forum for dykking og undervannstjenester med anmodning om å utarbeide et tabell-rammeverk for TUP dykking.

Metode: Vi har gjennomført et litteratursøk i åpne kilder og vurdert åpent tilgjengelige dekompresjonstabeller. Søk og etterfølgende analyse har vært avgrenset til dykk med luft eller Nitrox som bunn-gass og egnet for dekompresjon i lukket klokke med luft og oksygen som pustegass i dekompresjonsfasen. Tabellene har vært sammenlignet basert på kriterier for sannsynlighet for trykkfallssyke (TFS) ved enkelt-dykk, sannsynlighet for TFS ved gjentatt dykking og operasjonell fleksibilitet. I tillegg har vi vurdert tabellenes sporbarhet ift algoritmer, parametersett, akseptkriterier og verifikasjon. I vår kvalitative sammenligningen har vi vektet sannsynlighet for TFS sterkest.

Resultat: Vi har identifisert canadiske, franske, nederlandske og amerikanske US Navy (USN) dekompresjonstabeller som oppfyller kravene. USN og nederlandske tabeller har sammenlignbar sannsynlighet for TFS, men ved inklusjon av øvrige kriterier framstår USN prosedyrer som den best egnede når en ny dykkeprosedyre skal innføres i Norge. Rapporten har to vedlegg. Det ene inneholder et førsteutkast til TUP-tabeller basert på USN prosedyrer, det andre drøfter metoder for kartlegging av og grenseverdier for oksygeneksponering ved dykking.

2 SUMMARY

Background: The authors of the Norwegian Diving and Treatment Tables (NDTT) have been requested by the Norwegian Oil and Gas Association, Forum for diving and subsea services to design a framework for TUP diving.

Methods: We have completed a literature search from open sources and evaluated the identified decompression tables. Search has been limited to procedures for diving with air or Nitrox as breathing gas in the bottom phase and decompression breathing air and oxygen in a closed bell. The tables have been compared on criteria such as likelihood of decompression sickness (DCS) for single dives, DCS risk for repetitive dives and operational flexibility. Additionally we have assessed the quality of documentation related to underlying algorithms, parameter sets, accept criteria and verification. We have weighted likelihood of DCS strongest in the concluding qualitative comparison of the tables.

Results: We have identified Canadian, French, Dutch and American US Navy(USN) decompression tables applicable for TUP diving. We consider USN and Dutch tables to have comparable likelihood of DCS. When other criteria are included, the USN procedure is considered preferable when a new diving procedure should be included for diving under Norwegian legislation. The report has two annexes. The first presents an initial draft for TUP-tables based on USN procedures. The other discusses methods and threshold values for hyperoxic exposure in diving.

3 INNLEDNING

3.1 Hvordan dette dokumentet bør leses

Dette dokumentet er stort, mer enn 60 sider. Det er forståelig at ikke alle kan ta seg tid til å lese alt. Vi anbefaler at du prioriterer slik:

- Svært lite tid tilgjengelig (<5 min): Les sammendrag/summary
- Lite tid (10-15 min): Les sammendrag, konklusjon og se på en eller to av tabellene i Vedlegg A
- Inntil 30 min tilgjengelig: Som over men suppler med kapittel «Diskusjon»

3.2 Forfatterskap og interessekonflikt

Jan Risberg er ansatt på NUI som dykkerlege, i Forsvarets Sanitet som Forsvarets UVB Dykkerlege og på Haukeland Universitetssykehus som overlege ved seksjon for hyperbarmedisin. Risberg er rådgivende dykkerlege for en rekke operatørselskap på norsk kontinentalsokkel samt flere innaskjærs dykkefirma. Risberg er rådgivende dykkerlege for SubseaPartner (SPAS). SPAS ønsker å inkludere dykking med TUP som en undervannsintervensjonsmetode, og Risberg har utarbeidet utkast til TUP dekompresjonsprosedyrer for SPAS. Risberg er førsteforfatter av Norske Dykke- og Behandlingstabeller. Arbeidet med denne rapporten har ikke vært honorert av noen arbeidsgiver eller oppdragsgiver.

Olav Sande Eftedal er ansatt i Equinor ASA, med medisinsk ansvar for konsernets bemannede undervannsoperasjoner. Equinor vil som operatørselskap være en potensiell kunde for dykkekontraktører som tilbyr TUP-dykking. Eftedal er medforfatter av Norske Dykke- og Behandlingstabeller.

Andreas Møllerløyken er ansatt ved Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet – NTNU, og er medforfatter av Norske Dykke- og Behandlingstabeller.

3.3 Formål

Formålet med dette dokumentet er å sammenstille tilgjengelig kunnskap om dekompresjonsprosedyrer for TUP-dykking. Dokumentet er primært utarbeidet som et beslutningsgrunnlag for forfatterkollegiet til NDBT og NOROG Forum for dykking og undervannsintervensjon slik at disse kan ferdigstille dekompresjonstabeller (NDBT) og rammebetingelser (NOROG Forum) for slik dykking. Scope

3.4 Forkortelser og definisjoner

- Bunntidsbegrensning Bunntidsbegrensning ved overflateorientert dykking som spesifisert av HSE, NORSOK U-100, NORSOK U-103 og NDBT.
- Dekompresjonstabell En spesifisert prosedyre for dekompresjon tilbake til overflatetrykk av en person som oppholder seg under forhøyet ytre trykk. En dekompresjonstabell inneholder matrisen for stegvis trykkreduksjon (og pustegass ifm dekompresjon) samt andre grensebetingelser for bruk. Matrisen vil konvensjonelt være bygget opp av rader med en

	spesifikk kombinasjon av tabelldybde og tabelltid for hver rad og med angivelse av dekompresjon for denne spesifikke profilen.
ECCR	Electronically controlled closed circuit rebreather. Elektronisk styrt dykkeapparat med lukket gass-sirkulasjon.
ELD	Ekvivalent luftddybde
Forfatterkollegiet	Jan Risberg, Olav Sande Eftedal og Andreas Møllerløyken (forfatterne av NDBT 4. og 5. utgave)
HSE	(Britisk) Health and Safety Executive. Britiske myndigheters tilsynsorgan.
NDBT	Norske dykke- og behandlingstabeller
NEDU	(US) Navy Experimental Diving Unit
Nitrox	(Puste-)gassblanding av Nitrogen og Oksygen i annen sammensetning enn luft.
NOROG	Norsk olje og gass
NOROG Forum	Norsk olje og gass forum for dykking og undervannsintervensjon
OI	Overflateintervall
P _{DCS}	Estimert sannsynlighet for trykkfallssyke
P _{DCS-USN}	Estimert sannsynlighet for trykkfallssyke for en profil med dekompresjon gjennomført iht USNDM.
Profil	Dekompresjonsprofil. Brukes i dette dokumentet som dekompresjonsangivelsen for en spesifikk kombinasjon av tabelldybde og tabelltid.
Tabell	Kortform av «Dekompresjonstabell»
Tabelldybde	Den dybden dekompresjonstabellen angir at brukeren skal benytte for å beregne dekompresjon. Tabelldybden vil typisk være lik eller nærmeste større dybdeangivelse enn den aktuelle dykkedybden.
Tabelltid	Den tiden dekompresjonstabellen angir at brukeren skal benytte for å beregne dekompresjonsbehovet. Tabelltiden vil typisk være lik eller nærmeste større tidsangivelse enn den aktuelle bunntiden.
TDT	Total dekompresjonstid
TFS	Trykkfallssyke
TUP	Dekompresjon i lukket klokke. «Transfer under pressure». I denne rapporten forstås TUP som overflateorientert dykking med luft eller Nitrox som bunn-gass og dekompresjon i lukket klokke med luft eller oksygen som pustegass.
U-100	NORSOK U-100
UPTD	Unit Pulmonary Toxic Dose. Et mål på oksygeneksponering.
USN	Den amerikanske marinen (US Navy)
USNDM	Dykkeprosedyrene til US Navy (US Navy Diving Manual). Det henvises til 7. utgave (2016) hvis ikke annet er eksplisitt angitt
VC, VK	Vital Capacity. Vitalkapasitet. Volumet av maksimalt utåndet luft i ett åndredrag. I Vedlegg B til dette dokumentet blir endring i VK drøftet som effektmål av hyperoksi på lungefunksjon. Text here

3.5 Enheter

Det er gjort to forenklinger ift trykkenheter i dette arbeidet:

- USN sine tabeller er publisert med dybdeangivelse i fot. Ved sammenligning mot de andre tabellene er det konvertert 3 fot = 1m. Dette er ikke nøyaktig. I lengde vil 3 fot = 0,91m, feilen er altså ca 3%. Konsekvensen vil være at tabellene foreslått i Vedlegg A vil være mer konservative enn originalversjonen fra USN.
- I Vedlegg B er trykkenhetene Bar og Atm brukt som likeverdige. Også det er unøyaktig. 1 Atm=1,01325 Bar. Forskjellen er altså på 1% og har ingen praktisk relevans for fortolkningen.

Forenklingene er gjort dels av arbeidsmessige hensyn, dels for å benytte ett sett enheter så langt det har vært praktisk mulig.

4 BAKGRUNN

NDBT ble første gang publisert 1980 som en NUI-rapport (1) og har blitt publisert som en selvstendig publikasjon fra 1986. Dekompresjonstabellene har vært i alminnelig bruk i norsk yrkesdykking siden da. De første to utgavene ble utgitt av Arne Johan Arntzen og Svein Eidsvik, i de siste to utgavene er forfatterne Jan Risberg, Olav Sande Eftedal og Andreas Møllerløyen. Den siste (femte) utgaven ble utgitt 2019.

Forfatterkollegiet ble 16.8.2019 kontaktet av Øyvind Loennechen, leder av NOROG Forum med følgende problemstilling

I forbindelse med at NOROG Forum for dykking og undervannsintervensjon har satt ned en arbeidsgruppe for TUP dykking ønsker vi å forespørre om forfatter kollegiet kunne etablere ett tabell verk for TUP dykking ned til 50meters dybde på luft / Nitrox. NDBT er referert i NORSOK som eneste godkjente luft tabell verk.

I den forbindelse ligger det også nærliggende å forespørre om kollegiet kunne tenke seg å presentere ett slikt tabell-rammeverk i forbindelse med Dykkeseminaret i November.

Tanken er at om arbeidsgruppen kommer til å forslå en innbygning av TUP dykking i NORSOK så vil NOROG Forumet be Ekspertgruppen i Standard Norge om å utarbeide ett forslag til rammeverk for TUP dykking for luft & Nitrox gassblandinger.

Om forfatter kollegiet er positive til denne henvendelsen kan man evt diskutere hvilke andre hensyn som må legges til grunn.

Forfatterkollegiet aksepterte henvendelsen (utfordringen!) og arbeidsmetode og framdrift framgår av etterfølgende avsnitt.

5 METODE

5.1 Innledning

Forfatterkollegiet har i perioden august-november 2019 avholdt 3 interne arbeidsmøter/telefonmøter (23.8, 19.9, 30.10 og 13.12) og ett møte med representanter for NOROG Forum (21.10). Foreløpige resultater ble presentert på Bergen International Diving Seminar 13.11 og i NOROG Forum (4.12). Forfatterkollegiet har innhentet og analysert data som beskrevet under:

- Identifisering av dekompresjonstabeller egnet for TUP-tabeller
- Analyse av tabellene – drøfting av styrker og svakheter ved de ulike tabellene
- Anbefaling av tabeller og utarbeide utkast for TUP-tabeller for inklusjon i NDBT
- Vurdering av oksygenbelastning og evt begrensninger i oksygenbelastning som bør innføres for å forhindre lungeskade.

«Dekompresjonsmetode» er i denne rapporten ment å være en generisk angivelse av en prosedyre for å bringe en dykker som oppholder seg under forhøyet ytre trykk tilbake til overflatetrykk. Vi bruker «dekompresjonstabell» om matrisen av stegvis reduksjon i omgivelsestrykk og spesifisering av pustegass under dekompresjon. Publikasjoner som inneholder dekompresjonstabellen vil typisk inneholde andre krav enn bare matrisen og det er vanskelig å dra grensen mellom «Dekompresjonsmetode» og «Dekompresjonstabell». I den videre framstillingen har vi valgt å bruke begrepet «Dekompresjonstabell» både om selve matrisen og de prosedyrene som er knyttet til dekompresjon. Der det ikke kan oppstå misforståelser har vi forenklet ytterligere til «Tabell».

5.2 Innhenting av tilgjengelig informasjon om dekompresjonsmetoder ved TUP-dykking

Følgende kilder ble identifisert:

- Internett søk (Individuelle og kombinerte søkeord: «TUP» «Transfer Under Pressure» «Decompression table»)
 - Vitenskapelige litteraturlagere
 - Pubmed
 - Rubicon Research Repository
 - Åpne søkemotorer
 - Google
- Åpent tilgjengelige dekompresjonstabeller
 - US Navy Diving Manual
 - Franske dekompresjonstabeller
 - Nederlandske dekompresjonstabeller
 - Canadiske dekompresjonstabeller
- Selskapsinterne dekompresjonstabeller utarbeidet for dykkeentreprenører på norsk kontinentalsokkel
 - Subsea7
 - Subseapartner
 - Technip
- Direkte (muntlig/e-post) diskusjon med enkeltpersoner og organisasjoner
 - DMAC

5.3 Avgrensning av datagrunnlaget

Forfatterne har vurdert prosedyrenes presisjonsnivå. Med dette forstås i hvilken grad dekompresjonsmetodikk er beskrevet på et detaljnivå som muliggjør operasjonell bruk – i praksis om de er tilgjengelige som konvensjonelle dekompresjonstabeller - alternativt om de bare er omtalt som generiske metoder. Det er en rekke rapporter og publikasjoner som har enkeltstående påstander og fragmentarisk informasjon om TUP-dekompresjonstabeller. Noen tabeller har ikke vært tilgjengelig for oss fordi distribusjonen er begrenset av kommersielle årsaker. Vi er også kjent med at mange dykkeentreprenører har brukt «bounce» prosedyrer i 1970 og 1980 årene, men heller ikke disse prosedyrene har vært tilgjengelig for oss.

5.4 Metodiske begrensninger

Dette arbeidet har flere viktige metodiske begrensninger. De fleste av disse skyldes ressursmessige forhold – arbeidet med denne rapporten har vært ulønnet. Vi har ikke hatt ressurser til å innhente tabeller for og erfaring med TUP-prosedyrer i andre regioner enn Nord-Europa. Vi har presentert arbeidet på «Bergen International Diving Seminar» 2019 og

har fått anledning til å diskutere problemstillingene med mange norske og utenlandske deltakere der. Vi har i tillegg tatt uformell direkte kontakt med enkelte utenlandske kolleger. Det er likevel en viktig begrensning i at rapporten ikke har blitt kritisk fagfellevurdert. Vi har ikke hatt ressurser til å diskutere detaljene personlig med forfatterne av de utenlandske tabellene. Vi har dermed begrenset oss til analyse av åpne, skriftlige kilder.

Forfatterkollegiet har avgrenset analysen til de dekompresjonstabellene som har vært åpent tilgjengelige.

5.5 Vurdering av sannsynlighet for trykkfallssyke

5.5.1 Variabler som er sammenlignet

Sannsynligheten for å få TFS er vurdert på bakgrunn av total dekompresjonstid og oksygenpustetid. Økning av oksygenpustetid (13) er forventet å gi mindre sannsynlighet for TFS. Sannsynlighet for TFS er også forventet å bli mindre ved lengre dekompresjonstid (12). Vi har imidlertid ikke metoder som gjør det mulig å analysere effekten av fordelingen av dekompresjonsstoppene.

5.5.2 Valg av dybde/bunntidskombinasjoner

Av ressursmessige hensyn har tabellene blitt sammenlignet for et utvalg av profiler («Datasett 1»). Vi har valgt tabelldybdene 15, 18, 24, 30, 36m og 42m. Disse tabelldybdene ble valgt fordi de omfatter det dybdeområdet hvor bruk av TUP vil gi størst forlengelse av bunntid sammenlignet med standard dekompresjon i sjø og overflatedekompresjon med oksygen. På hver av disse tabelldybdene er det valgt ut tre bunntider: Lengste tillatte bunntid (NDBT) for dykk med TUP, lengste tillatte bunntid for et dykk uten TUP og en bunntid mellom disse to yttergrensene. Profilene som er evaluert er listet i Tabell 1 under og blir benevnt «Datasett 1». Noen av dekompresjonstabellene har manglet spesifisering av dekompresjon for enkelte tabelldybder/bunntidskombinasjoner. I disse tilfellene har vi valgt å analysere nærmeste opplistede bunntid. Som det framgår av Tabell 1 så gjelder dette en profil på 18m tabelldybde og to profiler på 24m tabelldybde.

Vi har gjort en utvidet sammenligning av USN og nederlandske tabeller. Dette datasettet («Datasett 2») består av samtlige 14 tabelldybder mellom 12 og 51 meter. For hver tabelldybde er det valgt ut lengste tillatte bunntid for et TUP-dykk.

5.5.3 Beregning av total dekompresjonstid og oksygenpustetid

Vi har avlest TDT for hver profil slik de er angitt i de aktuelle dekompresjonstabellene. Oksygenpustetid er beregnet ved å summere oksygenpustetid på alle dekompresjonsstopp. Eventuelle avbrudd med luftpusting er ikke inkludert i oksygenpustetid.

	Dybde (m)					
	15	18	24	30	36	42
Bunntid (min)	150	80*	70	50	40	30
	210	120	100	80	60	40
	240	140	140	110	80	60
		180	160*			
			180*			

Tabell 1 Tabelldybde og bunntidskombinasjoner som er sammenlignet. Generelt er det valgt lengste bunntid for hver tabelldybde tillatt for TUP-dykking (merket med kursiv), lengste bunntid for dykk uten TUP (uthevet) og en mellomliggende bunntid. Enkelte tabeller har ikke stipulert dekompresjonsprosedyre for de ønskede dybde/bunntidskombinasjonene. I slike tilfeller har vi supplert med alternative profiler. Disse alternative profilene er markert med *. For noen ønskede tabelldybde/tabelltidskombinasjoner hadde ingen av tabellene listet dekompresjonsangivelse. Det gjelder 15m og 36m profilen hvor lengste tillatte bunntid for et ikke-TUP dykk er hhv 180 og 35 min. Det samme gjelder 36 og 42m tabelldybde hvor lengste tillatte bunntid for et TUP-dykk er hhv 85 og 65 min. I disse tilfellene ble nærmeste listede bunntid valgt.

5.5.4 Sammenligning av USN og nederlandske tabeller

Vi har gjort en ytterligere sammenligning av USN og nederlandske tabeller.

Vi har tatt utgangspunkt i profilene listet i Tabell 1. Som første del av analysen har vi beregnet forskjell i TDT (Figur 13) og oksygenpustetid (Figur 14) mellom de to tabellene. Forventningen er at lengre TDT og lengre oksygenpustetid vil redusere sannsynligheten for TFS hvis øvrige forhold er uendret.

