

# Undersökning av Halcyon RB80 halvsluten dykapparat i samband med dykeriolycksfall

Mikael Ericsson

Försvarsmaktens dykeri och  
navalmedicinska centrum

Oskar Frånberg

Totalförsvarets forskningsinstitut

Peter Lindholm

Institutionen för fysiologi och farmakologi  
Karolinska Institutet

Juni 2008

### Abstract

This report describes the examination of a Halcyon RB80 semi-closed underwater breathing apparatus involved in a diving accident in Sala silver mine in January 2007. The tests were performed at the Swedish Armed Forces Diving and Naval Medicine Centre (DNC) in collaboration with the Swedish Defence Research Agency (FOI). The aim was to develop and evaluate methods to conduct accident investigations related to this type of advanced diving.

The apparatus was, at the time of the accident, supplied with a trimix containing 31% oxygen. The duration of the dive was 105 minutes at 30 meters depth, after which the diver surfaced with severe neurological symptoms. The apparatus was tested with regard to the carbon dioxide absorbers ability to remove carbon dioxide from the breathing loop, breathing performance and the drop in oxygen fraction between the supply gas and the breathing loop, i.e. the gas that is actually inhaled by the diver.

The tests shows that the gas mixture in the breathing loop deviates considerably from the supply gas. The oxygen fraction in the gas mixture that has been inhaled by the diver during the dive has most likely been much lower than the oxygen fraction that was stated in the information material available from the manufacturer at the time of the accident. The divers decompression calculations were based on the performance stated by the manufacturer. Simulations show that the oxygen fraction could have been as low as 21.3%, but should have been around 24% for the majority of the dive. For the decompression calculations was, however, 30% as average inspired oxygen fraction used. This has most likely resulted in to short and/or to few decompression stops during the ascent.

Our conclusion is that the inadequate information about the performance of the RB80 was the cause of this accident.

**Keywords:** Accident investigation, diving accident, diving, rebreather, Halcyon, RB80, trimix, gas injection, Work of breathing, WOB, hydrostatic imbalance.

### Sammanfattning

Vidstående rapport beskriver undersökningen av en Halcyon RB80 halvsluten dykapparat i samband med en dykeriolycka i Sala silvergruva i januari 2007. Testerna är utförda vid Försvarsmaktens dykeri och navalmedicinska centrum (DNC) i samarbete med Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), som en del i arbetet med att ta fram och testa metoder för att kunna genomföra haveriutredningar vid olyckor i samband med den här typen av avancerad dykning.

Vid olyckstillfället gasförsörjdes apparaten med en trimix innehållande 31% syrgas. Dyket varade i 105 minuter på 30 meters djup och resulterade i svåra neurologiska symptom hos dykaren. Dykapparatens har undersökts med avseende på koldioxidabsorberns förmåga att avlägsna koldioxid från andningskretsen, andningsprestanda samt skillnaden i syrgasfraktion mellan gasförrådet och andningskretsen, d.v.s. den gasblandning som dykaren faktiskt andas.

Undersökningen visar att gassammansättningen i andningskretsen skiljer sig avsevärt från den gas som återandningsapparaten matas med, vilket skiljer sig från vad som angavs på tillverkarens hemsida vid det aktuella tillfället. Syrgasfraktionen i gasblandningen som dykaren har andats under dyket har sannolikt varit mycket lägre än den syrgasfraktion som har legat till grund för dekompressionsberäkningarna inför dyket. Dykarens dekompressionsberäkningar baserades på den information som angavs av tillverkaren. Simuleringar visar att fraktionen kan ha varit så låg som 21.3%, men bör ha legat omkring 24% under större delen av dyket. Vid dekompressionsberäkningarna användes dock 30% som genomsnittlig inspiratorisk syrgasfraktion. Detta har sannolikt lett till för korta och/eller för få etappstopp under uppstigningen.

Vår bedömning är att felaktigheter i informationsmaterialet tillhörande denna apparat föranlett denna allvarliga dykolycka.

**Sökord:** Haveriutredning, dykeriolycka, återandningsapparat, rebreather, Halcyon, RB80, trimix, gasdosering, andningsarbete, WOB, hydrostatisk obalans.

## Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Dykplanering</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Beskrivning av händelseförloppet</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Beskrivning av dykapparatens funktion</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Demontering av dykapparat</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Gasanalys</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Undersökning av manometrar och dykdator</b>	<b>11</b>
7.1	Metod . . . . .	11
7.2	Resultat . . . . .	12
7.3	Diskussion . . . . .	13
<b>8</b>	<b>Andningsprestanda</b>	<b>13</b>
8.1	Teori . . . . .	13
8.2	Metod . . . . .	14
8.3	Mätuppställning . . . . .	14
8.4	Resultat . . . . .	16
8.5	Diskussion . . . . .	17
<b>9</b>	<b>Koldioxidabsorberns prestanda</b>	<b>18</b>
9.1	Teori . . . . .	18
9.2	Metod . . . . .	19
9.3	Mätuppställning . . . . .	19
9.4	Resultat . . . . .	20
9.5	Diskussion . . . . .	21
<b>10</b>	<b>Gasdosering</b>	<b>21</b>
10.1	Teori . . . . .	21
10.2	Metod . . . . .	22
10.3	Mätuppställning . . . . .	22
10.4	Resultat . . . . .	23
10.5	Diskussion . . . . .	24