I en etterfølgende analyse har vi benyttet Datasett 2 – profilene med lengste tillatte bunntid for TUP-dykk for samtlige tabelldybder mellom 12 og 51 meter. Vi har forsøkt å avklare om en forskjell i TDT og oksygenpustetid er assosiert med profilens forventede sannsynlighet for TFS (P_{DCS}). Generelt øker sannsynligheten for TFS ved økning av dybde og forlengelse av bunntid. P_{DCS} er avlest fra Appendix E i NEDU rapport 12-01 (20). Vi har benyttet $P_{DCS-USN}$ iht NMRI98 modellen for «VVAL-79 AIR/In-Water O₂, 20 fsw Last allowed stop». Dette er estimatet for TFS ved bruk av USN sine prosedyrer for dekompresjon med luft og oksygen i sjø og som er de prosedyrene vi har tilpasset for bruk i TUP (Vedlegg A til denne rapporten). Eksempelet i Figur 1. viser at et dykk til 18 meter (60 fot) med 120 min forventes å ha 2,7% sannsynlighet for TFS.

Estimated Risks of DCS

Depth (fsw) /BT(min)	VVal-79 AIR; 20 fsw Last Allowed In-Water Stop						VVal-79 AIR/In-Water O ₂ , 20 fsw Last Allowed Stop						VVal-79 SurDO ₂							
	TOTAL												TOTAL							
	STOP												STOP				P(DCS)			
	P(DCS)						P(DCS) ² ; IWO ₂ FO ₂ =99.5%						P(DCS)							
TIME		BVM(3)		NMRI98		TIME		BVM(3)		NMRI98		BVM(3)		NMRI98						
(min)	(%)	low	high	(%)	low	high	(min)	(%)	low	high	(%)	low	high	(%)	low	high				
60/ 120	75	4.218	3.617 - 4.884	4.571	3.819	5.418	26	2.476	1.962 - 3.082	2.679	1.935 - 3.611	1.815	1.396	2.323	3.529	2.364 - 5.047				
60/ 130	102	4.685	3.978 - 5.472	4.999	4.194	5.901	31	2.608	2.089 - 3.214	2.797	1.981 - 3.831	1.921	1.492	2.436	3.102	1.900 - 4.767				
60/ 140	124	5.097	4.327 - 5.954	5.437	4.571	6.403	35	2.781	1.837 - 4.034	2.982	2.097 - 4.108	2.313	1.848	2.858	3.565	2.339 - 5.183				

Figur 1 Faksimile fra Appendix E i NEDU-rapport TR 12-01 (20). Verdien i kolonne «NMRI98 (%)» er benyttet for å estimere sannsynligheten for TFS ($P_{DCS-USN}$) i en gitt profil. Estimatet for profilen 18m/120 min er markert med rød sirkel.

Sannsynligheten for TFS er altså beregnet iht NMRI98 probabilistiske modell (17). NMRI98 modellen predikerer sannsynligheten for TFS som en tidsfunksjon hvor punkt-sannsynligheten er proporsjonal med overmetning i tre «compartments». Modellen beregner

overmetning som en funksjon av eksponentiell innvasking og blandet eksponentiell-lineær utvasking modifisert av omfang av hyperoksi i pustegassen.

Etter å ha avlest sannsynligheten for TFS for USN-profilene i Datasett 2 så har vi sortert disse profilene etter økende forventet $P_{DCS-USN}$. For hver profil har vi beregnet forskjell i TDT og Oksygenpustetid mellom USN og Nederlandske tabeller. Denne analysen er ment å synliggjør om forskjeller i dekompresjonsanvisning mellom de to tabellene påvirker dykk med lav eller høy risiko for TFS ulikt.

6 RESULTAT

6.1 Identifisering av tilgjengelige dekompresjonstabeller

6.1.1 Søk i lærebøker, litteraturl databaser og åpne internett-søk

Den mest anerkjente læreboken i dykkemedisin (Bennett and Elliott's Physiology and medicine of diving (2) har ingen omtale av TUP-prosedyrer utover en kort angivelse av tilpasninger gjort i dykkevirksomheten i Nordsjøen etter 1986: *They have also implemented transfer-under-pressure and saturation techniques.*

Det ble gjort flere databasesøk, disse ble gjentatt 29.10.2019 og refereres under.

- Søk i Pubmed (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>) med frasene «TUP and diving» eller «Transfer under presure» ga ingen treff.
- Søk i Rubicon Research Repository (<http://archive.rubicon-foundation.org/xmlui/>) på emnetittel "Transfer under pressure" ga ett treff (4) som referer til en presentasjon av UK «Chief Inspector of Diving» mht status for dykking i Nordsjøen 1979. I dette innlegget drøftes kort hvordan dykkerklokken skal sikres til dekompresjonskammeret på overflaten, men dykketabeller omtales ikke.
- Søk i Google (<https://www.google.com>) på kombinasjoner av «TUP» «Decompression table» og «Decompression tables» gir henvisning til Wikipedia, IMCA, N-Sea (nederlandsk dykkeentreprenør), NDBT m.fl. som *omtaler* TUP dekompresjon, men uten kilder for konkrete dekompresjonstabeller.

Vi har etter dette gjennomgått for oss tilgjengelige dekompresjonstabeller med bruk av luft eller Nitrox som bunn-gass og luft og oksygen som dekompresjonsgass.

6.1.2 US Navy Diving Manual Rev 7

Siste utgave (6) ble utgitt 2018. Tabellene inneholder prosedyrer for dykking med luft og Nitrox som bunn-gass og med luft og oksygen som pustegass under dekompresjon i sjø («In water air/O₂). Prosedyren er altså ikke primært utviklet for dekompresjon i lukket klokke. Figur 2 viser et eksempel på prosedyre fra denne tabellen. Dekompresjon gjennomføres med luft på dybder dypere enn 9 meter. Oksygenpusting avbrytes etter 30 min med 5 min pusting av luft før oksygenpusting gjenopptas. Prinsippet for beregning av gjentatt dykk og flyging etter dykking er identisk med det som benyttes i Norske Dykke- og behandlingstabeller. Gjentatt dykk kan gjøres 0-16t etter foregående dykk (evt 18t hvis det ikke er tilordnet nitrogengruppe etter foregående dykk). Tabellene er utarbeidet etter en åpent tilgjengelig algoritme/regnmodell (Thalman E-L) og parametersett (VVAL79). Selve den deterministiske regnmodellen er validert etter en avansert statistisk metodikk (probabilistisk modellering) mot mer enn 3000 nøye overvåkede eksperimentelle forsøksdykk.

Table 9-9. Air Decompression Table (Continued).
(DESCENT RATE 75 FPM—ASCENT RATE 30 FPM)

Bottom Time (min)	Time to First Stop (M:S)	Gas Mix	DECOMPRESSION STOPS (FSW) Stop times (min) include travel time, except first air and first O ₂ stop								Total Ascent Time (M:S)	Chamber O ₂ Periods	Repet Group	
			100	90	80	70	60	50	40	30				20
60 FSW														
63	2:00	AIR									0	2:00	0	K
		AIR/O ₂									0	2:00		
65	1:20	AIR									2	4:00	0.5	L
		AIR/O ₂									1	3:00		
70	1:20	AIR									7	9:00	0.5	L
		AIR/O ₂									4	6:00		
80	1:20	AIR									14	16:00	0.5	N
		AIR/O ₂									7	9:00		
In-Water Air/O ₂ Decompression or SurDO ₂ Recommended -----														
90	1:20	AIR									23	25:00	0.5	O
		AIR/O ₂									10	12:00		
100	1:20	AIR									42	44:00	1	Z
		AIR/O ₂									15	17:00		
110	1:20	AIR									57	59:00	1	Z
		AIR/O ₂									21	23:00		
120	1:20	AIR									75	77:00	1	Z
		AIR/O ₂									26	28:00		
Exceptional Exposure: In-Water Air Decompression ----- In-Water Air/O ₂ Decompression or SurDO ₂ Required -----														
130	1:20	AIR									102	104:00	1.5	Z
		AIR/O ₂									31	33:00		
140	1:20	AIR									124	126:00	1.5	Z
		AIR/O ₂									35	37:00		
150	1:20	AIR									143	145:00	2	Z
		AIR/O ₂									41	48:00		
160	1:20	AIR									158	160:00	2	Z
		AIR/O ₂									48	55:00		

Figur 2 Eksempel (faksimile) av en side i USNDM (6). Linjene merket "Air/O₂" anviser dekompresjon med luft og oksygen som pustegass i sjø. Beregning av dekompresjon for etterfølgende dykk (inntil 18t) bestemmes av N₂-gruppen (Repet Group).

6.1.3 Franske tabeller

De franske tabellene ble utgitt i siste versjon 2012(7)). Disse har to dekompresjonsprosedyrer relevant for TUP-dykking. Den ene prosedyren (Figur 3) er utarbeidet for dekompresjon i åpen eller lukket klokke med oksygen som pustegass på dekompresjonsstopp på 12m og grunnere. Den andre prosedyren (Figur 4) er utarbeidet for dekompresjon i sjø med luft som pustegass på dekompresjonsstopp dypere enn 6m og oksygen som pustegass på 6m stopp. Oksygen pustes kontinuerlig uten «luftpauser» ved begge prosedyrene. Franske prosedyrer inkluderer også rutiner for gjentatt dykk kortere enn 12t etter foregående dykk. Gjentatt dykk beregnes ut fra en tabelltid som tilsvarer summen av aktuell bunntid og et bunntidstillegg. Bunntidstillegget bestemmes av overflateintervallet (Figur 5). Nytt enkelt-dykk kan gjøres etter 12t. Tabellene er utarbeidet med en «fri gassfase» algoritme med antagelse om at arterielle bobler bidrar til sykdomsutvikling (8). Forfatterkollegiet har ikke funnet rapporter som verifiserer prosedyrenes sikkerhet ift TFS.

Profondeur 18 mètres

Temps au fond min	Remontée au palier min:sec	Air 21m	Air 18m	Air 15m	Oxy 12m	Oxy 9m	Oxy 6m	Total décomp. min:sec	Plongée successive
110	0:30	-	-	-	5	5	5	15:30	Possible
120	0:30	-	-	-	5	5	10	20:30	Possible
130	0:30	-	-	-	5	10	10	25:30	Possible
140	0:30	-	-	-	10	10	10	30:30	Possible
150	0:30	-	-	-	10	10	15	35:30	Possible
180	0:30	-	-	-	10	15	15	40:30	Non
210	0:30	-	-	-	15	15	20	50:30	Non
240	0:30	-	-	-	20	20	20	60:30	Non
270	0:30	-	-	-	20	20	25	65:30	Non
300	0:30	-	-	-	25	25	30	80:30	Non

Figur 3 Eksempel (faksimile) av en side i de franske dykketabellene (7). Utviklet for dekompresjon i lukket klokke. Oksygenpusting fra 12m og grunnere. Ytterste høyre kolonne markerer om det er tillatt med gjentatt dykk før 12t.

Profondeur 18 mètres

Temps au fond min	Remontée au palier min:sec	Air 21m	Air 18m	Air 15m	Air 12m	Air 9m	Oxy 6m	Total décomp. min:sec	Plongée successive
60	1:00	-	-	-	-	-	3	4:00	Possible
70	1:00	-	-	-	-	-	5	6:00	Possible
80	1:00	-	-	-	-	-	7	8:00	Possible
90	1:00	-	-	-	-	-	10	11:00	Possible
100	1:00	-	-	-	-	-	15	16:00	Possible
110	1:00	-	-	-	-	-	15	16:00	Possible
120	1:00	-	-	-	-	-	20	21:00	Possible
130	1:00	-	-	-	-	-	25	26:00	Possible
140	1:00	-	-	-	-	-	30	31:00	Possible
150	1:00	-	-	-	-	-	35	36:00	Possible
180	1:00	-	-	-	-	-	40	41:00	Non
210	1:00	-	-	-	-	-	50	51:00	Non
240	1:00	-	-	-	-	-	60	61:00	Non

Figur 4 Eksempel (faksimile) av en side i de franske dykketabellene (7). Utviklet for dekompresjon i sjø. Oksygenpusting på grunneste dekompresjonsstopp (6m). Ytterste høyre kolonne markerer om det er tillatt med gjentatt dykk før 12t.

Prof. Plongée Success.	<u>Intervalle de surface compris entre :</u>									
	0h00 0h29	0h30 0h44	0h45 0h59	1h00 1h29	1h30 1h59	2h00 2h59	3h00 3h59	4h00 4h59	5h00 5h59	6h00 11h59
12-15 m	110	90	80	70	60	50	40	30	20	15
15-18 m	85	70	60	55	50	40	30	20	10	10
18-20 m	65	55	50	45	40	30	25	15	10	10
21-23 m	55	45	45	40	35	25	20	15	10	10
24-26 m	50	40	35	35	25	25	15	15	10	5
27-29 m	45	35	35	30	25	20	15	10	10	5
30-32 m	40	30	30	25	25	20	15	10	10	5
33-35 m	35	30	25	25	20	20	15	10	5	5
36-38 m	30	25	25	25	20	15	15	10	5	5
39-41 m	30	25	25	20	20	15	10	10	5	5
42-44 m	25	25	20	20	15	15	10	10	5	5
45-47 m	25	20	20	20	15	15	10	10	5	5
48-50 m	25	20	20	15	15	15	10	10	5	5
51 m	25	20	20	15	15	10	10	5	5	5
	Durée à ajouter au temps réel pour obtenir le temps équivalent									

Figur 5 Tabell (faksimile) for beregning av bunntidstillegg ved gjentatt dykking iht franske dekompresjonstabeller (7).

6.1.4 Canadiske tabeller

De canadiske tabellene ble første gang utgitt 1986 av Defence and Civil Institute of Environmental Medicine (DCIEM). Siste utgave er publisert 2009 (9) av Defence R&D Canada. Tabellene inneholder prosedyrer for dekompresjon med oksygen som pustegass i sjø. Dykkeren puster luft på dekompresjonsstopp 12m og dypere. Grunneste dekompresjonsstopp er på 9m og her puster dykkeren oksygen. Det er anbefalt, men ikke pålagt, å puste luft i 5 min etter 30 min sammenhengende oksygenpusting. Et utdrag av tabellene er presentert i Figur 6. Canadiske tabeller tillater gjentatt dykk og beregner tabelltiden for et gjentatt dykk ved å multiplisere den aktuelle bunntiden med en faktor. Faktoren beregnes med utgangspunkt i N2 gruppe fra foregående dykk og lengden på overflateintervallet.

Algoritmen er beskrevet/tilgjengelig i generiske termer (se utfyllende opplysninger i (9)), men detaljene og parametersettet er ikke publisert åpent. De Canadiske tabellene har vært omfattende testet under nøye kontrollerte betingelser og med bruk av ultralyd for å måle venøse gasebolier. Det er likevel vanskelig å klarlegge testomfanget av dekompresjon med oksygen som pustegass.

TABLE 2: IN-WATER OXYGEN DECOMPRESSION (METRES)

Depth (msw)	Bottom Time (min)	Stop Times (min) at Different Depths (msw)						Decom. Time (min)	Repet. Group
		Air					O ₂		
		24	21	18	15	12	9		
15	75	-	-	-	-	-	-	1	G
	120	-	-	-	-	-	5	6	J
	130	-	-	-	-	-	10	11	J
	140	-	-	-	-	-	14	15	K
	160	-	-	-	-	-	19	20	
	180	-	-	-	-	-	23	24	
	200	-	-	-	-	-	27	28	
	220	-	-	-	-	-	31	32	
	240	-	-	-	-	-	35	36	
	260	-	-	-	-	-	38	39	
280	-	-	-	-	-	41	42		
18	50	-	-	-	-	-	-	1	F
	80	-	-	-	-	-	5	6	H
	90	-	-	-	-	-	10	12	J
	100	-	-	-	-	-	15	17	J
	110	-	-	-	-	-	19	21	K
	120	-	-	-	-	-	22	24	K
	140	-	-	-	-	-	28	30	
	160	-	-	-	-	-	33	35	
	180	-	-	-	-	-	38	40	
	200	-	-	-	-	-	43	45	
	220	-	-	-	-	-	48	50	
	240	-	-	-	-	-	53	55	

O₂ stop times do not include ascent time to 9 msw.

Figur 6 Eksempel (faksimile) av en side i de canadiske dykketabellene (8). Utviklet for dekompresjon i sjø. Oksygenpusting på 9m som også er grunneste dekompresjonsstopp. Ytterste høyre kolonne angir nitrogenoverskudd etter avsluttet dykk (Repet. Group/N2 gruppe) som vil an vise bunntidstillegg for etterfølgende dykk i inntil 18timer senere.

TABLE 4: REPETITIVE DIVING (METRES)

A. REPETITIVE FACTORS/SURFACE INTERVALS TABLE											
Repet. Group (RG)	Repetitive Factors (RF) for Surface Intervals (SI) in hr:min										
	0:15 → 0:29	0:30 → 0:59	1:00 → 1:29	1:30 → 1:59	2:00 → 2:59	3:00 → 3:59	4:00 → 5:59	6:00 → 8:59	9:00 → 11:59	12:00 → 14:59	15:00 → 18:00
A	1.4	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0
B	1.5	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0
C	1.6	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0
D	1.8	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0
E	1.9	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0
F	2.0	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0
G	-	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0
H	-	-	1.9	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.1	1.1	1.1
I	-	-	2.0	1.8	1.7	1.5	1.4	1.3	1.1	1.1	1.1
J	-	-	-	1.9	1.8	1.6	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1
K	-	-	-	2.0	1.9	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	1.1
L	-	-	-	-	2.0	1.7	1.6	1.4	1.2	1.1	1.1
M	-	-	-	-	-	1.8	1.6	1.4	1.2	1.1	1.1
N	-	-	-	-	-	1.9	1.7	1.4	1.2	1.1	1.1
O	-	-	-	-	-	2.0	1.7	1.4	1.2	1.1	1.1

Figur 7 Tabell for beregning av bunntidstillegg iht Canadiske prosedyrer (faksimile fra (9)). Tabelltiden for et etterfølgende dykk beregnes ved å multiplisere den aktuelle bunntiden (på det gjentatte dykket) med en faktor.

6.1.5 Nederlandske tabeller

De nederlandske tabellene, utgitt av NDC, ble utgitt i siste utgave 2015 (10). De er basert på en regnemodell utviklet i 1975 og første gang publisert som dekompresjonstabell for luft i 1988. Algoritmen skal iflg forfatteren være en «Neo Haldanian», men verken detaljer i algoritme eller parametersett er publisert åpent. Tabellene har blitt videreutviklet basert på innrapportering av dykk fra brukerne. I 1991 rapporterte førsteforfatteren at det var registrert mer enn 5000 dykk i deres database (11). Tabellene er offisielt anerkjent i Nederland og er i omfattende bruk på nederlandsk kontinentalsokkel. Vi har ikke klart å finne rapporter som beskriver omfanget av, og erfaringene med, prosedyrene for dekompresjon med oksygen i vann. Tabellene inkluderer en prosedyre for dykking med våt og tørr klokke med oksygenpusting på 9 og 6 meter. Tabellen anviser 5 min luftpauser etter 20 min oksygenpusting. Tabellene tillater nytt enkelt-dykk etter samme metode etter 12 timers overflateintervall, men det kan gjøres et gjentatt dykk med luft eller overflatedekompresjon med oksygen etter 2-4 timer.

Vi er kjent med at DCD som er utgiver av de nederlandske tabellene også har utarbeidet spesielle TUP-tabeller med luft og trimix som bunnings (Rob Borgonjen, presentasjon

Bergen International Diving Seminar 13.11.2019). Disse er ikke publisert åpent og er derfor ikke inkludert i analysen.