<b>11 Dekompressionsberäkningar</b>	<b>24</b>
<b>12 Slutsatser</b>	<b>25</b>
<b>A Analyscertifikat från gasanalys</b>	<b>27</b>

## 1 Inledning

Vidstående rapport beskriver undersökningen av en Halcyon RB80 halvsluten dykapparat i samband med en dykeriolycka i Sala silvergruva i januari 2007. Testerna är utförda vid Försvarens dykeri och navalmedicinska centrum (DNC) i samarbete med Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI). Undersökningen är, i skrivande stund, ej del i någon polisutredning.

Undersökningen har genomförts som en del i arbetet med att ta fram och testa metoder för att kunna genomföra haveriutredningar vid olyckor i samband med den här typen av avancerad dykning.

Inledningsvis beskrivs dykapparaten och dess funktion. Därefter beskrivs de olika tester som har genomförts på apparaten. Stor vikt har lagts vid planering och beskrivning av testmetoder samt i vilken ordning de olika momenten har genomförts. Apparaten har först testats i befintligt skick, d.v.s. i det skick som den levererades till DNC. Därefter har apparaten testats med ny kalk i koldioxidabsorberna.

## 2 Dykplanering

Dyket planerades med 27 meter som medeldjup och en total dyktid på 105 minuter. Dykplaneringen baserades på att apparaten gasförsörjdes med triox<sup>1</sup> innehållande 32% syrgas, 25% helium och resten kväve. Dekompressionen beräknades på 30% syrgas, 25% helium och 45% kväve. Syrgasfraktionen har då reducerats med 2% i enlighet med vad som fanns angivet på tillverkarens hemsida vid olyckstillfället. Detta gav ett dekompressionsstopp på 6 meter under 19 minuter med 100% syrgas som dekompressionsgas. Planeringen gjordes med hjälp av programmet *V-Planner*<sup>2</sup>.

## 3 Beskrivning av händelseförloppet

Nedan följer en beskrivning av omständigheterna kring olyckan, baserad på berättelser från dykare och dykarledare på platsen. Med dykare ett avses den olycksdrabbade dykaren och med dykare två avses dennes parkamrat.

---

<sup>1</sup>En benämning på trimix med syrgasfraktion över 21% som används inom dykutbildningsorganisationen GUE.

<sup>2</sup>Programvara för dekompressionsberäkning som är baserad på VPM-modellen.

Dykare ett dyker med en rebreather typ Halcyon RB80 bestående av dubbla 12 liters flaskor på ryggen fyllda med nitrox innehållande 30% syrgas samt en 5.6 liters stageflaska<sup>3</sup>, fylld med triox innehållande 32% syrgas och 25% helium, monterad på sidan. Dessutom en 5.6 liters dekompressionsflaska med 100% syrgas. Dykaren har diverse utrustning för dyket, samt någon slags vätska (dryck) med sig. Figur 1 visar dykapparaten som den levererades till DNC. Dykare två dyker med ett öppet system.



**Figur 1:** Dykapparaten såsom den levererades till DNC. De två flaskorna som syns i bakgrunden är dels en flaska med ren syrgas för dekompression och dels en flaska med triox som försörjde återandningsapparaten med gas under dyket.

Dyket påbörjas torsdagen den 18 januari 2007 kl 20:52 i Sala silvergruva. Dyket innefattar orientering i grott-/gruvgångar samt hantering av diverse linor, nystan m.m. Dykare två uppfattar enligt beskrivning av dyket inget onormalt eller märkligt beteende från dykare ett. Under uppstigningen, på 12 meters djup, tar dykare ett fram sin tabell och pekar på 105 minuter på 27 meter, vilket skulle resultera i 19 minuters dekompression på 6 meters djup med ren syrgas. Dykare två ger ”ok” eftersom detta stämmer överens med hans egen uppfattning.

---

<sup>3</sup>Term som ofta används inom avancerad dykning när flera gasflaskor och blandningar används och syftar på en eller flera extra flaskor med botten gas som en dykare har med sig utöver sitt bottenpaket.

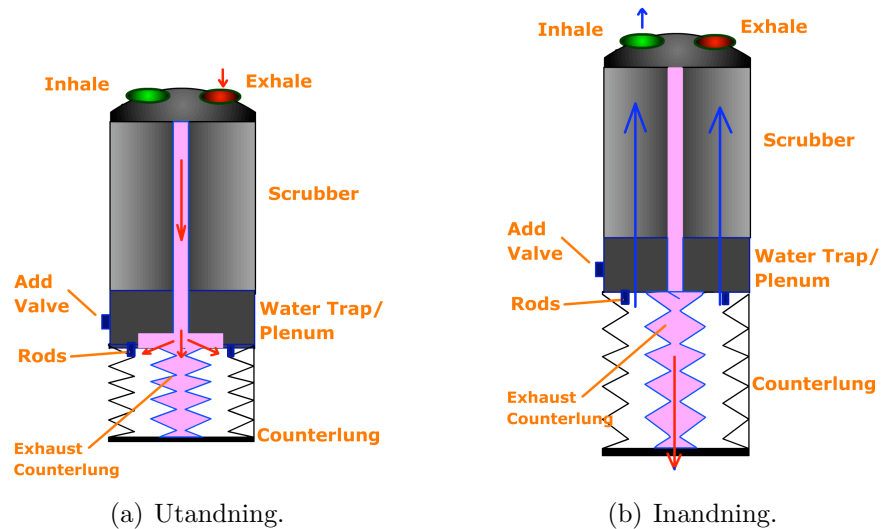
På sex meters djup, vid skifte till syrgas, tar dykare två av sig sin stageflaska och är då tillfälligt upptagen med att avväga sig. Han ser då att dykare ett skiftar till syrgas utan att meddela detta. Normalt är proceduren med att bekräfta gasskiften mycket noggrann. Dykare ett bekräftar ej heller dykare tvås gasskifte. Därefter simmar dykparet runt sjön längs en lina på sex meters djup, varvid ca tio minuter förflyter. Därefter tar de på sig stageflaskorna, camelpack (vätskebehållare) m.m. och ytterligare 7-8 minuter går. Dykare ett visar då tecknet för att gå mot ytan och dessutom att han vill gå rakt upp, normalt simmar de till istigningsplatsen under vattnet.

Dykare ett får, en stund efter att han har brutit ytan, kramper och förlorar medvetandet. Avtransport från platsen sker med ambulans ca kl 23.45.

Tre dagar före olyckan har ett 180 minuters dyk med största dykdjup 70 meter genomförts. Större delen av detta dyk var dock grundare än 20 meter. Efter detta dyk byts ej kalken i absorberhuset, utan återanvänds vid olyckstillfället.

## 4 Beskrivning av dykapparatens funktion

Halcyon RB80 är en halvsluten dykapparat. Med halvslutet system menas en andningsapparat som återanvänder den utandade gasen efter att den har renats från koldioxid och tillförts syre. Systemet har, till skillnad från ett helslutet system, ett regelbundet utsläpp av gas till omgivningen. En hel- eller halvsluten dykapparat består typiskt av en koldioxidabsorber för att avlägsna koldioxid från andningsgasen, en motlunga som fungerar som ett buffertkärl för den utandade gasen, ventiler som tillser att gasen flödar i en och samma riktning i andningskretsen samt för dosering av färsk gas. Det som skiljer de olika apparaterna åt är främst principen för indosering av färsk gas. I fallet RB80 dumpas en viss given volym ut ur kretsen och ersätts med färsk gas vid varje inandning. På så vis erhålls ett konstant förhållande mellan dykarens ventilation och den dumpade gasvolymen. Principen beskrivs närmare i Figur 2.



**Figur 2:** Principskiss av av gasflödet i dykapparaten. Vid utandning (a) strömmar gasen genom centrumsröret och ner i inner- respektive ytterbälgen som expanderar nedåt i figuren. Vid inandning (b) stänger backventilen vid de båda bälgarnas överkant och gasen i ytterbälgen sugas genom koldioxidabsorberna. Innerbälgen trycks ihop och gasen dumpas till omgivningen genom backventilen i innerbälgens underkant. När bälgen når sitt översta läge trycks de blåmarkerade klackarna, som är mekaniskt förbundna med doserventilerna, in och färsk gas doseras in i kretsen.

## 5 Demontering av dykapparaten

Dykapparaten demonteras stegvis och undersöks med avseende på respektive komponents funktion och eventuell förekomst av kalkdamm. Särskild vikt läggs vid dosermekanismens funktion.

Spår av kalkdamm återfinns i inandningsslangen, se figur 3. Detta bedöms dock vara en så liten mängd kalk att det ej bör ha påverkat dykaren. De två doserventilernas funktion avprovas och bedöms fungera utan anmärkning. I övrigt påträffas inget anmärkningsvärt. Inner- respektive ytterbälgens diametrar mäts till 44 mm respektive 139 mm. Förhållandet mellan bälgarnas volymer blir då 0.10. Figur 4 visar koldioxidabsorberna efter demontering.



(a) Inandning.



(b) Utandning.

**Figur 3:** Andningsslangarna efter demontering från apparathuset. En del kalkdamm kan noteras i inandningsslangen.



**Figur 4:** Koldioxidabsorbern efter demontering. En del klumpar kan noteras i nederkant av absorberhuset. Den lila färgen indikerar att kalken är förbrukad.

## 6 Gasanalys

Innehållet i de gasflaskor som användes vid olyckstillfället analyseras av Air Liquide. Analyscertifikat återfinns i bilaga A. Ingen av de analyserade gaserna innehöll anmärkningsvärda halter av vare sig kolmonoxid, koldioxid, vatten eller olja. Tabell 1 visar en sammanställning av innehållet i den flaska som gasförsörjde återandningsapparaten under större delen av dyket. Här kan noteras att syrgasfraktionen är 1.0% lägre än vad som anges i dykplaneringen, se avsnitt 2.