DCD DECOMPRESSION TABLES 2015: Revised NDC tables

Copyright: DADCODAT 2015

dry or wet bell air diving, air-oxygen decompression tables

Code: **box15**

maximum diving depth 18 metres

ascent speed is max. 10 metres/minute

stop time starts after arrival at stop

repetitive interval is 12 hours

dive time (min.)	till 1st stop	stop depth in metres											tot. deco time (min.)	tot. OTU	
		24 air	21 air	18 air	15 air	12 air	9 ox	6 air	6 ox	6 air	6 ox	6 air			6 ox
60	0.9						15	-	-	-	-	-	-	16.8	49
70	0.9						20	-	-	-	-	-	-	21.8	64
80	0.9						20	5	-	-	-	-	-	26.8	66
100	0.9						20	5	5	-	-	-	-	31.8	80
110	0.9						20	5	10	-	-	-	-	36.8	92
120	0.9						20	5	15	-	-	-	-	41.8	104
130	0.9						20	5	20	-	-	-	-	46.8	116
140	0.9						20	5	20	5	5	-	-	56.8	128
160	0.9						20	5	20	5	10	-	-	61.8	143
170	0.9						20	5	20	5	15	-	-	66.8	155
180	0.9						20	5	20	5	20	-	-	71.8	167

Page F - 6

Figur 8 Eksempel (faksimile) av en side i de nederlandske dykketabellene (10). Utviklet for dekompresjon i sjø. Oksygenpusting på dekompresjonsstopp på 9 og 6 m, 5 min luftepauser etter 20 min oksygenpusting. Nytt dykk med luft eller overflatedekompresjon med oksygen kan gjøres etter 2-4 timer, men nytt dykk med dekompresjon med oksygen kan først gjøres etter 12t overflateintervall.

6.1.6 S7 og Technip

S7 og Technip oversendte sine tabeller til gjennomlesing. Begge selskapene har franske tabeller som utgangspunkt for sine selskapsinterne tabeller. Stikkprøver viste enkelte avvik i total dekompresjonstid mellom de originale franske og de selskapsinterne, men disse forskjellene var på 1-2 min og uten praktisk relevans (trolig forskjell i avrunding).

6.1.7 SubseaPartner

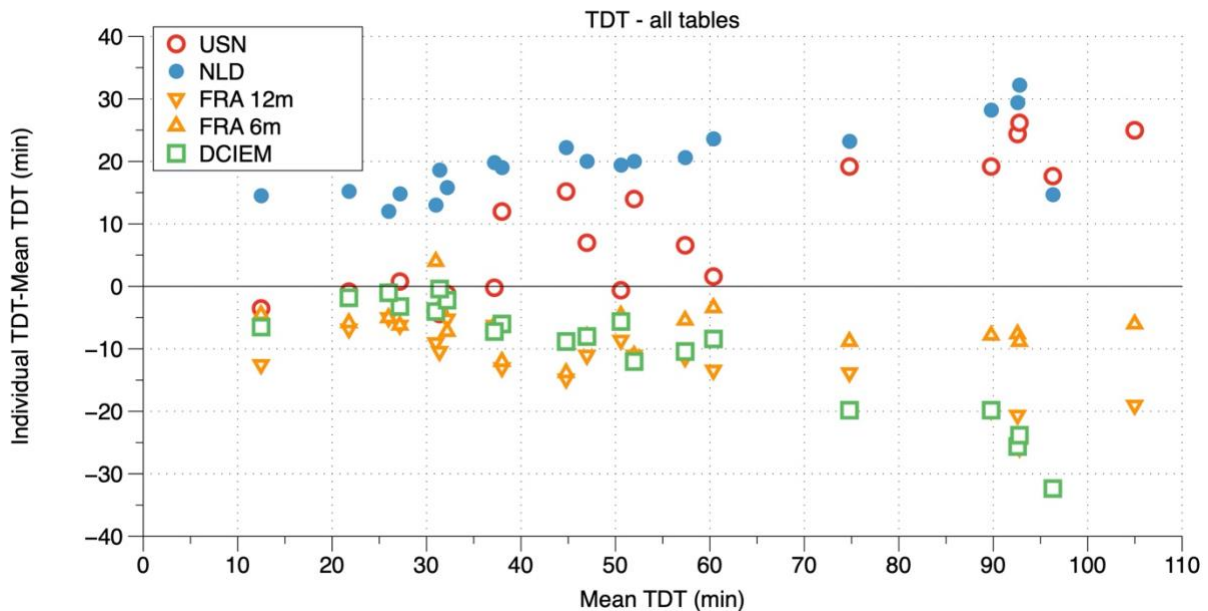
SubseaPartner sine dekompresjonstabeller er basert på USNDM.

6.2 Sammenligning av dekompresjonstabeller

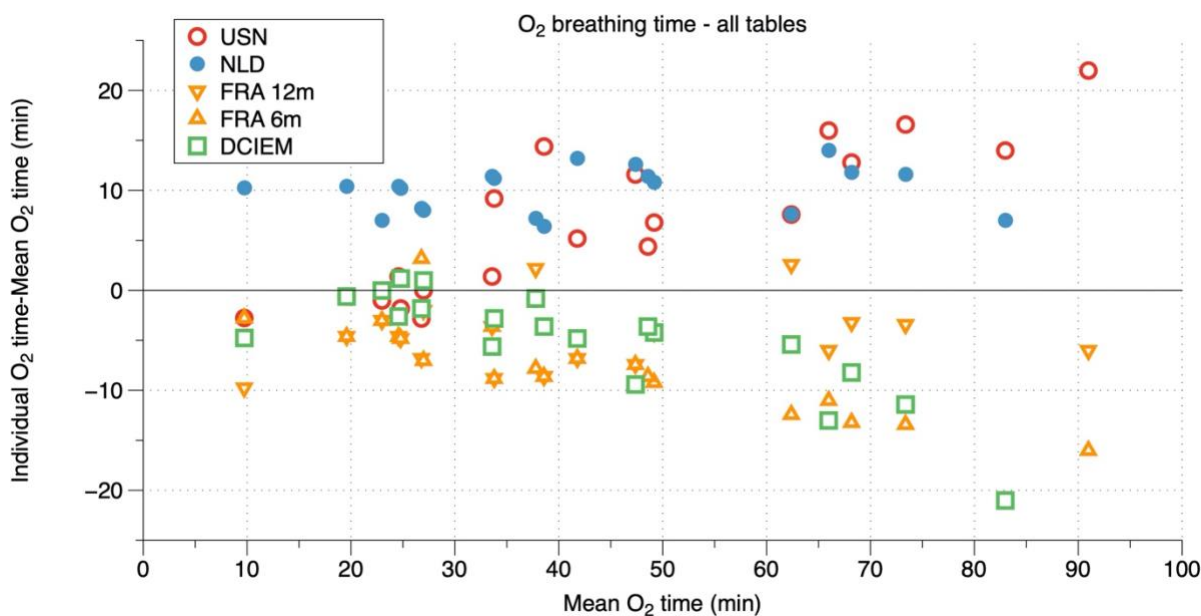
6.2.1 Sammenligning av total dekompresjonstid og oksygenpustetid

Total dekompresjonstid (TDT) og oksygenpustetid varierte mellom de ulike tabellene. Figur 9 og Figur 10 gir en grafisk presentasjon av denne variasjonen i form av en Bland-Altman plot. Dette plotet beskriver avvik fra gjennomsnittlig beregnet total dekompresjonstid (TDT). Et eksempel: På profilen 15m/210 min vil gjennomsnittlig TDT for alle analyserte tabeller være 38 min. Nederlandske tabeller har 19 min lengre TDT enn gjennomsnittet, USN 12 min lenger, mens de to franske og den canadiske tabellen har hhv 13, 12 og 6 min kortere dekompresjonstid enn gjennomsnittet. Spredningen av disse punktene sees ved å gå avlese grafen på 38 min TDT.

Det framgår av figurene at både TDT og oksygenpustetid er lengre i USN og nederlandske tabeller enn for franske og canadiske. Forskjellene synes å øke ved økende TDT og oksygenpustetid (visuelt vurdert, ikke statistisk analysert). Forskjellene i TDT mellom den mest liberale og den mest konservative prosedyrer varierer mellom 21 og 58 minutter. Forskjellen øker med økende TDT som vist i Figur 9. Tilsvarende var forskjellen i oksygenpustetid mellom den mest konservative og den mest liberale prosedyren 15-38 min – også her økende med økende oksygenpustetid (Figur 10).

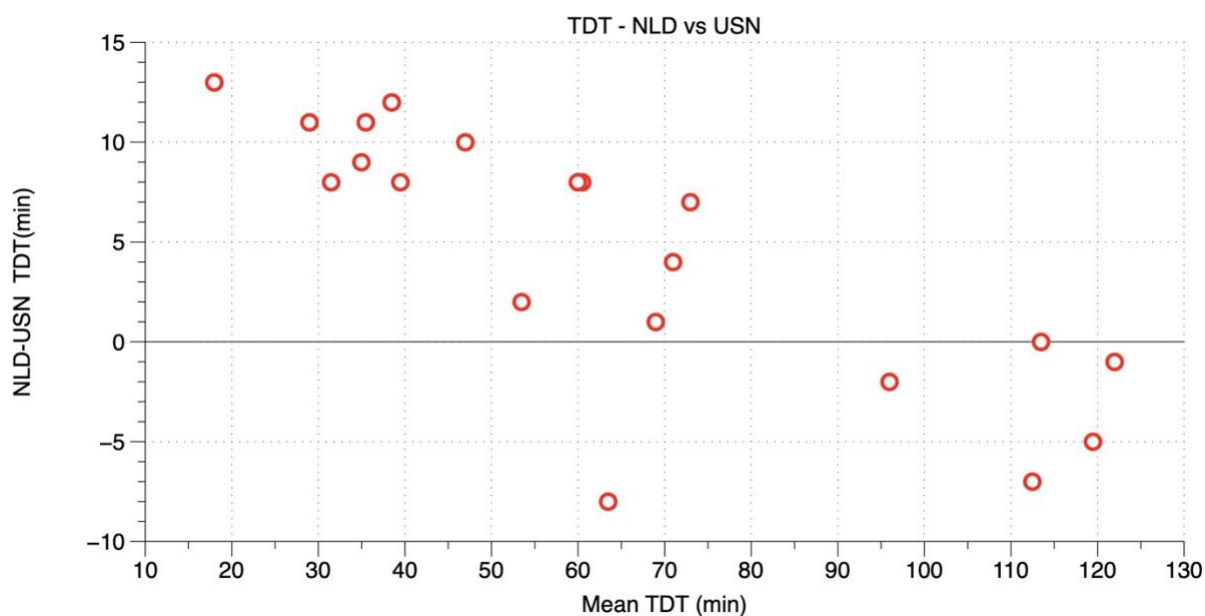


Figur 9 Forskjell i total dekompresjonstid (TDT, min) for fem ulike dekompresjonstabeller presentert i Bland-Altman plot. Hvert punkt representerer en tabelldybde-bunntids profil. Avvik (y-aksen) er beregnet ved å sammenligne TDT for individuelle tabelldybder/bunntider for hver enkelt tabell sammenlignet med gjennomsnittet av TDT for alle tabellene (x-aksen). Punkter som ligger over den horisontale linjen markerer profiler med mer konservativ dekompresjon enn gjennomsnittet. DCIEM: Canadiske tabeller FRA 6m: Franske tabeller med oksygenpusting på 6m. FRA 12m: Franske tabeller med oksygenpusting på 12m dekompresjonsstopp og grunnere NLD: Nederlandske tabeller USN: US Navy tabeller.

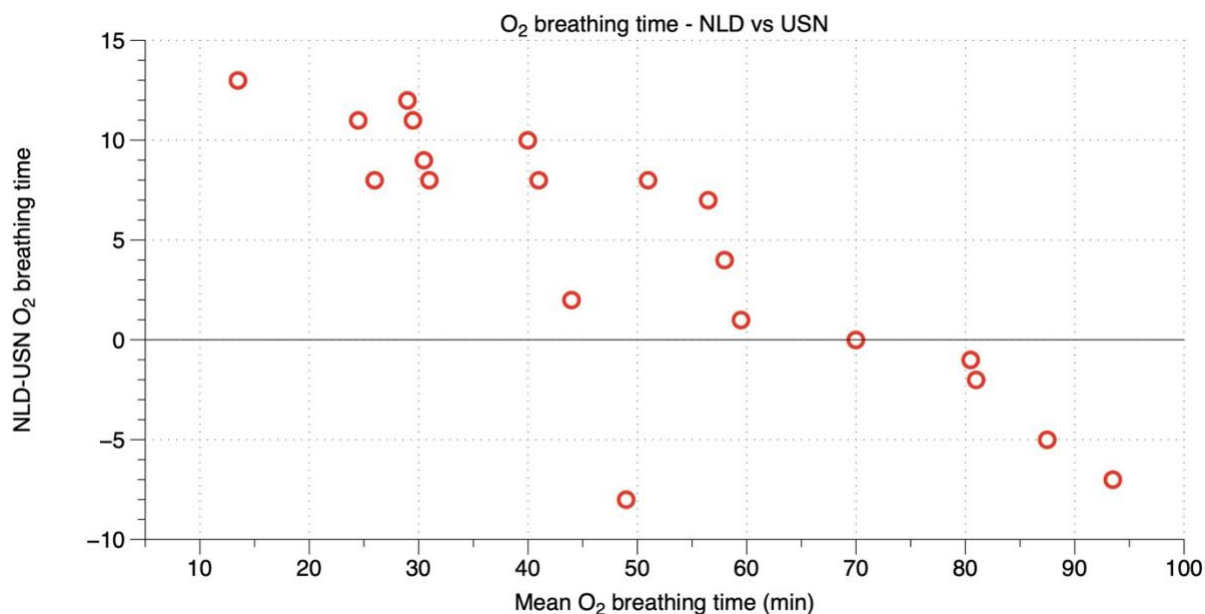


Figur 10 Forskjell i oksygenpustetid (O_2 time, min) for fem ulike dekompresjonstabeller presentert i Bland-Altman plot. Hvert punkt representerer en tabelldybde-bunntids profil. Avvik (y-aksen) er beregnet ved å sammenligne oksygenpustetid for individuelle tabelldybder/bunntider for hver enkelt tabell sammenlignet med gjennomsnittet av oksygenpustetid for alle tabellene (x-aksen). Punkter over den horisontale linjen markerer profiler med mer konservativ dekompresjon enn gjennomsnittet. DCIEM: Canadiske tabeller FRA 6m: Franske tabeller med oksygenpusting på 6m. FRA 12m: Franske tabeller med oksygenpusting på 12m dekompresjonsstopp og grunnere NLD: Nederlandske tabeller USN: US Navy tabeller.

Etter den innledende analysen av tabellene har vi sammenlignet Nederlandske og USN prosedyrer. Forskjellen i TDT var liten (12 ± 7 min) og samvariasjonen stor ($r=0,69$). Tilsvarende sammenheng ble observert i oksygenpustetid ($r=0,84$), men den gjennomsnittlige forskjellen her var enda mindre (4 ± 6 min). Som det framgår av Figur 11 og Figur 12 så er altså Nederlandske tabeller vesentlig mer konservative (lengre TDT og lengre oksygenpustetid) på dykk med korte dekompresjonstider, mens USN er noe mer konservativ på de lengste dekompresjonstidene.



Figur 11 Forskjell i total dekompresjonstid (TDT) mellom Nederlandske og USN tabeller sammenlignet med gjennomsnittlig TDT for de to tabellene. Hvert punkt markerer en tabelldybde/bunntidskombinasjon. Punkter som ligger over den heltrukne horisontale linjen markerer dykkeprofiler hvor nederlandske tabeller har mer konservativ dekompresjon enn USN.



Figur 12 Forskjell i total oksygenpustetid mellom Nederlandske og USN tabeller sammenlignet med gjennomsnittlig oksygenpustetid for de to tabellene. Hvert punkt markerer en tabelldybde/bunntidskombinasjon. Punkter som ligger over den heltrukne horisontale linjen markerer dykkeprofiler hvor nederlandske tabeller har mer konservativ dekompresjon enn USN.

6.3 Operasjonelt bruksområde

Samtlige tabeller inkluderer dekompresjon med luft som pustegass ned til 50 meter, dykking med Nitrox (ELD) og har prosedyrer for gjentatt dykking. Franske tabeller inkluderer ikke rutiner for flyging etter dykking, øvrige tabeller har spesifisert dette. Canadiske og USN tabeller tillater nytt enkelt-dykk etter et overflateintervall på 18 timer, mens franske og

nederlandske tabeller tillater nytt enkelt-dykk etter 12 timer. Bunntidstillegg varierer avhengig av bunntid og dybde. Nederlandske tabeller tillater ikke gjentatt dykk. Et dykk til 18m i 120 min etterfulgt av 6t overflateintervall vil på et etterfølgende dykk til samme dybde gi et bunntidstillegg på hhv 58 min, 40 min og 29 min (USN, FRA, CAN).

7 DISKUSJON

7.1 «Bounce» dykking vs TUP-dykking

I diskusjonen omkring prosedyrer for TUP-dykking blir ofte begrepet «bouncedykking» trukket fram. Bouncedykking var vanlig i 1970 og 1980-årene. Begrepet er ikke entydig definert, men har sin historiske opprinnelse ved dyp dykking med heliox med lukket klokke. Bunntiden var begrenset så for å utnytte den optimalt skjeddde kompresjon hurtig med dykkerne i klokka. Dekompresjon ble gjennomført med sekvenser av gass-skifter og med siste del av dekompresjon i et større kammer på overflaten. Metoden har i ettertid vært oppfattet som utrygg og Hamilton og Thalmann skriver (2): *DCS incidence has not been reported formally, but it was probably in the range of 10-20% for the more stressful dives (Hamilton 1976)*. Det refereres her til en “proceeding” fra et møte i 1976 (3). Imbert (4) refererer erfaringene til Comex Services Company med CX70 heliox tabeller som med TUP prosedyrer hadde en TFS insidens på 3,8%. Dette var tabeller for dykking ned til 120 m med inntil 120 min bunntid, dekompresjon med luft og deretter oksygen som pustegass. Det er viktig å merke seg at den dekompresjonsmetoden som drøftes i denne rapporten (TUP-dykking) omhandler dykk med luft eller Nitrox som pustegass, dybde begrenset til 50m og dekompresjon i lukket klokke. Dekompresjonstabeller vil være tilsvarende dem utarbeidet for bruk i sjø, men muliggjør dekompresjon i et tørt kammer, med tilfredsstillende temperaturkontroll og nøye overvåket dekompresjon og gass-tilførsel. Selv om tidligere «bounce» prosedyrer og de foreslåtte TUP-prosedyrer medfører bruk av lukket klokke og isobar overføring fra klokke til dekompresjonskammer så er forskjellene ellers så store at det ikke vil være riktig å sammenligne 40-50 år gamle «bounce» prosedyrer med moderne TUP-prosedyrer. Som angitt i definisjonkapittelet så vil vi i denne rapporten definere TUP som overflateorientert dykking med lukket klokke, luft eller Nitrox som bunningsgass og luft og oksygen som dekompresjonsgass.

7.2 Sannsynlighet for trykkfallssyke – enkelt-dykk

Alle tabellene som er analysert i dette arbeidet er betraktet som «anerkjente» og blir benyttet som de facto nasjonale standarder i de land de er utgitt i tillegg til at de benyttes i kommersiell yrkesdykkersammenheng internasjonalt. De er utviklet over årtier og har vært omfattende benyttet. Det er ikke grunnlag for å si at noen av disse tabellene generelt skal betraktes som «usikre» eller at en av disse tabellene er «best» når det gjelder å forhindre TFS. Det er ikke grunnlag for å fraråde bruken av noen av dem.