**Tabell 1:** Gassammansättning i den flaska som gasförsörjde återandningsapparaten vid olyckan.

Komponent	Fraktion [%]
$O_2$	31.0
$He$	25.4
$N_2$	42.9

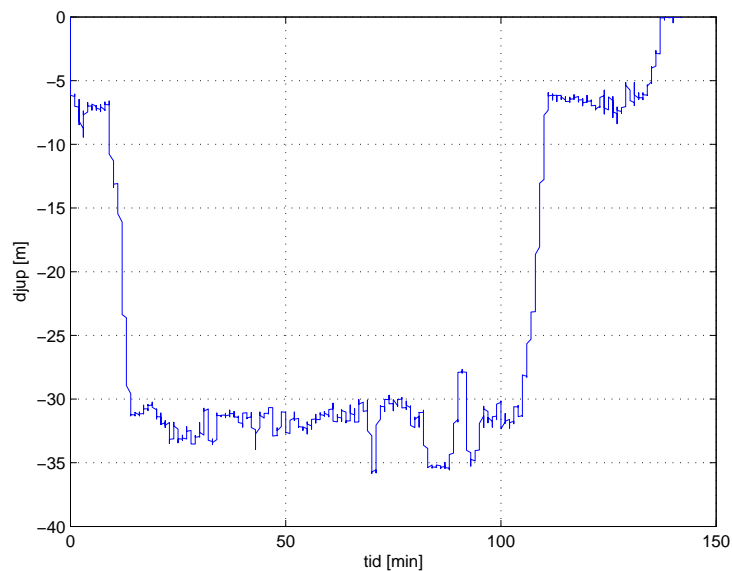
## 7 Undersökning av manometrar och dykdator

### 7.1 Metod

Data i form av tid, djup och vattentemperatur under dyket extraheras från dykdatorn, UWATEC Aladin TEC 2G, som användes vid olyckan. Därefter kontrollmäts dykdatorn genom trycksättning i tryckkammare. Det registrerade djupet jämförs sedan med tryckkammarens djupangivelse. Därefter kontrolleras temperatursensorn genom att dykdatorn sänks ner i vatten med känd temperatur. Därefter beräknas expositionstiden, d.v.s. tiden från det att dykaren lämnar ytan till dess uppstigningen påbörjas, medeldjupet under expositionen, medeldjupet under bottenfasen av dyket samt ned- respektive uppstigningshastigheten, där uppstigningshastigheten definieras som hastigheten från botten till etappstoppet. Slutligen kontrolleras de två manometrar som användes för övervakning av trycket i gasflaskorna vid olyckan. Detta görs genom trycksättning med ett känt tryck.

## 7.2 Resultat

Figur 5 visar dykprofilen för det dyk som föranledde olyckan. Expositionstiden är 105 min, medeldjupet under expositionen är 29 meter och medeldjupet under bottenfasen är 32 meter, Den genomsnittliga ned- respektive uppstigningshastigheten beräknas till 4.6 respektive 4.2 m/min. Medeltemperaturen under dyket erhålls som 3.1°C.



**Figur 5:** Dykprofil baserad på data från den dykdator som användes av dykare ett vid det aktuella dyket. Medeltemperaturen i vattnet var 3.1 °C.

Tabell 2 visar en sammanställning av de resultat som erhöles vid kontrollmätning av dykdatorn. Även de två manometrarna kontrollmäts utan anmärkning.

**Tabell 2:** Djup respektive temperatur vid kontrollmätning av dykdator.

	Uppmätt	Referens
Djup [m]	30.7	30.1
Temp. [°C]	5.0	5.5

### 7.3 Diskussion

Sammanfattningsvis kan sägas att de testade instrumenten bedömdes ha fullgod noggrannhet för den här typen av tillämpning. Värt att notera är dock att dyket har genomförts till ett större djup än vad som sägs i dykplaneringen, se avsnitt 2. Jämförs det planerade djupet med medeldjupet för den verkliga expositionen är skillnaden ca två meter.

## 8 Andningsprestanda

### 8.1 Teori

En andningsapparat utgör någon form av belastning på människans andningsorgan. Andningsarbetet, d.v.s. den energi som åtgår för varje andetag, kan beräknas som [1]

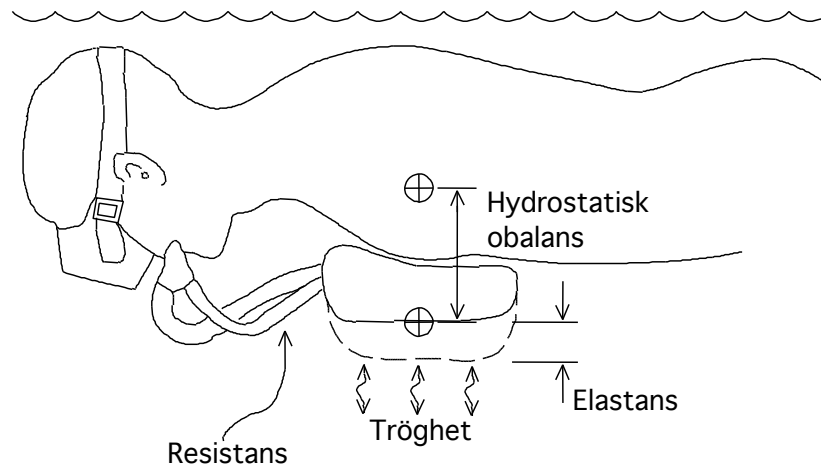
$$W = \int_0^{V_T} P_{ex}(V) \cdot dV - \int_0^{V_T} P_{inh}(V) \cdot dV \quad (1)$$

där  $V_T$  är tidalvolymen,  $P_{ex}(V)$  är utandningstrycket,  $P_{inh}(V)$  är inandningstrycket och  $V$  är lungornas volym som varierar med tiden då dykaren andas.

Belastningen kan delas upp i resistans, elastans, hydrostatisk obalans samt tröghetslaster. Resistansen utgörs av strömningsmotståndet i slangar, andningsventiler, koldioxidabsorber etc. Elastansen kommer av eventuell elasticitet i apparatens ingående delar samt av att motlungan utsätts för ett varierande omgivningstryck då den förskjuts i vattenvolymen vid andning.

Den hydrostatiska obalansen utgörs av ett statiskt över- eller undertryck som måste övervinnas vid andning. Denna tryckskillnad kommer av att motlungans placering ej sammanfaller med dykarens lungor och således utsätts för ett annat hydrostatiskt tryck. Den hydrostatiska obalansen varierar med dykarens orientering i vattenvolymen och motlungans placering på dykaren. I fallet RB80 sitter motlungan, i form av en bälg i nedre delen av centrumröret, på dykarens rygg.

Tröghetskomponenten av den totala belastningen kommer av att gasen ej strömmar med konstant hastighet, utan strömningshastigheten varierar både till storlek och riktning under ett andetag. Figur 6 visar en schematisk bild av de belastningar som verkar på en dykare som simmar under vatten.



**Figur 6:** Schematisk bild av de belastningar som verkar på en dykare som andas i en återandningsapparat simmandes under vatten. Bilden är omritad efter [2].

I den europeiska standarden för återandningsapparater [3] föreskrivs en maximal negativ hydrostatisk obalans på 25 cm vattenpelare för dykaren i liggande position med ansiktet nedåt, och ett maximalt specifikt andningsarbete på 2.38 J/liter på 50 meters djup med apparaten gasförsörjd med kväve/syrgasblandning.

## 8.2 Metod

Dykapparatens andningsprestanda registreras genom att mäta trycket vid andningsventilen relativt det hydrostatiska trycket vid bröstbensknölen [3]. Samtidigt mäts andetagsvolymen. Datainsamlingen sker under 30 sekunder.

En andningskurva erhålls genom att först medelvärdesbilda över antalet andetag och därefter plotta resultatet i ett PV-diagram. Andningsarbetet beräknas med hjälp av ekvation (1) och den hydrostatiska obalansen erhålls som trycket vid munhålan vid slutet av utandningen [3].

## 8.3 Mätuppställning

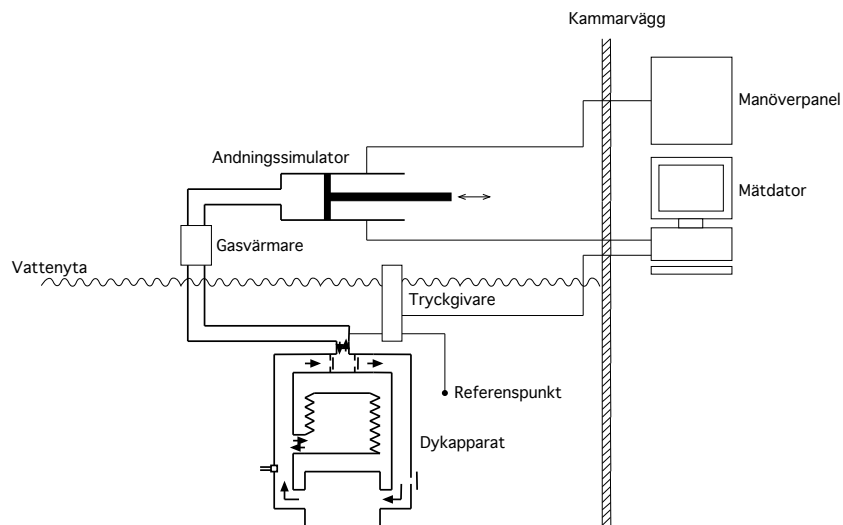
Dykapparatens monterar på en docka utformad som en torso. Dockan är i sin tur upphängd i ett ramverk, se figur 7. Dockan, inklusive dykapparatens, är placerad

under vatten i en tryckkammare. Dykapparaten är kopplad till en andningssimulator i form av en kolv som beskriver en sinusformad fram- och bakåtgående rörelse inuti en cylinder.