7.2.1 Canadiske og franske tabeller

Det er en utfordring at dokumentasjon av tabellenes sikkerhet – i form av eksperimentell uttesting eller robuste epidemiologiske data – er så mangelfulle. Et eksempel er de Canadiske tabellene (9). I innledningen til disse tabellene refereres det til at det fram til 1967 var gjennomført 5000 dykk, i tidsrommet 1967-1971 ble det gjennomført mer enn 2000 dykk, mellom 1983 og 1986 mer enn 1200 dykk og mellom 1986 og 1991 ca 1500 dykk. Totalt er altså de canadiske tabellene testet opp mot ca 10 000 dykk. Utfordringen er at rapporteringen av disse dykkene ikke er gjort med en detaljeringsgrad som gjør det mulig å

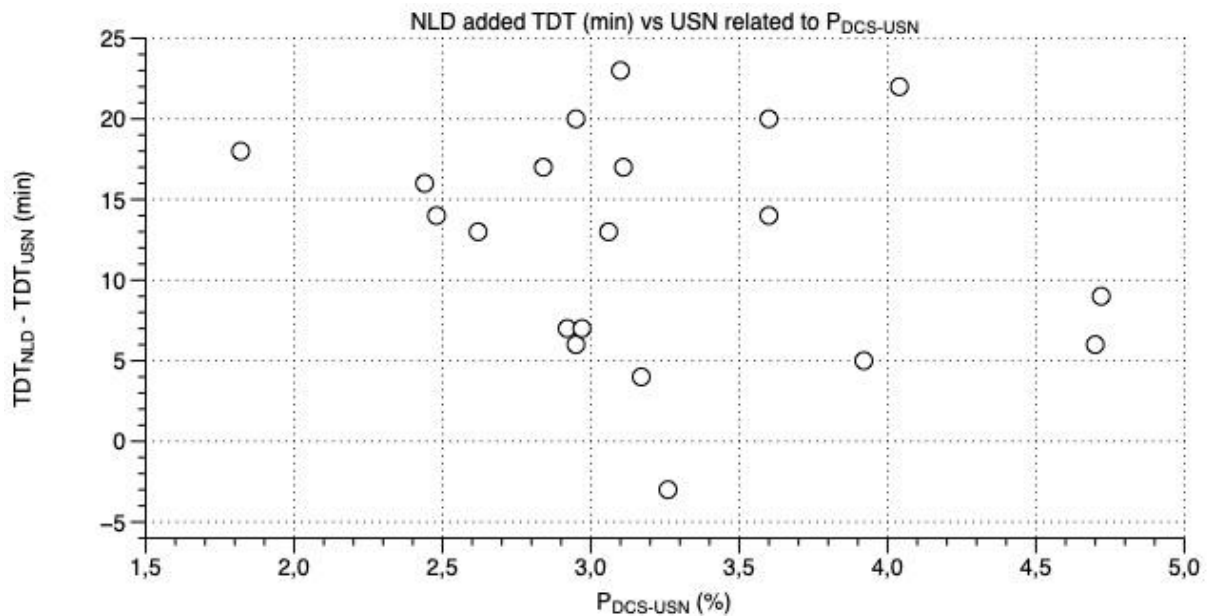
isolere tabellsikkerheten for de enkelte dykkemetoder, dybdeområder eller bunntider. Ved gjennomgang av åpen litteratur om testing av de deler av tabellene som omfatter dekompresjon med oksygen i sjø, så rapporterer Sawatzky (14) at 73 Nitrox dykk med denne dykkemetoden inngikk i studien hans, men profilene er ikke referert og ikke omfanget av TFS.

Når det gjelder de franske tabellene så refererer Hamilton og Thalmann (2) til en møtepresentasjon av Imbert og Bontoux som angir at Comex observerte at insidensen av TFS var 2-3 ganger lavere med dekompresjon med oksygen i sjø enn med dekompresjon i luft for de samme dybder/bunntider. Vi har ikke klart å få tilgang til originalrapporten og det er derfor ikke mulig å analysere resultatene. Tilsvarende dokumentasjonsmangel gjelder de nederlandske tabellene.

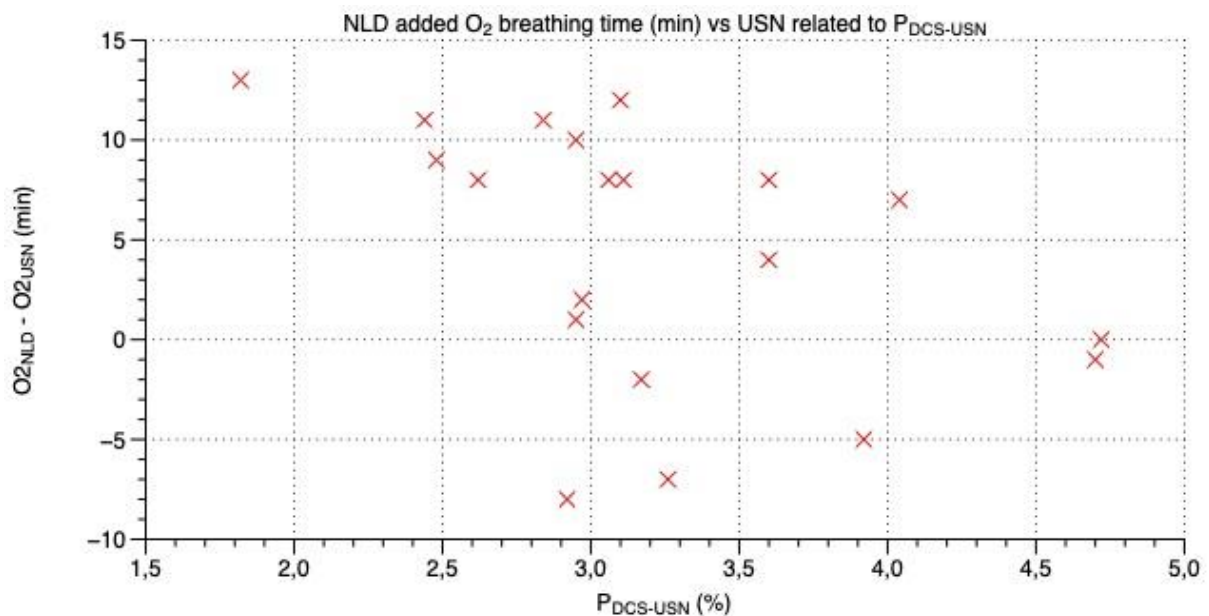
7.2.2 Nederlandske og USN tabeller

USN tabeller er utarbeidet etter en probabilistisk modell. Det er for omfattende å gå inn på detaljene omkring denne metoden, det vises til Ball og Schwartz (16) for et sammendrag. Det grunnleggende premisset er at modellen predikerer TFS som en sannsynlighet (ikke en ja/nei hendelse) avhengig av overmetning. Denne modellen (17) er kalibrert mot 4335 dykk med 223 TFS. Av disse dykkene er 427 dykk med OD-O₂ og 587 dykk med dekompresjon med oksygen i sjø. Vår oppfatning er at algoritmen til USN (Thalmann sin E-L modell (18)) uten sammenligning er den best dokumenterte og validerte modellen. Skal man introdusere en ny dekompresjonsmetode (i dette tilfellet TUP) så mener vi det er riktigst å sammenligne alternative dekompresjonsmetoder opp mot USN.

Som vist i Figur 9 og Figur 10 grupperer Nederlandske og USN tabeller seg som konservative (lenger TDT og oksygenpustetid) enn franske og canadiske. Forskjellen i dekompresjonstid og oksygenpustetid mellom nederlandske og USN prosedyrer er forholdsvis liten selv om nederlandske tabeller er vesentlig mer konservative enn USN ved korte dekompresjonstider, mens USN er noe mer konservativ ved de lengste dekompresjonstidene. Hvilken konsekvens dette har for sannsynligheten for TFS kan fastslås ved observasjon under eksperimentelle dykk, gode epidemiologiske studier eller estimeres ved statistiske metoder. Ressursbegrensninger gjør at det ikke er realistisk å forvente at det vil bli gjort tilstrekkelige eksperimentelle studier eller epidemiologiske kartlegginger til at risikoen for den enkelte dykkeprofilen kan fastsettes nøyaktig. I fravær av slike data har vi sett på hvilken sannsynlighet for TFS som kan forventes ved å følge USN prosedyrene for de enkelte kombinasjonene av dybde/bunntid. Vi har analysert de dybde/bunntidsprofilene som er angitt i Tabell 1. Det framgår at nederlandske tabeller har forlenget TDT i forhold til USN for alle profiler med kun et enkelt unntak. Vi har ikke de nødvendige statistiske modellene til å kunne anslå hvor stor effektstørrelse en forlenget TDT vil ha på sannsynlighet for TFS og analysen vanskeliggjøres ytterligere av at forlengelsen av TDT både skjer pga forlenget oksygenpustetid og forlenget luftpustetid. Ettersom oksygenpusting forkorter dekompresjonstiden 2-3 ganger (6) så er en analyse av forskjell i oksygenpustetid viktig for å forstå forskjellen mellom tabellene. Denne forskjellen er framstilt i Figur 14



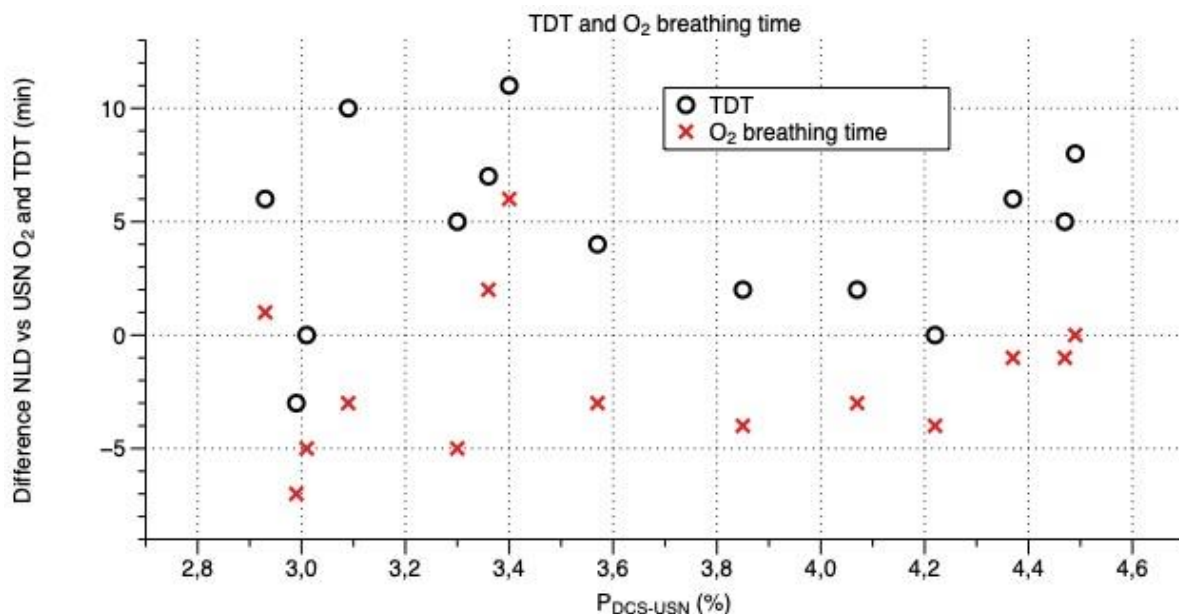
Figur 13 Forskjell i total dekompresjonstid (TDT, Y-aksen) mellom nederlandske (NLD) og amerikanske (USN) prosedyrer for utvalgte dybde/bunntidskombinasjoner (se Tabell 1). På X-aksen er det angitt forventet sannsynlighet for TFS ($P_{DCS-USN}$) ved dekompresjon iht USN. Punkter over 0 på y-aksen markerer dybde/bunntidskombinasjoner hvor NLD prosedyrer er mer konservative enn USN. Motsatt vil punkter under 0 på y-aksen identifisere profiler hvor USN er mer konservativ enn NLD.



Figur 14 Forskjell i Oksygenpustetid (O₂, Y-aksen) mellom nederlandske (NLD) og amerikanske (USN) prosedyrer for utvalgte dybde/bunntidskombinasjoner (se Tabell 1). På X-aksen er det angitt forventet sannsynlighet for TFS ($P_{DCS-USN}$) ved dekompresjon iht USN. Punkter over 0 på y-aksen markerer dybde/bunntidskombinasjoner hvor NLD prosedyrer er mer konservative enn USN. Motsatt vil punkter under 0 på y-aksen identifisere profiler hvor USN er mer konservativ enn NLD.

I de foregående analysene er TDT og oksygenpustetid sammenlignet ved et begrenset antall tabelldybder og bunntider. Det er derfor en mulighet for at andre tabelldybder og bunntider kunne vise andre resultater. Ideelt skulle alle tabelldybder og bunntider bli undersøkt, men det ville ha vært for ressurskrevende. Men for å supplere analysen ble TDT og oksygenpustetid i nederlandske og USN tabeller sammenlignet for Datasett 2 – de lengste tillatte bunntidene for TUP dykk for samtlige 14 tabelldybder mellom 12 og 51m. Figur 15 presenterer dette datasettet av «lengste tillatte bunntider på alle tabelldybder» på samme

måte som Figur 13 og Figur 14. Som det framgår er det forskjell i TDT og oksygenpustetid mellom NLD og USN prosedyrer. Generelt har nederlandske tabeller lengre TDT, men kortere oksygenpustetid enn USN. Forskjellene er imidlertid små og er ikke korrelert med profilens forventede sannsynlighet for TFS.



Figur 15 Forskjell i TDT (svarte sirkler) og oksygenpustetid (røde kryss) mellom NLD og USN prosedyrer. Hvert punkt representerer lengste tillatte bunntid for hver tabelldybde mellom 12 og 51m. På X-aksen er det angitt forventet sannsynlighet for TFS ($P_{DCS-USN}$) ved dekompresjon iht USN. Punkter over 0 på y-aksen markerer dybde/bunntidskombinasjoner hvor NLD prosedyrer er mer konservative enn USN. Motsatt vil punkter under 0 på y-aksen identifisere profiler hvor USN er mer konservativ enn NLD.

Oppsummert så viser analysen at nederlandske og USN prosedyrer generelt har lengre TDT og oksygenpustetid enn canadiske og franske. Forskjellen er systematisk og for mange dykkeprofiler stor. I fravær av data som dokumenterer annerledes må «føre var» prinsippet tilsi at nederlandske eller USN tabeller foretrekkes. Ved sammenligning av nederlandske og USN prosedyrer er forskjellene mindre. Generelt har nederlandske prosedyrer lengre TDT og lengre oksygenpustetid enn USN, men for de lengste bunntidene har USN prosedyrer noe lengre oksygenpustetid enn nederlandske. Forskjellene i TDT og oksygenpustetid mellom nederlandske og USN tabeller er likevel små og vil neppe påvirke forventet sannsynlighet for TFS i vesentlig grad.

7.3 Sannsynlighet for TFS – gjentatt dykk

De fem prosedyrene har ulike krav til overflateintervall (OI) for å kunne gjennomføre nytt enkelt-dykk. Nederlandske prosedyrer tillater ikke nytt dykk med kortere OI enn 12 timer. For dykk med lange bunntider vil USN og canadiske prosedyrer pålegge OI på 18t, mens franske (og nederlandske) prosedyrer krever et OI på 12t. Grensen for «lange» bunntider varierer mellom de ulike tabellene. For kortere bunntider tillater altså canadiske, franske og USN gjentatt dykk med kortere OI enn 12t. Gjentatt dykk beregnes med et bunntidstillegg på det etterfølgende dykket som bestemmes av lengden på OI. Det vil være svært arbeidskrevende å gjennomføre en sammenligning av bunntidstillegg for alle tabellene på en representativ samling av dybde/bunntidskombinasjoner for ulike første og gjentatte dykk og med varierende OI. Vi har gjort en begrenset sammenligning av bunntidstillegg for tre ulike

dybde/bunntidskombinasjoner med ulike overflateintervall. Gjentatt dykk er forutsatt gjennomført til samme dybde som det første dykket. Spesifikasjon av dybde, bunntid og OI samt resulterende bunntidstillegg er presentert i Tabell 2. På de tre beregnede profilene er USN prosedyrene mest konservativ (gir størst bunntidstillegg på etterfølgende dykk), mens franske prosedyrer er minst konservative. Forskjellen er stor og det er sannsynlig at USN prosedyrer vil ha lavere sannsynlighet for TFS enn de andre prosedyrene ved de eksemplifiserte profilene.

Dybde (m)	BT (min)	OI (t)	Bunntidstillegg for samme dybde (min)		
			FRA	CAN	USN
15	140	2	50	74	109
24	80	8	5	18	29
30	55	6	5	13	33

Tabell 2 Bunntidstillegg for gjentatt dykk iht franske, canadiske og USN prosedyrer. Sammenligning er gjort med tre ulike dybde/bunntidskombinasjoner. Det er beregnet bunntidstillegg for dykk til samme dybde med overflateintervall (OI) som spesifisert. Jo større bunntidstillegget er, jo mer konservativ er prosedyren.

At tabellene har forskjellige prosedyrer for gjentatt dykk og minste OI før nytt enkelt-dykk gjør det altså krevende å sammenligne dem. Overordnet kan prosedyrenes rangeres etter fallende grad av «konservatisme»:

- Dykk med OI>18t: Samtlige tabeller angir dette som nytt enkelt-dykk
- Dykk med OI 12-18t: USN>Canadiske>>Nederlandske og Franske
- Dykk med OI 0-12t: Nederlandske>USN>>Canadiske>Franske

7.4 Operasjonell fleksibilitet

Med «operasjonell fleksibilitet» forstår vi i dette avsnittet tabellenes tilpasning til eksisterende NDBT (mulighet til å veksle mellom ulike pustegasser og dekompresjonsmetoder) samt spesifisering av rutiner for flyging etter dykking. Vi har valgt å ikke inkludere rutiner for dykking i høyden fordi vi anser det som lite sannsynlig at TUP-dykking vil være aktuelt for dette.

USN prosedyrer vil uten videre kunne integreres mot eksisterende NDBT fordi N₂ grupper og rutiner for flyging etter dykking er identiske. Ingen av de andre tabellene kan kombineres med gjentatte luft- eller OD-O₂ dykk iht NDBT før OI for nytt enkelt-dykk er passert. Franske prosedyrer angir ikke tidsintervall for flyging etter dykking. DCIEM krever 24t OI for alle dykk med dekompresjonsstopp, nederlandske tabeller krever 48t OI (DMAC 07 guidance note, 2017). Oppsummert så vil USN TUP prosedyrer være vesentlig enklere å bruke i sammenheng med NDBT enn de øvrige.

7.5 Sporbarhet ift algoritmer, parametersett, akseptkriterier og verifikasjon

Her kommer USN og nederlandske prosedyrer i særstilling – på hver sin måte. USN prosedyrer er utarbeidet med en offentlig publisert algoritme (Thalmanns EL algoritme (13)) og parametersett (20). Akseptkriterier og verifikasjon er klart beskrevet (20). USN tabeller er tabellen som har gjennomgått den nyeste oppdateringen (2018) og det matematiske og statistiske grunnlaget følges opp av flere forskere tilknyttet en stor F&U organisasjon (Navy Experimental Diving Unit (NEDU)). Det er en prosedyre som grunnet sin institusjonelle tilknytning kan forventes å bli videreutviklet i årene framover.

Nederlandske prosedyrer ble første gang utgitt 1988, men revidert 2015 og vedlikeholdes av to erfarne leger. Detaljene om algoritme og parametersett er ikke offentlige. Forfatterne har presentert sine erfaringer med tabellene i flere foredrag (proceedings)(24-27) og forfatterne angir i innledningen til sine tabeller at målet var å oppnå <0,5% insidens av TFS, men i en eldre publikasjon (26) refererer førsteforfatteren til problemene knyttet til korrekt registrering av dykk og operative erfaringer. Det refereres til 11 tilfeller av registrert TFS i en database på 25 902 dykk. En så lav insidensrate sannsynliggjør at databasen inneholder svært mange dykk som ikke er gjennomført til tabellgrensene. Det er dermed vanskelig å ta stilling til hvilken sikkerhet tabellene vil ha når de «dykkes ut».

Canadiske tabeller for dykking med luft som pustegass ble oppdatert løpende fram til 1986. Det ble riktignok gjort noen minimale forandringer i den siste revisjonen som ble publisert i 2009, men selve tabellverket har i praksis vært uendret siden 1986¹. Selve algoritmen er beskrevet i generelle termer, men det er ikke publisert detaljer om parametersett. Canadiske tabeller har vært omfattende testet under nøye kontrollerte betingelser og med bruk av både TFS og ultralydmonitorerte venøse gassembolier som endepunktsmål (9). Det er likevel ikke angitt hvordan tabellene har blitt justert som følge av testresultatene. Nishi og medarbeidere (28) angir at høye boblegrader (boblegrad III og IV hos mer enn 50% av forsøkspersonene) vil indikere en risiko for TFS på mer enn 5 %. Det framgår likevel ikke klart i kommentarene til siste utgave av de canadiske tabellene (9) om dette har vært brukt som et akseptkriterium.

Franske tabeller ble første gang publisert 1974, revidert i 1992 og siste gang publisert 2012 (7). De grunnleggende prinsippene for den underliggende algoritmen er publisert (8), men ikke med en detaljeringsgrad som muliggjør å etterprøve dem tilfredsstillende. Det mangler detaljert informasjon om forekomst av TFS ved bruk av de ulike tabelltypene. Imbert og Hugo refererer imidlertid en betydelig reduksjon av TFS ved overgang fra de gamle 1974 til 1992 tabellene – spesielt på dykk med høy gassbelastning ($PrT > 35$)(8). Det er ikke mulig å diskriminere mellom ulike dykkemetoder (dekompresjon med luft eller oksygen i sjø, OD-O₂) mht forekomst av TFS. Det har ikke vært mulig å finne vitenskapelige arbeider som dokumenterer utviklingen av franske tabeller siden 1992.

Oppsummert så framstår USN prosedyrer som den best dokumenterte og validerte tabellene av dem vi har vurdert. USN prosedyrer utvikles fortsatt i et fagmiljø knyttet til en veletablert forskningsinstitusjon (NEDU). Vi vil likevel understreke at ingen av de publiserte prosedyrene (heller ikke USN) har rapportert forekomst av TFS ved ulike typer TUP-dykking med luft som bunn-gass og luft og oksygen som dekompresjonsgass.

¹ Endringen i 2009 utgaven omfattet publisering av N₂ gruppe for bunntider kortere enn grensen for direkteoppstigningsdykk samt et obligatorisk minste 1 min stopp på 9m for OD-O₂ tabellene.

8 KONKLUSJON

Vi har ikke funnet vitenskapelige artikler som har gjort en systematisk sammenligning av TUP dekompresjonsprosedyrer. Våre anbefalinger er derfor basert på det grunnlaget som er referert i dette arbeidet. Detaljene framgår av avsnittene over. For å forenkle oversikten har vi valgt å sammenligne prosedyrene i nedenstående tabell. Vi har skåret dekompresjonstabellene for hvert kriterium slik at tabellen med beste prestasjon har gitt skår 1 og tabellen med dårligste prestasjon skår 4. I de tilfeller flere prosedyrer har samme prestasjon har de blitt gitt samme gjennomsnittlige skår. Vi har vurdert noen kriterier som viktigere enn andre og har derfor gjort en vektning.

Kriterium	Vekting	CAN	FRA	NLD	USN
Sannsynlighet TFS – enkelt-dykk	3	10,5	10,5	4,5	4,5
Sannsynlighet TFS – gjentatt dykk	1	3	3	3	1
Operasjonell fleksibilitet	1	3	3	3	1
Sporbarhet algoritme	1	2,5	2,5	4	1
Kontinuitet i tabellutvikling	1	2,5	4	2,5	1
Validering	2	4	7	7	2
Samlet skår		25,5	30	24	10,5
Rangering		3	4	2	1

Tabell 3 Sammenligning av Canadiske, Franske, Nederlandske og USN prosedyrer basert på seks kriterier. Kriteriene er vektet som angitt i andre kolonne. Laveste skår angir best oppfyllelse av kriteriene.

Som det framgår av oversikten så er det vår oppfatning at både Nederlandske og USN prosedyrer vil gi en tilfredsstillende sikkerhet for TFS ved enkelt-dykk. Når øvrige kriterier vektet inn er det vår anbefaling at USN-prosedyrer bør innarbeides i NDBT for TUP dekompresjon med luft eller Nitrox som bunn-gass og luft og oksygen som dekompresjonsgass.

9 REFERANSER

1. Arntzen AJ, Eidsvik S. Modified air and nitrox diving- and treatment tables. NUI Report No 30 80. 1980
2. Hamilton RW, Thalmann E. Decompression practice. I: Brubakk AO, Neuman TS. Bennett and Elliott's Physiology and medicine of diving. 5. utgave. Saunders 2003.
3. Hamilton RW. Development of decompression procedures for depths in excess of 400 feet. Undersea Medical Society 1976
4. Imbert JP. Commercial diving: 90m operational aspects. I: Lang MA og Smith NE. Proceedings of the Advanced Scientific Diving Workshop 23-24 Feb 2006. Smithsonian Institution Washington 2006; 103-118
5. Warner SA. Situation report covering diving in the off-shore industry in the North Sea in 1979. SPUMS J 1980;10(2): 15-17

6. U.S. Navy Diving Manual Rev 7, Change A. U.S. Navy Naval Sea Systems Command 2018
7. Annexes de l'arrete du 30 octobre 2012 relatif aux travaux subaquatiques effectues en milieu hyperbare (mention A). Journal officiel no 290. 13.12.2012.
8. Imbert JP, Paris D, Hugon J. The arterial bubble model for decompression tables calculation. Proceedings EUBS 30th annual meeting France 2004. Lastet ned 18.11.19 fra <https://pdfs.semanticscholar.org/cb5a/3cf172326781753a34942b67aebacbee55a6.pdf>
9. Revised metric decompression tables for air and surface-supplied helium-oxygen diving. TM 2009-218. Defence R&D Canada, 2009.
10. DCD Decompression tables. Revised decompression tables. Nationaal Duikcentrum. 2015.
11. Sterk W. The Netherlands national diving center data base. I: Sterk W, Hamilton RW. Operational dive and decompression data: Collection and analysis. EUBS Report (DATA) 17-8-90. Foundation Hyperbaric Med, Amsterdam 1991.
12. Van Liew, Flynn ET. A simple probabilistic model for standard air dives that is focused on total decompression time. Undersea Hyperb Med 2005;32(4):199-213
13. Thalmann ED, Parker EC, Survanshi SS, Weathersby PK. Improved probabilistic decompression model risk predictions using linear-exponential kinetics. Undersea Hyperb Med 1997;24(4):255-274
14. Sawatzky KD. The relationship between intravascular Doppler-detected gas bubbles and decompression sickness after bounce diving in humans. Thesis, York University 1991.
15. Imbert JP, Bontoux M. Production of procedures: Comex. I: Nashimoto I, Lanphier EH (red). Decompression in surface-based diving. 73(DEC)6/15/87. Undersea Hyperbaric Medical Society, Bethesda MD 1987.
16. Ball R, Schwartz SL. Kinetic and Dynamic Models of Diving Gases in Decompression Sickness Prevention. Clin Pharmacokinet 2002;41(6):389-402
17. Parker EC, Survanshi SS, Massell PB, Weathersby PK. Probabilistic models of the role of oxygen in human decompression sickness. J Appl Physiol 1998;84(3): 1096-1102
18. Thalmann ED, Parker EC, Survanshi SS, Weathersby PK. Improved probabilistic decompression model risk prediction using linear-exponential kinetics. Undersea Hyperb Med 1997;18:255-274
19. Risberg J, Møllerløykken A, Eftedal O. Norske dykke- og behandlingstabeller. 5. utgave. Eget forlag, 2019.
20. Gerth WA, Doolette DJ. Vval-79 maximum permissible tissue tension table for Thalmann Algorithm support of air diving. NEDU TR 12-01. Navy Experimental Diving Unit, Panama City, FL 2012.
21. Commercial diving projects offshore. Diving at work regulations 1997. Approved code of Practice and guidance. Health and Safety Executive 2014.
22. NORSOK U-100:2015. Manned underwater operations. Edition 5. Standard Norge 2015.
23. NORSOK U-103:2019. Petroleum related manned underwater operations inshore. Edition 4. Standard Norge 2019.
24. Sterk W, Vink N, Takashima R. DCI incidence for SurD NDC tables in the range of 48 to 51 metres. Proceedings EUBS XXIV annual scientific meeting in Stockholm 1998: 6-9. Lastet ned 18.11.19 fra <http://www.dadcodat.nl/cm4all/iproc.php/EUBS1998.pdf?cdp=a>
25. Sterk W. The Netherlands National Diving Center Data Base. I: Sterk W, Hamilton RW red. EUBS Workshop Publication (DATA) 17-8-90, 1990: 3-6. Lastet ned 18.11.19 fra <http://www.dadcodat.nl/cm4all/iproc.php/Dive%20Data-%20EUBS%20workshop%201990.pdf?cdp=a>

26. Sterk W. Incident analysis: How do we deal with submaximal data? I: Sterk W, Hamilton RW red. EUBS Workshop Publication (DATA) 17-8-90, 1990:107-110. Lastet ned 18.11.19 fra <http://www.dadcodat.nl/cm4all/iproc.php/Dive%20Data-%20EUBS%20workshop%201990.pdf?cdp=a>
27. Sterk W. «SOX» Surface decompression tables in the eastern Scheldt. Proceedings EUBS XIIth annual meeting Rotterdam, Holland 1986:115-123. Lastet ned 18.11.19 fra <http://www.dadcodat.nl/cm4all/iproc.php/EUBS1986.pdf?cdp=a>
28. Nishi RY, Brubakk AO, Eftedal OS. Bubble detection. I: Brubakk AO, Neuman TS (red). Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving. 5 utg. Saunders 2003.

1 VEDLEGG A - DRAFT NDTT TUP DECOMPRESSION PROCEDURES (ENGLISH ONLY)

1.1 Instructions for use

1. **Transfer under pressure (TUP)** is a means by which the diver is transferred from diving depth to surface in a closed and pressure-controlled diving bell. At surface the diving bell is connected to a deck decompression chamber (DDC). The diver will complete the decompression in this DDC.
2. **Benefit vs conventional surface oriented diving and SurDO₂.** Decompressing in a diving bell and DDC is much more comfortable and safer for the diver. The benefits include thermal comfort, relaxed seating, possibility to drink and eat. Tight pressure control and no need for a temporary pressure loss to surface pressure before recompression (as would be the case for SurDO₂) add to safety.
3. **Bottom time may be extended** compared to conventional surface oriented diving since UK (HSE, ACOP Commercial diving projects offshore Serial 44) and Norwegian (NORSOK U-100 8.2.2) allow significantly longer bottom times with TUP decompression compared to in-water and SurDO₂.
4. **Table design and origin.** These tables were developed for inclusion in the forthcoming Edition 6 of the Norwegian Diving and Treatment Tables. They were based on the US Navy air decompression tables with air/O₂ in-water decompression as published in US Navy Diving Manual Rev 7. Decompression is completed in the diving bell and DDC, the decompression stages and decompression times are otherwise identical to those published in US Navy Diving Manual Rev 7 except for the metric conversion. Estimated risk for DCS ranges 3,5-4,5% for the longest bottom times, i.e. in the same order as for conventional in-water air breathing decompression. Oxygen exposure is <300 OTUs unless indicated otherwise (by asterisk).
5. **Using the Table.** The table will be used in the same way as for ordinary dives except that all decompression will take place in the diving bell or the DDC. Select a table that matches the actual depth (for Nitrox, the EAD) or the next deeper table depth. The bottom time runs from the moment the diver leaves the surface until the bell hatch is closed and decompression is started. Table-wise this means rounding off to the next longer bottom time unless there is a table time listed that matches the bottom time exactly.

6. **The Bell Decompression Rate** to the first decompression stop and between the decompression stops should be 10 m/min. Minor deviations are acceptable and it is better to be too slow than too fast. The travel times listed for the deepest decompression stop is the time the diver should stay at this depth. The time listed for shallower stops include the decompression time from the deeper stop. Any major delays during the deeper part of the ascent should be compensated by switching to a longer bottom time, thus increasing the decompression penalty.
7. **Transfer from bell to DDC** should ideally take place while breathing chamber gas (compressed air). Do not transfer while breathing O₂ at 9 msw. If needed, O₂ breathing may be interrupted at 6 msw. The interruption should be 5 min or more to allow the succeeding O₂ breathing period to last for 30 min. For interruption of O₂ breathing 15 min or less then disregard the air breathing time with respect to decompression time. For longer periods of air breathing calculate reduction in required O₂ breathing time as described in section 13 below.
9. **Oxygen Breathing** should start when the internal pressure of the bell (or the DDC) reaches 9 msw. After each 30 min of oxygen breathing the diver removes the mask and breathes bell or DDC air for 5 min. There should be no air break after the last oxygen session before commencing the chamber decompression. These air breaks are not to be counted as oxygen time nor are any unplanned interruptions of the oxygen breathing periods. No more than 15 min of extra air breaks should be added. The O₂ breathing time tabulated for the 9 and 6 msw stop do *not* include air breaks.
10. **Chamber Decompression.** The chamber decompression should ideally be approximately 10 m/min. If the decompression rate is reduced due to technical limitations of the decompression chamber, the diver should be decompressed at a rate of 10 msw/min as long as possible. Too slow decompression at the terminal phase of decompression should not be compensated by accelerated decompression at the deepest part. The diver should breathe chamber gas throughout decompression from 6 msw even if decompression time from this depth is extended.
11. **The Total Decompression Time** listed in the last column is defined as the time from the start of bell decompression until the final decompression of the DDC to surface pressure. Scheduled air breaks (5 min per 30 min O₂ breathing) are included, but additional unplanned air breaks are not included. The time listed may differ from the actual by one minute due to rounding of numbers.

12. **Oxygen Toxicity - introduction.** Oxygen seizures in a chamber at 9 metres are unlikely. Nonetheless, should seizures occur the oxygen mask should be removed immediately. Pending the diving physician's approval oxygen breathing may be resumed at 9 msw (or 6 msw). Contact the duty diving physician. Prepare, *but do not provide*, anti-convulsant medication if company specific first aid kit hold these. Follow advice from the diving physician.
13. **Oxygen toxicity – diving physician not available.** If the seizures occur at 9 msw then let the diver breathe compressed air for twice the stipulated O₂ breathing time. Decompress 10 msw/min and continue compressed air breathing at 6 msw. If the dive had a repetitive dive group A-Z then triple the decompression time at 6 msw. If the dive was too long to be assigned a repetitive dive group then continue compressed air breathing for four times longer than the stipulated O₂ breathing time. Surface the chamber 10 msw/min.
14. **Oxygen toxicity – diving physician available – standard procedure:** Pending approval of the diving physician provide Midazolam 5mg intranasal (2,5 mg in each nostril). Observe breathing and level of consciousness (talk to the diver). Do not start O₂ breathing on BIBS until 15 min after drug administration. If seizures occur at 9 msw then let the diver breathe compressed air but double the remaining decompression time at 9 msw. Decompress 10 msw/min to 6 msw. If seizure occur at 6 msw let the diver breathe compressed air for 15 min after the seizures. Resume O₂ breathing. Air breathing period at 6 msw counts 1:4 relative to O₂ breathing. Make a new contact to the diving physician to decide whether additional 5 mg of Midazolam should be given intranasal. This would normally be the case if the diver is fully awake and breathing normally, but the final decision will be the diving physician. If a new seizure occur, then complete decompression with the diver breathing compressed air as described in section 13 above.
15. **If the oxygen supply should fail** the diver will breathe chamber atmosphere at the current depth. Complete decompression in accordance with section 13 above.
16. **Repetitive dives.** TUP dives should not be a repetitive dive, neither should a repetitive dive be planned after a TUP dive. The minimum surface interval required for a new single dive is determined conventionally based on the Repetitive Group and the table for adjustment of Repetitive Group during the surface interval. A number of profiles are not associated with a Repetitive Group. For such profiles a minimum of 18 hours should pass before the next dive. A second dive to a depth not exceeding an actual or EAD of 6 msw is allowed after any dive. If the diver completes a dive to depths not exceeding

6 m, the minimum surface interval before the next single dive should be extended by the dive time.

17. **Diving for consecutive days** increases the risk of DCI. The diver shall therefore have a day with no diving after each three-day period of diving. As always, the only exception is dives to a depth of 9 msw or less, including Nitrox dives to an EAD of 9 msw or less. Within this context, such shallow dives are not considered repetitive dives and may be carried out on a ‘no diving day’ without invalidating the break.
18. **Bottom time limitations and “exceptional dives”**. Prolonged O₂ breathing may cause pulmonary toxicity. Profiles with excessive oxygen load (>300 OTUs) should not be planned for and are identified by asterisk. Neither should there be dives with bottom times exceeding those stipulated by UK and Norwegian regulations. Bottom times exceeding such bottom time limitations are listed below the horizontal bold line in the tables. For comparison purposes, these tables identify maximum allowed bottom times for non-TUP dives with double underline.
19. **Predisposing Factors**. To compensate for factors known to increase the risk of DCS, the chamber oxygen time may be increased and/or a shorter bottom time selected.
20. **Oxygen Exposure**. To easier keep track of the oxygen exposure during SurDO₂ dives, the table below may be used. The table show the oxygen exposure in OTUs based on O₂ breathing time at 9 and 6 msw. In addition to the oxygen exposure during O₂ breathing, the diver will acquire OTUs during the bottom phase. Oxygen exposure during the bottom phase and decompression will not exceed 90 OTUs for dives

	Oxygen breathing time (min)											
	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
O ₂ @ 6msw	10	19	29	39	58	77	97	116	135	154	174	193

Table 1 Oxygen exposure (OTUs) during TUP diving with proposed procedure. Oxygen exposure at 9 and 6 msw to be added. Use exposure time equal or higher than the actual O₂ breathing time and summarize OTUs for the two stages.

21. **Example:**

PROBLEM: A TUP dive is planned for to 29m with air as the breathing gas. What is the longest bottom time that may be planned for and how should the dive be executed? What is his oxygen exposure level?

SOLUTION: The 30-metre table must be used, the longest bottom time that is allowed is 110 min. At the end of the bottom time, the diver returns to the bell. Pressure should be reduced approximately 10 msw/min until internal chamber pressure reaches 12 msw. Hold the pressure for 14 min, then decompress to 9 msw. The diver should start breathing O₂ from the BIBS. After 14 min at 9 msw, pressure should be reduced to 6 msw – the diver should continue breathing O₂. After 30 min of O₂ breathing (approximately 16 min at 6 msw), the diver should remove the BIBS mask for 5 min and breathe air. After 5 min of air breathing, he should resume O₂ breathing for another 30 min. He may now remove the mask and the chamber surfaced 10 msw/min. The diver is at surface approximately 1h 57 min after the ascent started. If longer air breaks are needed this will add to the decompression time.