**Figur 7:** Dykapparaten monterad på docka i tryckkammare före vattenfyllning.

Kolven pumpar således gas in och ut ur dykapparatens andningskrets. Gastemperaturen kan regleras med en gasvärmare som sitter monterad mellan cylindern och dykapparatens andningsventil. En lägesgivare som rör sig parallellt med kolven ger andningsvolymen, då cylinderns innerdiameter är känd. En tryckgivare, placerad invid andningsventilen, registrerar trycket för ett visst tidsögonblick. Tidalvolymen, d.v.s. kolvens slaglängd, respektive andningsfrekvens kan varieras från en manöverpanel utanför kammaren. Temperaturen på andningsgasen registreras med hjälp av en temperaturgivare som sitter monterad mellan gasvärmaren och andningsventilen. Figur 8 visar en principskiss av mätuppställningen.



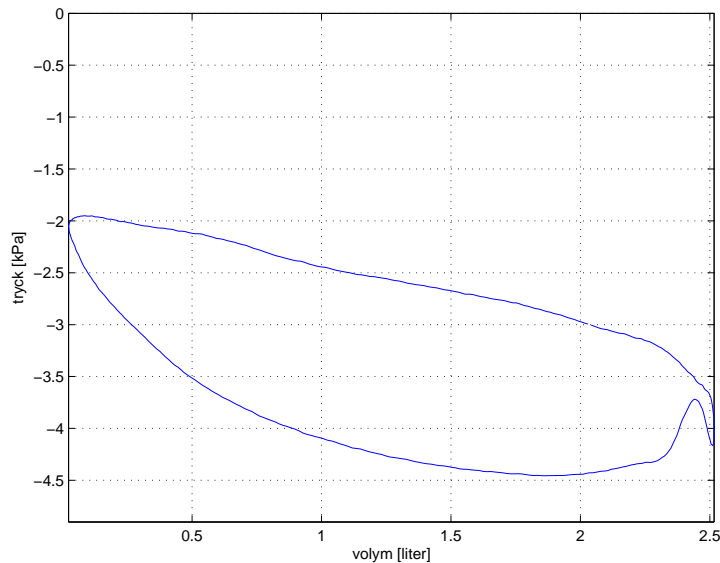
**Figur 8:** Schematisk bild av mätuppställning för mätning av dykapparatens andningsprestanda.

## 8.4 Resultat

Figur 9 visar en andningskurva för RB80 i liggande position på 0 meters djup med ventilationen  $25 \cdot 2.5 = 62.5$  liter/min. Apparaten matas med en gasblandning motsvarande den trimix som användes vid olyckan. Den hydrostatiska obalansen erhålls ur grafen som 2.00 kPa, vilket motsvarar 20 cm vattenpelare. Mätningen genomförs även på 30 meters djup. Tabell 3 visar en sammanställning av uppmätta andningsarbeten.

**Tabell 3:** Uppmätt andningsarbete för RB80 på 0 respektive 30 meters djup gasförsörd med trimix.

Djup [m]	Andningsarbete [J/liter]
0	1.36
30	2.24



**Figur 9:** Andningskurva, i form av ett PV-diagram, för dykaren liggande med magen nedåt ( $roll = 0^\circ$ ,  $pitch = 0^\circ$ ) på 0 meters djup. Andningsarbetet definieras som arean av det område som omskrivs av kurvan.

## 8.5 Diskussion

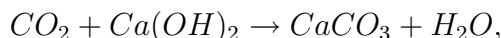
Apparatens andningsarbete kan anses vara något högt, men bedöms ej ha varit så högt att det har påverkat dykaren negativt i någon större omfattning. Denna bedömning grundar sig på att det uppmätta andningsarbetet är något lägre än vad som anges som övre gräns i den europeiska standarden för den här typen av apparat [3]. Värt att notera är att mätningarna är gjorda med heliumblandning på 30 meters djup för att efterlikna omständigheterna vid olyckan. Apparaten skulle sannolikt överskrida ovan nämnda gränsvärden om den testas i enlighet med standarden, d.v.s. med kväveblandning på 50 meters djup. Att avgöra huruvida apparaten lämpar sig för dykning under andra omständigheter än de som rådde vid olyckstillfället ligger dock utanför målet med dessa tester.

## 9 Koldioxidabsorberns prestanda

### 9.1 Teori

En av de viktigaste funktionerna i en återandningsapparat är koldioxidabsorberns förmåga att avlägsna koldioxid från andningskretsen och på så vis hålla den inandade koldioxidfraktionen på en för människan ofarlig nivå. Dålig absorbermassa, icke fungerande ventiler för enkelriktning av andningsgasen samt det skadliga rummet i andningsventilen m.m. medför ökad risk för akut koldioxidförgiftning vid dykning med den här typen av apparat. Koldioxidpartialtrycket bör ej överstiga 20 mbar, vilket motsvarar 2% på ytan, under apparatens föreskrivna aktionstid [3].