The oxygen breathing is a total of 90 min with 14 min breathing @9 msw and 76 min breathing @6 msw. Round these figures to 15 and 80 min respectively. The diver will acquire 35 OTUs at 9msw and 154 OTUs at 6 msw – a total of 189 OTUs. The figure is not exact due to rounding of numbers and the fact that the oxygen exposure during the bottom phase is not included, neither the decompression time breathing compressed air.

1.2 TUP Table 12 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)				Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		15	12	9	6		
		Air		O ₂			
12 metres	160	–	–	–	–	1	O
	170	–	–	–	2	3	O
	180	–	–	–	5	6	Z
	190	–	–	–	7	8	Z
	200	–	–	–	9	10	Z
	210	–	–	–	11	12	Z
	220	–	–	–	12	13	Z
	230	–	–	–	16	17	Z
	240	–	–	–	19	20	Z
	270	–	–	–	26	27	Z
	300	–	–	–	33	34	

1.3 TUP Table 15 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)				Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		15	12	9	6		
		Air		O ₂			
15 metres	90	–	–	–	–	2	M
	95	–	–	–	1	3	M
	100	–	–	–	2	4	N
	110	–	–	–	4	6	O
	120	–	–	–	7	9	O
	130	–	–	–	12	14	Z
	140	–	–	–	16	18	Z
	150	–	–	–	19	21	Z
	160	–	–	–	23	25	Z
	170	–	–	–	26	28	Z
	180	–	–	–	30	32	Z
	190	–	–	–	35	37	Z
	200	–	–	–	39	46	Z
	210	–	–	–	43	50	
	220	–	–	–	47	54	
	230	–	–	–	50	57	
	240	–	–	–	53	60	
	270	–	–	–	62	69	
300	–	–	–	74	86		

TUP Table 18 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)				Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		15	12	9	6		
		Air		O ₂			
18 metres	60	–	–	–	–	2	K
	65	–	–	–	1	3	L
	70	–	–	–	4	6	L
	80	–	–	–	7	9	N
	90	–	–	–	10	12	O
	100	–	–	–	15	17	Z
	110	–	–	–	21	23	Z
	120	–	–	–	26	28	Z
	130	–	–	–	31	33	Z
	140	–	–	–	35	37	Z
	150	–	–	–	41	48	Z
	160	–	–	–	48	55	Z
	170	–	–	–	53	60	
	180	–	–	–	59	66	
	190	–	–	–	64	71	
	200	–	–	–	68	80	
	210	–	–	–	73	85	
	220	–	–	–	77	89	
230	–	–	–	82	94		
240	–	–	–	88	100		

1.4 TUP Table 21 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)				Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		15	12	9	6		
		Air		O ₂			
21 metres	45	–	–	–	–	2	K
	50	–	–	–	1	3	K
	55	–	–	–	5	7	L
	60	–	–	–	8	10	M
	70	–	–	–	13	15	N
	80	–	–	–	17	19	O
	90	–	–	–	24	26	Z
	100	–	–	–	31	33	Z
	110	–	–	–	38	45	Z
	120	–	–	–	44	51	Z
	130	–	–	–	51	58	Z
	140	–	–	–	59	66	
	150	–	–	–	66	78	
	160	–	–	1	72	85	
	170	–	–	1	78	91	
	180	–	–	2	83	97	
	190	–	–	3	88	103	
200	–	–	5	93	115		
210	–	–	7	98	122		
240	–	–	13	110	140		

1.5 TUP Table 24 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)				Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		15	12	9	6		
		Air		O ₂			
24 metres	35	–	–	–	–	3	J
	40	–	–	–	1	4	J
	45	–	–	–	5	8	K
	50	–	–	–	9	12	M
	55	–	–	–	13	16	M
	60	–	–	–	16	19	N
	70	–	–	–	22	25	O
	80	–	–	–	30	33	Z
	90	–	–	–	39	47	Z
	100	–	–	1	46	54	Z
	110	–	–	3	51	61	Z
	120	–	–	5	59	71	
	130	–	–	7	67	86	
	140	–	–	9	73	94	
	150	–	–	10	80	102	
	160	–	–	11	86	114	
	170	–	–	14	90	121	
180 *	–	–	17	96	130		
210	–	–	26	110	158		

1.6 TUP Table 27 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)				Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		15	12	9	6		
		Air		O ₂			
27 metres	30	–	–	–	–	3	J
	35	–	–	–	2	5	J
	40	–	–	–	7	10	L
	45	–	–	–	12	15	M
	50	–	–	–	17	20	N
	55	–	–	–	21	24	O
	60	–	–	–	24	27	O
	70	–	–	–	32	35	Z
	80	–	–	3	40	51	Z
	90	–	–	7	46	61	Z
	100	–	–	10	53	71	
	110	–	–	13	61	87	
	120	–	2	14	70	99	
	130	–	5	14	79	111	
	140	–	8	14	87	127	
	150	–	11	17	94	140	
	160	–	13	20	101	152	
	170	–	15	23	106	167	
180	–	16	26	112	177		
240	–	42	34	159	268		

1.7 TUP Table 30 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)				Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		15	12	9	6		
		Air		O ₂			
30 metres	25	–	–	–	–	3	H
	30	–	–	–	2	5	J
	35	–	–	–	8	11	L
	40	–	–	–	14	17	M
	45	–	–	–	19	22	N
	50	–	–	–	24	27	O
	55	–	–	–	28	31	Z
	60	–	–	–	33	36	Z
	70	–	–	6	39	53	Z
	80	–	–	11	45	64	Z
	90	–	2	14	53	82	
	100	–	9	14	66	102	
	110	–	14	14	76	117	
	120	–	19	14	85	136	
	150	3	26	23	109	184	

1.8 TUP Table 33 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)						Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		21	18	15	12	9	6		
		Air			O ₂				
33 metres	20	–	–	–	–	–	–	4	H
	25	–	–	–	–	–	3	7	I
	30	–	–	–	–	–	7	11	K
	35	–	–	–	–	–	14	18	M
	40	–	–	–	–	–	20	24	N
	45	–	–	–	–	–	26	30	O
	50	–	–	–	–	–	32	36	Z
	55	–	–	–	–	3	33	44	Z
	60	–	–	–	–	7	36	51	Z
	70	–	–	–	–	14	42	64	Z
	80	–	–	–	9	14	54	90	
	90	–	–	–	18	14	68	113	
	95	–	–	–	25	14	79	131	
	100	–	–	–	25	14	79	131	
	110	–	–	5	26	14	91	154	
120	–	–	10	26	18	101	173		
180	–	3	23	47	34	159	299		

TUP Table 36 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)						Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		21	18	15	12	9	6		
		Air			O ₂				
36 metres	15	–	–	–	–	–	–	4	F
	20	–	–	–	–	–	2	6	H
	25	–	–	–	–	–	5	9	J
	30	–	–	–	–	–	13	17	L
	35	–	–	–	–	–	20	24	N
	40	–	–	–	–	1	26	31	O
	45	–	–	–	–	2	31	37	Z
	50	–	–	–	–	5	33	47	Z
	55	–	–	–	–	10	35	54	Z
	60	–	–	–	–	14	39	62	Z
	70	–	–	–	13	14	51	87	
	80	–	–	–	24	14	67	119	
	85	–	–	7	26	14	80	140	
	90	–	–	7	26	14	80	140	
	100	–	–	15	25	14	95	167	
110	–	–	21	25	19	105	188		
120	–	3	23	25	24	113	211		

1.9 TUP Table 39 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)						Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		21	18	15	12	9	6		
		Air			O ₂				
39 metres	10	–	–	–	–	–	–	4	F
	15	–	–	–	–	–	2	6	G
	20	–	–	–	–	–	5	9	I
	25	–	–	–	–	–	9	13	K
	30	–	–	–	–	1	17	22	M
	35	–	–	–	–	3	23	30	O
	40	–	–	–	–	3	30	37	Z
	45	–	–	–	1	6	33	49	Z
	50	–	–	–	2	10	36	57	Z
	55	–	–	–	4	14	40	67	Z
	60	–	–	–	12	14	46	81	Z
	70	–	–	1	26	14	63	118	
	75	–	–	12	26	14	79	145	
	80	–	–	12	26	14	79	145	
	90	–	–	22	25	14	95	175	
100	–	6	23	26	20	106	204		
120	–	17	24	27	29	130	255		
180	13	21	45	57	46	198	418		

1.10 TUP Table 42 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)						Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		21	18	15	12	9	6		
		Air			O ₂				
42 metres	10	–	–	–	–	–	–	5	E
	15	–	–	–	–	–	3	8	H
	20	–	–	–	–	–	7	12	J
	25	–	–	–	–	2	12	18	L
	30	–	–	–	–	4	19	27	N
	35	–	–	–	2	4	26	36	O
	40	–	–	–	4	4	33	50	Z
	45	–	–	–	5	9	36	59	Z
	50	–	–	–	8	14	39	70	Z
	55	–	–	1	15	15	45	85	Z
	60	–	–	2	23	14	56	109	
	65	–	–	14	25	15	74	142	
	70	–	–	14	25	15	74	142	
	80	–	2	24	25	15	91	176	
90	–	12	23	26	19	107	211		

1.11 TUP Table 45 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)						Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		21	18	15	12	9	6		
		Air			O ₂				
45 metres	5	–	–	–	–	–	–	5	E
	10	–	–	–	–	–	1	6	F
	15	–	–	–	–	–	5	10	H
	20	–	–	–	–	1	8	14	K
	25	–	–	–	–	4	14	23	M
	30	–	–	–	4	4	22	35	O
	35	–	–	–	6	4	30	45	Z
	40	–	–	2	6	7	35	59	Z
	45	–	–	3	8	12	40	72	Z
	50	–	–	4	14	14	46	87	Z
	55	–	–	7	21	14	57	113	
	60	–	–	11	26	14	67	132	
	70	–	3	24	25	14	85	170	
	80	–	15	23	26	18	104	205	
90	3	22	23	26	24	118	240		

1.12 TUP Table 48 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)						Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		21	18	15	12	9	6		
		Air			O ₂				
48 metres	5	-	-	-	-	-	-	5	E
	10	-	-	-	-	-	2	7	F
	15	-	-	-	-	1	6	12	I
	20	-	-	-	1	2	10	18	L
	25	-	-	-	4	4	17	30	N
	30	-	-	2	6	4	26	43	Z
	35	-	-	4	6	4	34	58	Z
	40	-	-	6	6	11	38	71	Z
	45	-	2	5	11	14	45	86	Z
	50	-	2	8	19	15	55	113	
	55	-	3	11	26	14	67	135	
	60	-	6	17	25	15	77	154	
	70	-	15	23	26	15	99	197	
	80	6	21	24	25	23	114	237	

1.13 TUP Table 51 msw

Depth not deeper than	Max. bottom time (min.)	Time at stop depth (min)						Total decomp. time (min.)	Repetitive group
		21	18	15	12	9	6		
		Air			O ₂				
51 metres	5	–	–	–	–	–	–	6	D
	10	–	–	–	–	–	3	9	G
	15	–	–	–	–	2	6	13	J
	20	–	–	–	3	3	12	23	M
	25	–	–	1	7	4	20	37	O
	30	–	–	5	7	3	30	50	Z
	35	–	2	6	6	8	37	69	Z
	40	–	4	6	9	12	44	85	Z
	45	–	5	7	16	14	53	110	Z
	50	1	5	11	23	14	66	134	
	55	2	7	16	26	14	77	156	
	60	2	11	21	26	14	88	181	
	70	7	19	24	25	20	109	228	
80	17	22	23	26	27	128	267		

1 VEDLEGG B – GRENSEVERDIER FOR OKSYGENBELASTNING

1.1 Formål og bakgrunn

Forfatterkollegiet til NDBT har utarbeidet utkast til TUP dekompresjonstabeller. Detaljer om dette framgår av rapportens hoveddel. Under dette arbeidet ble det avklart at prosedyrene ville nødvendiggjøre dekompresjon med oksygen som pustegass. Det vil derfor være nødvendig å avklare oksygeneksponering for dykkerne ved bruk av slike TUP-tabeller.

Formålet med denne delrapporten (vedlegget) er å drøfte oksygeneksponering (hyperoksisk eksponering) og eventuelle helseeffekter av disse. Delrapporten vil også anbefale grenseverdier for hyperoksisk eksponering i tilknytning til dykking.

Forkortelser brukt i dette vedlegget er identisk med dem i hovedrapporten.

1.2 Avgrensning

Denne delrapporten omhandler helseeffekter av hyperoksi på lungefunksjon. Den vil ikke drøfte sannsynlighet for CNS-effekter. Årsaken til at vi ikke drøfter CNS-effekter er at disse allerede er omtalt i NDBT (1). Da NDBT ble revidert i 4. utgave 2017 så ble grenseverdi for pO₂ redusert til 1.5 Bar nettopp av hensyn til akutt oksygenforgiftning (risiko for CNS toksisitet).

Vi er fullt innforstått med at det finnes svært mange – og gode - vitenskapelige arbeider om effekter av hyperoksi på molekylærnivå, cellenivå, organnivå og integrerte fysiologiske responser. Omfanget av studier på lungeeffekter av hyperoksi overstiger langt hva vi har hatt kapasitet til å gjennomgå.

1.3 Metode

1.3.1 Litteratursøk

Vi har gjennomført et ikke-systematisk litteratursøk for å finne verktøy som kan kartlegge oksygeneksponering ifm dykking (eksponeringsovervåking). Litteratursøket tok utgangspunkt i kapittelet om oksygentoksisitet i en av de mest anerkjente lærebøkene i dykkemedisin publisert 2003 (2) samt PhD arbeidet til van Ooij om pulmonal oksygentoksisitet hos dykkere publisert 2013 (3). Disse to arbeidene refererer til en lang rekke rapporter og vitenskapelige artikler. Disse ble vurdert ift relevans for problemstillingen (se presisering i nedenstående avsnitt). Resultatet av denne første gjennomgangen ble et sett referansepublikasjoner. For å fange opp arbeider som ble publisert etter hhv 2003 og 2013 så ble det gjort søk i Pubmed for å avklare om referansepublikasjonene var referert til i nyere arbeider. Litteraturen har blitt gjennomgått og vi har anbefalt hvilke metoder og grenseverdier som bør innarbeides i fremtidige utgaver av NDBT.

Vi har altså vurdert arbeider «med relevans for problemstillingen». Med dette forstår vi arbeider som evaluerer metoder for å kartlegge oksygeneksponering for dykkere. Vi har også søkt etter

arbeider som har drøftet grenseverdier for slik eksponering. Vi har funnet flere arbeider som har karakterisert restitusjonstiden etter at hyperoksi har utløst en endring i lungefunksjon. Engelsk beskriver dette som «recovery time» mens begrepet i dette arbeidet er oversatt til «restitusjonstid».

1.3.2 Lungefunksjonsforandringer som konsekvens av foreslåtte TUP dekompresjonsprosedyrer

Vi har forsøkt å beregne forventet endring i lungefunksjon ved utvalgte TUP-dekompresjonsprosedyrer fra Vedlegg A i denne rapporten. Endring i vitalkapasitet er brukt som indikator på endret lungefunksjon (se mer detaljer i diskusjonsdelen). Vi har analysert profilene med lengst tillatt bunntid på hver tabelldybde (i praksis HSE, NDBT og NORSOK bunntidsgrenser for TUP-dykking iht Tabell 4 under. Hver profil er testet med luft og Nitrox som pustegass i bunntiden. Med Nitrox er det testet med $pO_2=1,5$ Bar (maksimalt tillatt pO_2 iht NDBT).

Tabelldybde	Maks bunntid TUP
0-15	240
18-24	180
27	130
30	110
33	95

Tabelldybde	Maks bunntid TUP
36	85
39	75
42	65
45	60
48	55
51	50

Tabell 4 Tabelldybde/bunntidskombinasjoner i de foreslåtte TUP-tabeller testet for lungeeffekter av hyperoksi. Det er testet for lengste tillatte bunntid for hver 3m økning i tabelldybder mellom 15 og 51m.

1.4 Resultat

1.4.1 Innledning

Clark og Thom (2) og van Ooij (3) gir en god oppsummering av kunnskap knyttet til lungeeffekter av hyperoksi hos dykkere. Hyperoksi kan gi en lang rekke lungesyntomer med ulik intensitetsgrad («kribling» i halsen, svie i brystet, hoste, tungpustethet m.fl.) og påvirker en rekke lungefunksjonsmål. Det er ingen entydig relasjon mellom effekter på lungefunksjon og grad av subjektive symptomer, dessuten er det en stor individuell variasjon i normalisering av lungefunksjon og restitusjon fra luftveissymptomene. På tross av at andre lungefunksjonsmål kan være mer sensitive for registrering av effekter av hyperoksi, så er det endring i vitalkapasitet (VK) som er referansemålet for evaluering av hyperoksiske lungeeffekter (2,3).

1.4.2 Bardin og Lambertsen (4) og Hamilton og medarbeidere (9) : UPTD og REPEX

Det eldste, og fortsatt mest brukte, kvantitative målet for oksygenbelastning er «Unit Pulmonary Toxic Dose» (UPTD, nå oftest omtalt som «Oxygen Toxicity Unit» OTU). Beregningen av UPTD er gitt i formelen under:

$$UPTD = t \times \sqrt[1,2]{\frac{0,5}{P - 0,5}}$$

Formel 1 Beregning av oksygeneksponering(UPTD) basert på eksponeringstid i min (t) og pO₂ (P) i ATA.

Hvor t er eksponeringstid i minutter og P trykk i ATA₂. Beregningen tar som forutsetning at det ikke skal beregnes oksygentoksisitet for eksponering med pO₂ < 0,5 Bar. I originalarbeidet³ (4) refererer Bardin og Lambertsen til studier hvor man har undersøkt sammenheng mellom oksygenbelastning og endring i VK. Resultatene er oppsummert i Tabell 5 under, men kan også beskrives iht Formel 2. Effektmålet er reduksjon i vitalkapasitet for median av de eksponerte.

$$VK(\%) = -0,01 * (UPTD - 415)$$

Formel 2 Formel for beregning av endring i VK som funksjon av UPTD.