I de vanligast förekommande absorbermassorna för dykning ingår kalciumhydroxid, d.v.s. släckt kalk. Kalken reagerar med koldioxiden och ger kalciumkarbonat och vatten som slutprodukt. Reaktionen är exoterm, d.v.s. avger värme, och sker i flera steg. Förenklat kan reaktionen tecknas som



vilket betyder att vid en ideal reaktion kommer en mol  $Ca(OH)_2$  att reagera med en mol  $CO_2$ . Absorbermassans varaktighet är direkt beroende av absorbermassans aktiva yta. Den aktiva ytan påverkas av absorberhusets konstruktion samt absorbermassans kornstorlek. Mindre korn ger längre varaktighet men med större andningsmotstånd än vad som erhålls med en grövre kornstorlek. Absorbermassans effektivitet är starkt temperaturberoende. Vid låga temperaturer minskar dess koldioxidbindande förmåga avsevärt.

Den respiratoriska kvoten, d.v.s. sambandet mellan producerad mängd koldioxid och förbrukad mängd syrgas, kan tecknas som

$$R = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}}. \quad (2)$$

Extraktionskvoten, d.v.s. förhållandet mellan den volym som ventileras genom lungorna och människokroppens syrgasförbrukning, är i princip konstant och kan tecknas som

$$K = \frac{\dot{V}_E}{\dot{V}_{O_2}}. \quad (3)$$

Kombineras sedan ekvation (2) och (3) kan sambandet mellan producerad mängd koldioxid och ventilationen tecknas som

$$\dot{V}_{CO_2} = \frac{R \cdot \dot{V}_E}{K} \quad (4)$$

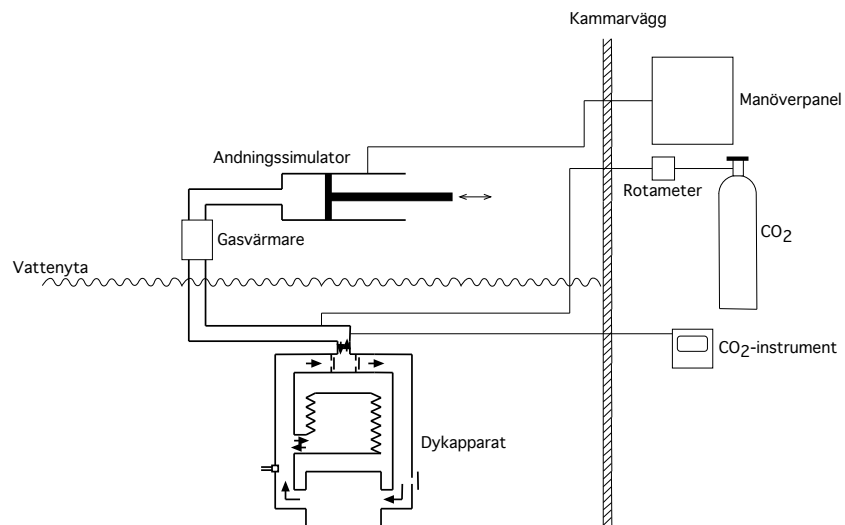
där  $R$  och  $K$  är konstanter. Sambandet är således linjärt, vilket innebär att en halvering av koldioxidproduktionen medför en halvering av ventilationen.

## 9.2 Metod

Dykapparatens förmåga att hålla koldioxidfraktionen i den inandade gasen på en acceptabel nivå testas genom att vid en viss given ventilation dosera in koldioxid med ett konstant volymflöde. Samtidigt mäts koldioxidfraktionen vid andningsventilen. Den uppmätta fraktionen jämförs sedan med givna gränsvärden för tillåten koldioxidhalt. Mätningarna görs först med den kalk som användes vid olyckstillfället. Därefter upprepas mätningen med ny kalk av samma typ.

## 9.3 Mätuppställning

Dykapparaten kopplas till andningssimulatorens på samma sätt som beskrivs i avsnitt 8.3. Koldioxid doseras in i kretsen via en reduceringsventil kopplad till en rotameter som mäter flödet in i andningskretsen. Koldioxidhalten i kretsen mäts med en koldioxidanalysator som ansluts vid dykapparatens andningsventil. Figur 10 visar en schematisk bild av mätuppställningen.



**Figur 10:** Schematisk bild av mätupställningen för mätning av koldioxidabsorberns prestanda.

## 9.4 Resultat

Den kalk som fanns i apparaten då den levererades till DNC saknade vid test koldioxidabsorberande förmåga. Vid en ventilation på 40 liter/min och indosering av 1.6 liter/min koldioxid [3] med ny kalk, av samma typ som användes vid olyckan, i absorbern erhöles koldioxidfraktioner enligt tabell 4. Vattentemperaturen vid mätningarna var 4.6 °C.

**Tabell 4:** Uppmätt koldioxidfraktion vid dykapparatens andningsventil med ny kalk av samma typ som den som användes vid olyckan.