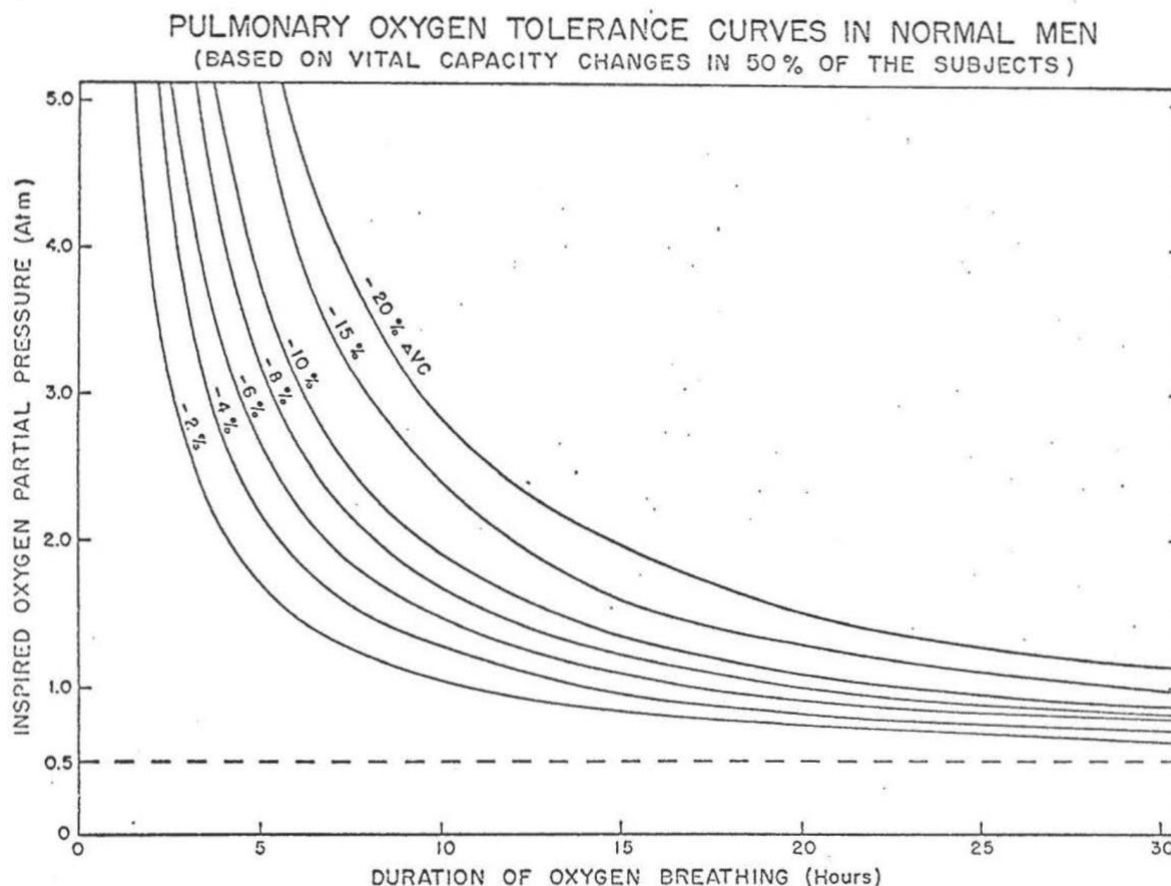
UPTD	ΔVK (%) hos 50% av de eksponerte
615	-2
825	-4
1035	-6
1230	-8
1425	-10
1815	-15
2190	-20

Tabell 5 Median reduksjon i vitalkapasitet (VK) hos personer eksponert for hyperoksi. Hyperoksisisk eksponering kvantifisert som UPTD. Avskrift fra (4).

I sin originale versjon ble sammenhengen mellom pO₂ og eksponeringstid beskrevet som hyperbler med identisk forventet ΔVK som angitt i figuren under.

² I originalarbeidet brukes trykkenheten Atmosfærer (ATM). 1 Atm=1,01325 Bar=101,35 kPa. Det er vanlig å bruke «Bar» som trykkenhet ifm dykking og forskjellen mellom de to enhetene er så liten (1%) at den ikke påvirker fortolkningen av de ulike studiene. Vi vil derfor bruke «Bar» gjennomgående også der originalarbeidene referer trykkenhetene til Pa eller Atm

³ Arbeidet til Bardin og Lambertsen (4) har hentet sitt datagrunnlag fra PhD avhandlingen til Clark (12). Ettersom det er Bardin og Lambertsen (4) som introduserer «UPTD» begrepet har vi valgt å bruke deres artikkel som referanse.



Figur 16 Iso- Δ VK hyperbler som illustrert i den opprinnelige publikasjonen til Bardin og Lambertsen i 1970 (4).

Det er flere utfordringer knyttet til UPTD-begrepet. Det fanger ikke opp subjektive symptomer som kan være tilstede på tross av liten påvirkning i VK. Det beskriver heller ikke nødvendig restitusjonstid før VK er normalisert eller konsekvens av gjentatt hyperoksiske eksponering. Det er likevel det mest anerkjente kvantitative estimatet for oksygenbelastning og er omfattende brukt for eksponeringsovervåking ved fritidsdykking, yrkesdykking og militær dykking. UPTD brukes som mål for hyperoksiske eksponering i NDBT (1). Clark og Thom angir at oksygeneksponering bør begrenses slik at reduksjon i VK ikke overstiger 2% (2). En rekke artikler viser også til at US Navy har satt et akseptkriterium på inntil 2% reduksjon i VK. Dette grenseverdien refereres bl.a av van Ooij (3) og Arieli (6), sistnevnte henviser til 1975 utgaven av US Navy Diving Manual. Vi har ikke klart å finne dokumentasjon fra USN som bekrefter at de har satt en grenseverdi på 2% reduksjon i VK. Sannsynligvis har påstanden om denne grenseverdien sin bakgrunn i de operasjonelle prosedyrene i US Navy Diving Manual. Iflg Harabin og medarbeidere (7) kan disse prosedyrene forventes å gi inntil 2% reduksjon i VK. I siste utgave av USN Diving manual (5) gjenfinnes heller ingen referanse til 2% grenseverdien, men i kap 15-9 anbefales det at man ved dykking med elektronisk styrte sirkulasjonsapparat (ECCR) med fast $pO_2=1.3$ Bar begrenser eksponering til 4t /dag og 16 t/uke.

Grenseverdier for gjentatte dager med hyperoksiske belastning, basert på UPTD beregninger, er publisert av Hamilton og medarbeidere som den såkalte REPEX-modellen (9). REPEX ble primært utarbeidet for å avgrense hyperoksi ved gjentatte dager med dykking og spesielt grunn Nitrox (metnings-)dykking. I ytterpunktene ble det satt en grense ved 850 UPTD for eksponering en enkelt dag og 300 UPTD/dag for dykking over 11 dager eller mer. Mellom disse ytterpunktene ble grenseverdien gradvis endret. REPEX grenseverdier (Tabell 6 under) er

basert på en skjønnsmessig vurdering og er altså ikke et resultat av en formalisert matematisk analyse av eksperimentelle målinger eller epidemiologiske data. REPEX er likevel etablert som en de facto standard for oksygenbelastning inkludert NDBT (1). Forfatterne hevder ikke selv at det er et omfattende analytisk arbeid som ligger bak grenseverdiene, men skriver: *We did not invent this information. The information was developed by others it came from experience with oxygen exposure, and was the best that we could find. Our only contribution is to fit it together to show how the daily dose can be determined as a function of mission duration.*

Varighet (dager)	Gjennomsnittlig daglig eksponering (UPTD)	Akkumulert eksponering ilt perioden (UPTD)
1	850	850
2	700	1400
3	620	1860
4	525	2100
5	460	2300
6	420	2520
7	380	2660
8	350	2800
9	330	2970
10	310	3100
11>	300	3300>

Tabell 6 REPEX (9) grenseverdi for hyperoksisk eksponering ved dykking flere dager på rad.

1.4.3 Harabin og medarbeidere (7)

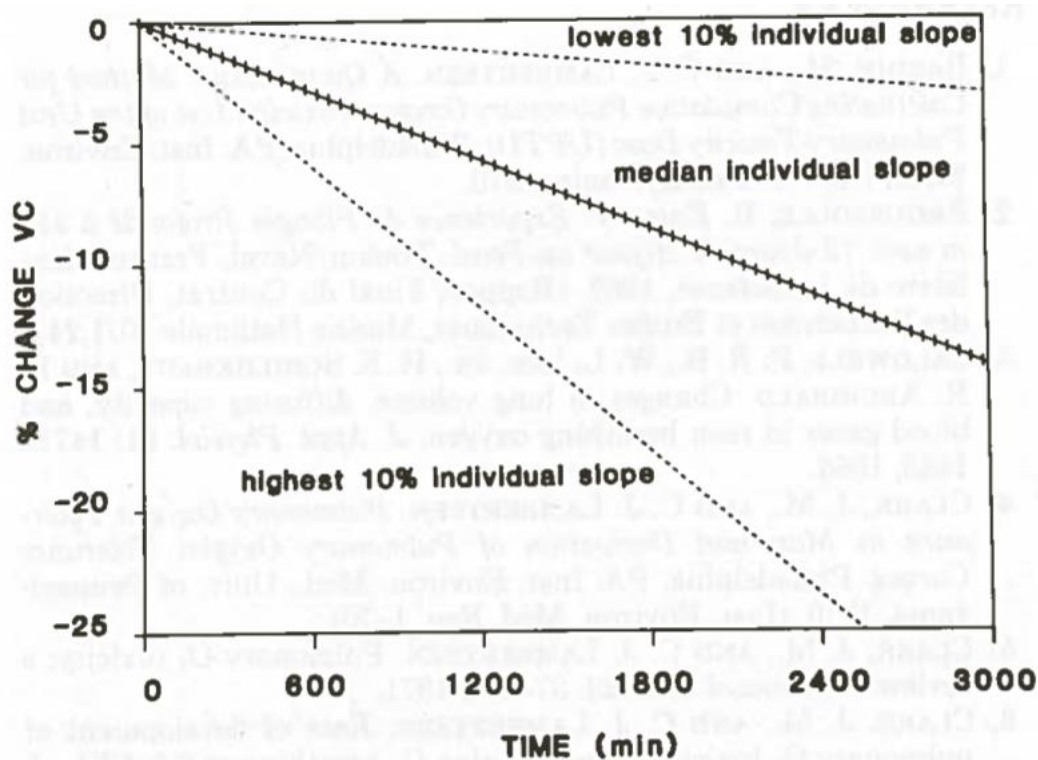
Bakgrunnen for UPTD –eksponeringsmålet er altså gamle data (fram til 1970). Flere rapporter har lansert alternative eksponeringsmål. Harabin og medarbeidere (7) publiserte i 1987 et arbeid som analyserte sammenheng mellom oksygeneksponering (partialtrykk og tid) og reduksjon i VK. Totalt 13 studier med 66 forsøkspersoner og 440 målinger ble inkludert. De viste at reduksjonen i VK best kunne predikeres med formelen:

$$\Delta VK(\%) = B_S \times (P_{O_2} - B_1) \times t^{B_3}$$

Formel 3 ΔVK er endring av vitalkapasitet, B_S er en individspesifikk faktor, P_{O_2} er partialtrykk av oksygen i ATA, t er eksponeringstid i minutter, B_1 er asymptoten for laveste pO_2 med påvisbar lungeeffekt og B_3 en eksponent (7).

Hvor ΔVK er endring av vitalkapasitet i %, B_S er en individspesifikk faktor, P_{O_2} er partialtrykk av oksygen i ATA, t er eksponeringstid i minutter, B_1 er asymptoten for laveste pO_2 med påvisbar lungeeffekt og B_3 en eksponent. Harabin og medarbeidere (7) fant best tilpasning ved å angi $pO_2=0,38$ som asymptote for laveste oksygenbelastning som kunne påvirke lungefunksjon (i

motsetning til $pO_2=0,5$ som er satt i UPTD beregningene). Det kvalitativt nye ved denne eksponeringskartleggingen er at det er mulig å ta hensyn til den individuelle forskjellen i oksygentoleranse. Basert på denne metoden vil det være mulig å foreta en individuell justering av tillatt oksygeneksponering. Figur 17 under illustrerer effektstørrelsen av den individuelle følsomheten.



Figur 17 Endring i vitalkapasitet ved pusting av 1.0 ATA oksygen som estimert ved Formel (2) når den individspesifikke faktoren (B_s) er kjent. Medianverdi og øvre og nedre 10 percentil er markert. Variasjonsområdet viser tydelig hvor stor effekt den individuelle følsomheten for oksygen har på endring i vitalkapasitet.

Ulempen ved denne beregningsmetoden er at den forutsetter at individets følsomhet for oksygeneksponering er kjent (fra tidligere kontrollerte hyperoksiske eksponeringer). Det er den i praksis ikke ved kommersiell yrkesdykking og selv om formelen er mer presis enn UPTD beregningen så kan den foreløpig ikke anvendes ved ordinær eksponeringsovervåking av dykkere. Harabin og medarbeidere (7) foreslo en modifikasjon av Formel 2 som direkte ville predikere reduksjon i VK uten å bruke Tabell 5 for å konvertere fra UPTD:

$$\Delta VK = -0,11 \times (P_{O_2} - 0,5) \times t$$

Formel 4 Beregning av reduksjon i VK som funksjon av pO_2 og eksponeringstid. Enheter som i Formel 3 (7).

På tross av at formelen gir et enklere og sannsynligvis riktigere estimat av lungefunksjonspåvirkning så har den ikke fått samme brede anvendelse som UPTD. Den vil predikere en endring i VK som en hyperbel – likt med det opprinnelige arbeidet til Bardin og Lambertsen (4).

1.4.4 Vann (10)

Vann (10) analyserte et utvidet datasett av det som tidligere var gransket av Harabin og medarbeidere (7). Vann rapporterte at beste dose -responskurve ble angitt iht Formel 5 under.

$$\Delta VK(\%) = -100 \times (1 - b_1^{(c_1 \times PO_2 - a) \times t})$$

Formel 5 Beregning av endring i VK som funksjon av PO₂ og eksponeringstid (t) (10). c₁=0,021; b₁=1,0055, a=9,84*10⁻⁴.

I motsetning til UPTD beregninger hvor endring i VK beskrives som en lineær funksjon av tid så vil denne formelen beskrive endringen som en potensfunksjon (effekten av forlenget eksponeringstid blir økende ved høyt pO₂). I dette arbeidet publiseres det også estimat for normalisering/reversering av lungefunksjonsforandringene når pO₂ reduseres under 0,5 ATA. Modellen (Formel 6) synes å være utarbeidet på et begrenset datagrunnlag av lungefunksjonsnormalisering hos 12 dykkere under en metningsdekompresjon .

$$VK(\%) = -100 \times (1 - b_1^{-(((VK_D - c_4) \times e^{-c_3 \times t}) + c_4)})$$

Hvor

$$c_4 = (3,08 - 7,50 * pO_2) \times 10^5$$

Formel 6 Beregning av restitusjon av VK ved avsluttet hyperoksi med påført reduksjon VK_D ved avsluttet hyperoksiskeksponering. t=Tid etter avsluttet hyperoksiskeksponering (min), C₃=2,8*10⁻⁸. (10)

1.4.5 Shykoff (8)

US Navy bruker MK 16A ECCR med pO₂ satt til 1.3 Bar og NEDU har gjort en rekke eksperimentelle dykk for å fastslå grad av lungefunksjonspåvirkning ved dykking med dette apparatet. Resultatene er oppsummert av Shykoff (8) i en artikkel fra 2015. Studien omfatter 8 serier med 521 persondykk med pO₂ 130-140 kPa. Til sammenligning brukte hun fem serier med 239 persondykk med luft med pO₂=30 kPa. Studiene inkluderte dykk i hvile og med belastning. Analysen inkluderte 414 gjentatte persondykk. Mens de tidligere refererte arbeidene til Bardin og Lambertsen (4) og Harabin (7) bare brukte endring i VK som effektmål, så har Shykoff (8) inkludert FVC, FEV₁ og FEF₂₅₋₇₅ og subjektive symptomer i analysen av sammenheng mellom oksygeneksponering og lungeeffekter. Regresjonsanalysen etablerte sammenheng mellom eksponeringstid og insidens av lungefunksjonsforandringer eller lungesyntomer som angitt i Formel 7 under:

$$P_{O_2 tox} = \frac{100}{e^{(3,586 - 0,490 \times t)}}$$

Formel 7 Prediksjon av forventet insidens av lungetoksisitet (P_{O₂tox}) som funksjon av eksponeringstid (t) ved pustegass med O₂ 1.3 ATA (8).

Denne formelen vil være et sensitivt mål for lungeeffekter av hyperoksi fordi det inkluderer flere lungefunksjonsparametre og lungesyntomer. Forfatterne påpeker at inklusjon av flere lungefunksjonsparametre øker sannsynligheten for «falsk positive» effektmål, men de vurderer konsekvensen av falskt negative effektmål som mer alvorlig. Shykoff utarbeidet også en formel for beregning av reversering av hyperoksieffektene som funksjon av tid etter avsluttet eksponering. Dette gjør det mulig å estimere effekten av gjentatte hyperoksiske belastninger. Begrensningene i metoden til Shykoff er at den ikke angir effektstørrelsen av hyperoksi – kun sannsynligheten for å utvikle enten lungefunksjonsforandring eller symptomer. Modellen er dessuten kun kalibrert for eksponeringer mellom 130 og 140 kPa og kan ikke overføres til andre pO₂. Shykoff har ikke gitt konkrete anbefalinger om grenseverdier i sin artikkel – hva som er akseptabel forekomst av hyperoksiske lungeeffekter må fastsettes av den enkelte.

1.4.6 Arieli (11)

Arieli og medarbeidere (6) publiserte 2002 et arbeid hvor de basert på flere datasett (se detaljer i artikkelen) beregnet parametrene for en lineær regresjon av lungefunksjonsreduksjon (endring i VK) som funksjon av pO₂ og tid. I det samme arbeidet ble det publisert en formel for restitusjon av VK etter avsluttet hyperoksisk eksponering. Arieli viste i sitt arbeid fra 2002 (6) at endring i VK kan estimeres ut fra nedenstående formel:

$$\Delta VK(\%) = 0,0082 \times t^2 \times pO_2^{4,57}$$

Formel 8 Endring i VK som funksjon av PO₂ (Atm) og tid (min). (6)

Igjen ser vi at lungefunksjonen vil svekkes som en potensfunksjon av tid. Restitusjon av VK etter hyperoksisk belastning kan beregnes etter Formel 9 under:

$$\Delta VK_t(\%) = \Delta VK_e \times e^{-(0,42-0,384 \times pO_2) \times t}$$

Formel 9 Formel for beregning av restitusjon av VK etter en hyperoksisk eksponering. ΔVK_t : Reduksjon i VK etter endt restitusjonstid. ΔVK_e : Reduksjon i VK umiddelbart etter hyperoksisk eksponering. t: Restitusjonstid (min). pO₂: pO₂ i den hyperoksiske perioden (i Atm). (6)

Det blir ikke eksplisitt presisert i arbeidet, men datagrunnlaget for beregning av restitusjon er hentet fra restitusjonsperioder med normoksi.

I sitt nyeste arbeid fra 2019 (11) drøfter Arieli i større detalj hvorfor UPTD forlattes som indikator for oksygeneksponering og erstattes av en indeks (K) for pulmonal oksygentoksisitet. K beregnes etter nedenstående formel:

$$K = t^2 \times pO_2^{4,57}$$

Formel 10 Formel for beregning av indeks for pulmonal oksygentoksisitet. Formelen (og variablene) er identisk med Formel 8 med unntak av at en konstant er fjernet. (11).

Ved en sammensatt eksponering – med ulike pO₂ (som f.eks ved et Nitrox TUP dykk med oksygenpusting under dekompresjon på 9 og 6 m) kan indeks for pulmonal oksygentoksisitet beregnes ved å summere indeks for hvert element av dykket slik:

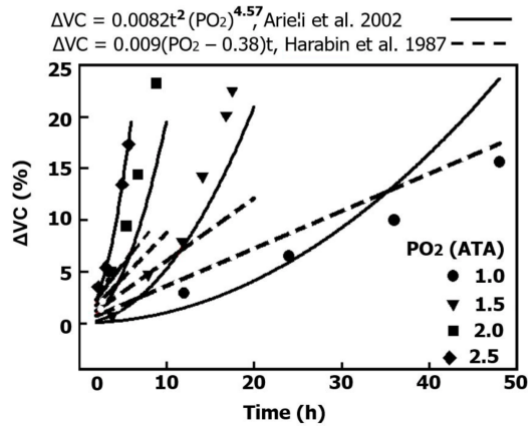
$$K = \left[\sum_{i=1}^n t_i \times (pO_{2_i})^{2,28} \right]^2$$

Formel 11 Formel for beregning av indeks for pulmonal oksygentoksisitet. Formelen (og variablene) er identisk med Formel 10. (11)

I Figur 18 under, reproduisert fra arbeidet til Arieli(11), framgår det hvordan UPTD-formelen feilestimerer effekten av hyperoksi på endring i VK i en størrelsesorden større enn den anbefalte pulmonale oksygentoksisitetsindeksen foreslått av Arieli (6,11). Feilen øker ved økende pO₂ og eksponeringstidens lengde.

Figure 1

Prediction by two models of the reduction in pulmonary vital capacity at four oxygen pressures as a function of time: the Naval Medical Research Institute modified pulmonary toxicity dose (broken lines), and the P-OT index (solid lines). ATA = atmospheres absolute pressure. Reproduced (with modifications) with permission from reference 1

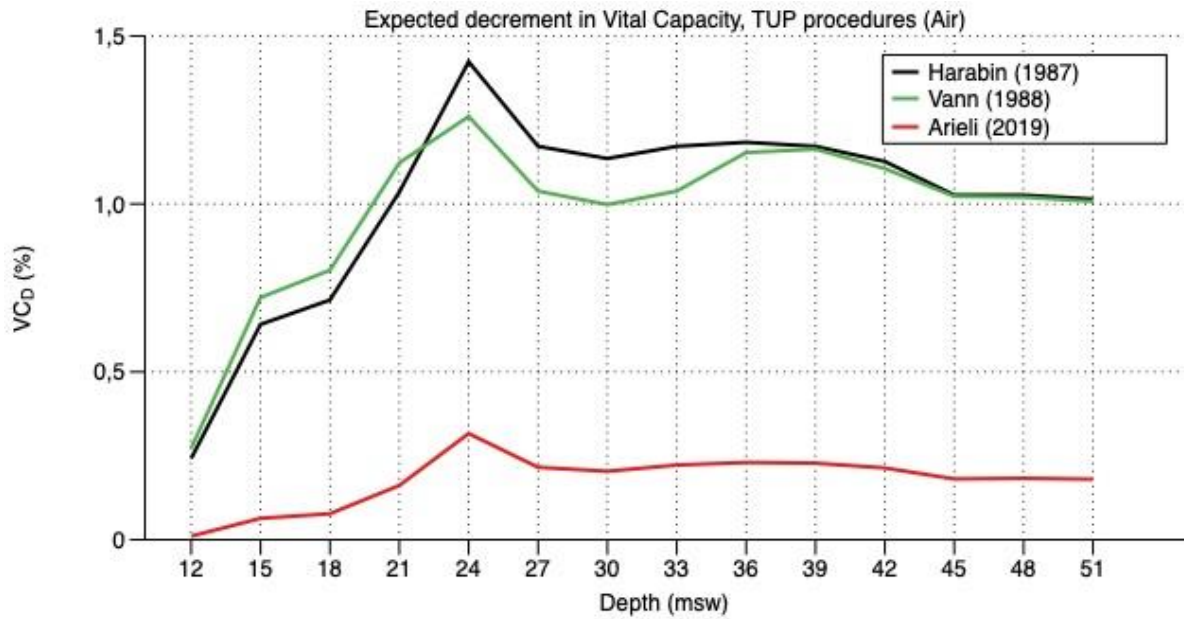


Figur 18 Sammenligning av estimert endring i VK mellom formelen publisert av Arieli (heltrukne kurvede linjer (6)) og Harabin (stiplet, rett linje (7)). (11)

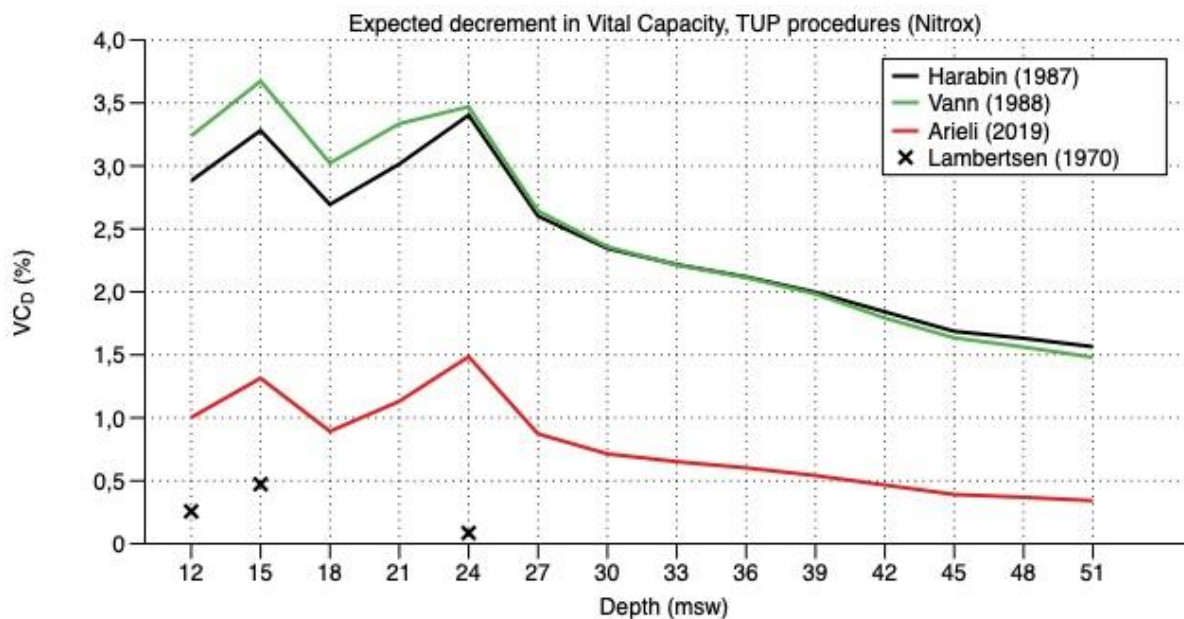
Arieli anbefaler at man ved planlegging av dykk bør begrense indeks for pulmonal oksygentoksisitet (K) til 250 som vil tilsvare ca 2% reduksjon i VK. Iht Arieli har USN angitt en maksimalt tillatt reduksjon i VK på 10%, det vil tilsvare K=1220.

1.4.7 Analyse av utvalgte dykkeprofiler relevant for TUP dykking

Som beskrevet i metodekapittelet har vi analysert de lengste tillatte tabelldybde/bunntidskombinasjonene i vårt forslag for TUP-prosedyrer mht effekter av hyperoksi på lungefunksjon. Vi har brukt formlene til Bardin og Lambertsen (4), Harabin og medarbeidere (7), Vann (10) og Arieli (11) og estimert forventet reduksjon i VK for hver av disse 13 profilene. Fordi den hyperoksiske belastningen kan bli vesentlig øket med bruk av Nitrox så har vi beregnet VK-reduksjon både med luft og Nitrox med pO₂=1,5 Bar som bunn-gass. Resultatene er illustrert i Figur 19 og Figur 20.



Figur 19 Beregnet reduksjon i Vitalkapasitet (VC_D) i % ved TUP-dekompresjonsprosedyrer med luft som pustegass i bunntiden som foreslått i dette dokumentet. VC_D er beregnet iht Formel 4, Formel 5 og Formel 8 for lengste tillatte bunntid for hver 3m økning i tabelldybde. Beregning basert på formler i artiklene til Harabin og medarbeidere (7), Vann (10) og Arieli (11). VC_D kan ikke beregnes iht Bardin og Lambertsen (4) – se tekst for detaljer.



Figur 20 Beregnet reduksjon i Vitalkapasitet (VC_D) i % ved TUP-dekompresjonsprosedyrer som foreslått i dette dokumentet med Nitrox ($p_{O_2}=1,5$ Bar) som pustegass i bunntiden. VC_D er beregnet iht Formel 2, Formel 4, Formel 5 og Formel 8 for lengste tillatte bunntid for hver 3m økning i tabelldybde. Beregning basert på formler i artiklene til Harabin og medarbeidere (7), Vann (10) og Arieli (11). Det er kun tre profiler hvor formelen i arbeidet til Bardin og Lambertsen (4) tillater beregning av VC_D – se tekst for detaljer.

Bardin og Lambertesens originalarbeider (4) tar utgangspunkt i at UPTD må overstige 415 for å påvirke VK. Det har derfor bare vært mulig å beregne VK-reduksjon på tre av profilene (se detaljer i Tabell 7.)

Vi har ikke kunnet benytte det omfattende arbeidet til Shykoff (8) for våre beregninger fordi hennes publikasjon ikke beregner endring i VK, men estimerer insidens/sannsynlighet for enhver endring i lungefunksjonsparametre eller lungesyntomer.

Ved bruk av luft som pustegass så vil det maksimalt opparbeides 103 UPTD (24m/180 min). Ved bruk av Nitrox som pustegas ($pO_2=1,5$ Bar) så vil profiler med tabelldybde 30m og dypere gi mindre enn 300 UPTD, mens største UPTD belastning er for 15m, 240 min profilen (Tabell 7).

Tabelldybde (m)	Bunntid (min)	UPTD Luft	UPTD Nitrox
12	240	13	441
15	240	35	462
18	180	39	359
21	180	59	380
24	180	103	424
27	130	85	316
30	110	83	279
33	95	85	254
36	85	85	237
39	75	93	218
42	65	96	200
45	60	93	184
48	55	95	175
51	50	96	165

Tabell 7 Oksygeneksponering beskrevet som UPTD (4) beregnet iht Formel 1 ved lengste tillatte bunntid for tabelldybder 12-51m. Dekompresjonsprosedyrer som angitt i dette dokumentets Vedlegg A. Luft eller Nitrox ($pO_2=1,5$ Bar) som pustegass i bunnfasen. Profiler med $UPTD > 300$ (Repex (9) grenseverdi for daglig eksponering ved dykking >10 dager sammenhengende) er markert med gult.

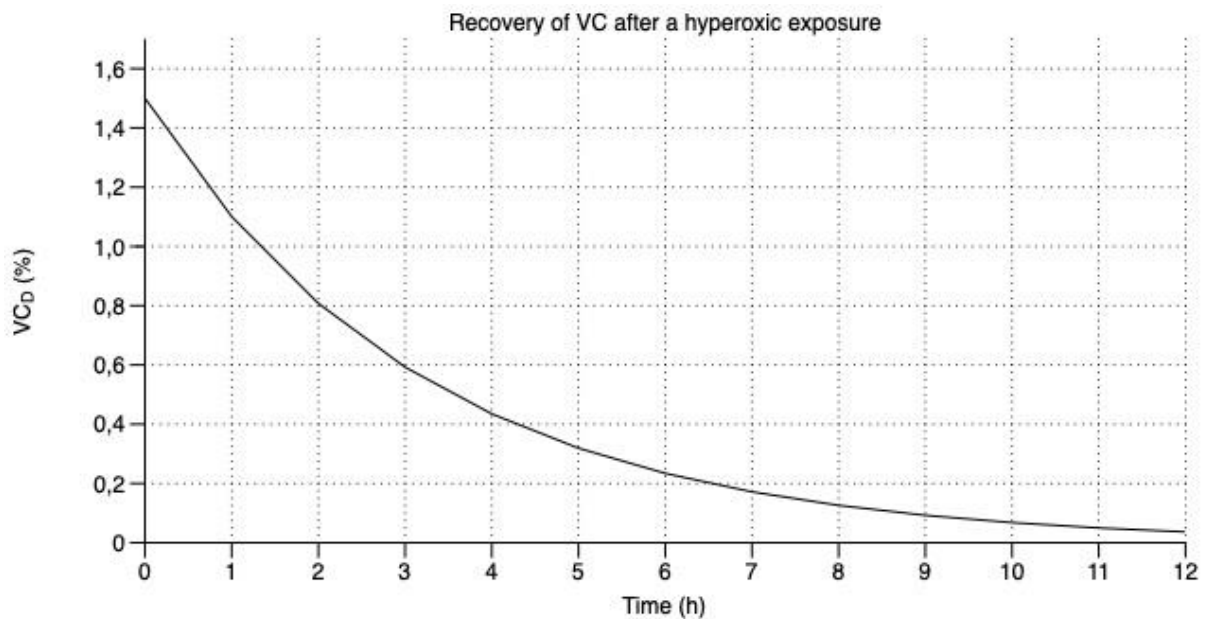
Ved bruk av formlene til Arieli (6,11) beregnes en pulmonal oksygentoksisitetsindeks (K) på maksimalt 39 og 181 med hhv luft og Nitrox ($pO_2=1,5$ Bar) som pustegass i bunnfasen (Tabell 8). Dette er vesentlig lavere enn maksimal grenseverdi ($K=250$) anbefalt av Arieli.

Tabelldybde (m)	Bunntid (min)	K	
		Luft	Nitrox
12	240	1	122
15	240	8	160
18	180	9	109
21	180	20	138
24	180	39	181
27	130	26	106
30	110	25	87
33	95	27	79
36	85	28	73
39	75	28	66
42	65	26	57
45	60	22	48
48	55	22	45
51	50	22	42

Tabell 8 Oksygeneksponering (K) beregnet iht Formel 10 hentet fra (11) ved lengste tillatte bunntid for tabelldybder 12-51m. Dekompresjonsprosedyrer som angitt i dette dokumentet. Luft eller Nitrox ($pO_2=1,5$ Bar) som pustegass i bunnfasen.

Unøyaktighetene ved bruk av UPTD og Repex er detaljert drøftet av Arieli (6,11) og beror bl.a på at det har vært en betydelig økning av datagrunnlaget for lungeeffekter av hyperoksi siden Bardin og Lambertsen (4) publiserte sitt arbeid i 1970. Avledning av grenseverdier for gjentatte eksponeringer (Repex (9)) er empirisk basert og savner den statistiske analysen som ligger til grunn både for Vann (10) og Arieli (6,11) sine metoder. Vi mener derfor at Arielis formler bør brukes for estimering av lungeeffekter av hyperoksi ved TUP-dykking.

Vi har estimert rekonvalesensforløpet (normalisering av vitalkapasitet) etter de hyperoksiske belastningene dykkerne kan bli eksponert for ved bruk av TUP-prosedyrene som foreslått i dette dokumentet. Beregningene er foretatt iht Formel 9 som beskrevet av Arieli (6, 11). Utgangspunktet har vært den profilen i de foreslåtte TUP tabellene som gir høyest hyperoksiske belastning. Utgangspunktet har vært et TUP dykk til tabelldybde 24m og bunntid 180 min med Nitrox ($pO_2=1,5$ Bar) som bunnngass. med tabelldybde 24m og bunntid 180 min. Dette er beregnet å gi en reduksjon i vitalkapasitet på 1,5% umiddelbart etter avsluttet dykk. Etter 2 timer med normoksi (på overflaten) er halvparten av denne effekten reversert. Kun 10% er bestående etter 8 timer.



Tabell 9 Normalisering av vitalkapasitet etter en hyperoksisk eksponering med høyeste $pO_2=1,9$ Bar som har medført en reduksjon i VK på 1,5% ved $T=0$. Rekonvalesenstid angitt som timer på X-aksen. Beregnet iht Formel 9 som beskrevet av Arieli (6,11).

1.5 Konklusjon og anbefalinger

Vår oppfatning er at Arieli sin beregningsmetode (6,11) for å estimere pulmonal hyperoksisk eksponering (K) og rekonvalesens er best egnet sammenlignet med de alternative beregningsprosedyrene som er tilgjengelig. Klassisk modellering av pulmonal oksygentoksisitet med UPTD-enheter (4) og Repex grenseverdier (9) vurderes som mindre nøyaktige.

Ved gjennomgang av dekompresjonsprosedyrene foreslått for TUP-dykking som er anbefalt i Vedlegg A til dette dokumentet så beregner vi største pulmonal oksygentoksisitetsindeks (K) på 181. Dette er vesentlig lavere enn grenseverdien på 250 anbefalt av Arieli (11). For å unngå akkumulert effekt av hyperoksi så anbefaler vi at det bør gå minimum 8 timer mellom hvert TUP-dykk.

1.6 Referanser

1. Risberg J, Møllerløyken A, Eftedal O. Norske Dykke- og Behandlingstabeller. 5. utgave. Eget forlag 2019.
2. Clark JM, Thom SR. Oxygen under pressure. I: Brubakk AO, Neuman TS (red). Bennett and Elliott's physiology and medicine of diving. 5. utgave. Saunders 2003: 358-418
3. van Ooij PJAM. Pulmonary oxygen toxicity in professional diving: Scire est mensurare? Thesis University of Amsterdam, Amsterdam 2013. Lastet ned 22.11.2019 fra [https://dare.uva.nl/personal/pure/en/publications/pulmonary-oxygen-toxicity-in-professional-diving-scire-est-mensurare\(3234a6f5-f104-4330-88a9-7aca50ff5b78\).html](https://dare.uva.nl/personal/pure/en/publications/pulmonary-oxygen-toxicity-in-professional-diving-scire-est-mensurare(3234a6f5-f104-4330-88a9-7aca50ff5b78).html)
4. Bardin H, Lambertsen CJ. A quantitative method for calculating cumulative pulmonary oxygen toxicity. Use of the Unit Pulmonary Toxicity Dose (UPTD). University of Pennsylvania, 1970. Lastet ned 22.11.2019 fra http://archive.rubicon-foundation.org/xmlui/bitstream/handle/123456789/10898/ocr_Quantitative_Method_for_Calculating_Cumulative_Ox_Toxicity-UPTD_1971.pdf?sequence=1

5. U.S. Navy Diving Manual Rev 7, Change A. U.S. Navy Naval Sea Systems Command 2018
6. Arieli R, Yalov A, Goldenshulger A. Modeling pulmonary and CNS O₂ toxicity and estimation of parameters for humans. *J Appl Physiol* 2002;92:248-256
7. Harabin AL, Homer LD, Weathersby PK, Flynn ET. An analysis of decrements in vital capacity as an index of pulmonary oxygen toxicity. *J Appl Physiol* 1987;63(3):1130-35
8. Shykoff BE. Residual oxygen time model for oxygen partial pressure near 130 kPa (1.3 Atm). *Undersea Hyperb Med* 2015;42(6): 547-564
9. Hamilton RW, Kenyon DJ, Peterson RE, Bugler GJ, Beers DM. REPEX: development of repetitive excursions, surfacing techniques, and oxygen procedures for habitat diving. Technical Report 88-1A, NOAA National Undersea Research Program, Silver Spring, MD, 1988.
10. Vann RD. Oxygen risk assessment. Defense Technical Information Center, ADA 299552 1988.
11. Arieli R. Calculated risk of pulmonary and central nervous system oxygen toxicity: a toxicity index derived from the power equation. *Diving and Hyperbaric Medicine* 2019;49(3): 154-160
12. Clark JM, Lambertsen CJ. Pulmonary oxygen tolerance in man and derivation of pulmonary oxygen tolerance curves. EBSDC-IFEM Report No. 1-1-1970. Philadelphia, PA: Environmental Biomedical Stress Data Center, Institute for Environmental Medicine, University of Pennsylvania Medical Center, 1970. Lastet ned 25.11.2019 fra: <http://dspace.rubicon-foundation.org/xmlui/bitstream/handle/123456789/3863/1970.JMClarkPhDThesis.pdf?sequence=1>