Tid [min]	CO <sub>2</sub> -fraktion [%]
221	1.2
246	1.5

## 9.5 Diskussion

Händelseförloppet vid olyckan tyder ej på hyperkapni. Således bedöms koldioxidabsorberna ha fungerat vid olyckstillfället. Det faktum att två dyk genomfördes med samma kalk i absorberna bör ej ha påverkat absorbernas prestanda negativt. Kalkens bindningskapacitet kan t.o.m. förbättras vid upprepade dykningar med samma kalk jämfört med kontinuerlig dykning [4]. Den sammanlagda dyktiden för de två dyken, som beskrivs i avsnitt 3, uppgår till 285 minuter. Uthållighetsprovet avbröts dock efter 246 minuter eftersom dykaren bedöms ha haft en mycket lägre ventilation och således lägre koldioxidproduktion än vad som föreskrivs i testmetoden. Ventilationen har sannolikt varit  $< 20$  liter/min under större delen av dyket, vilket vid insättning i ekvation (4) ger att  $\dot{V}_{CO_2} < 0.8$  liter/min, d.v.s. mindre än hälften av det minutflöde som når absorbernas inlopp vid mätningarna.

## 10 Gasdosering

### 10.1 Teori

Det är av yttersta vikt att ha kännedom om syrgasfraktionen i den gas som en återandningsapparat levererar till dykaren. Dels för att säkerställa att gasblandningen är andningsbar på det dykdjup där den är tänkt att användas och dels för att kunna göra en korrekt dekompressionsberäkning. I en halvsluten dykapparat är normalt syrgasfraktionen i andningskretsen lägre än syrgasfraktionen i gasförrådet som förser andningskretsen med färsk gas.

Doseringsprincipen som används i RB80 bygger på att den s.k. extraktionskvoten, d.v.s. förhållandet mellan ventilation och syrgasförbrukning, i princip är konstant. Extraktionskvoten varierar dock mellan olika individer och kan sägas ligga i intervallet  $15 \leq K \leq 30$  [5].

Syrgaspartialtrycket i andningskretsen, för en apparat av den här typen, kan uttryckas som [5]

$$P_{O_2} = \frac{x[(K \cdot r_1 \cdot P_A) + 1] - 1}{K \cdot r_1} \quad (5)$$

där  $x$  är syrgasfraktionen i gasförrådet,  $r_1$  är förhållandet mellan inner- och ytterbälgens volym och  $P_A$  är omgivningstrycket. Syrgasfraktionen kan sedan beräknas

som

$$F_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{P_A}. \quad (6)$$

Kombineras slutligen sambanden (5) och (6) kan syrgasfraktionen i andningskretsen uttryckas som

$$F_{O_2} = x - \frac{1 - x}{K \cdot r_1 \cdot P_A}. \quad (7)$$

## 10.2 Metod

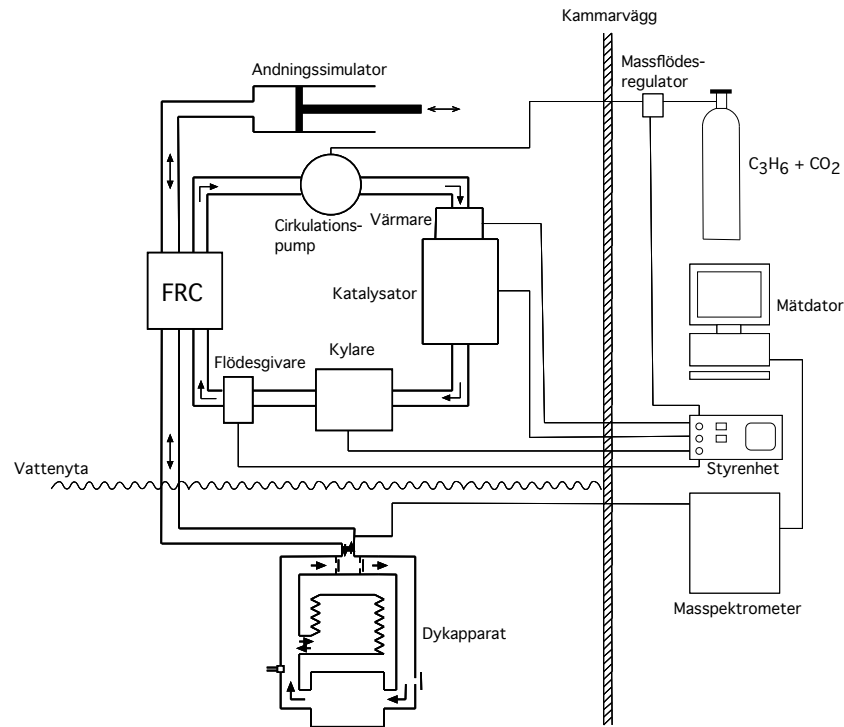
Människans metabolism simuleras genom att förbränna syrgas tillsammans med propen [6]. Vid förbränningen produceras, på samma sätt som i människokroppen, koldioxid. Förhållandet mellan producerad mängd koldioxid och förbrukad mängd syrgas, den sk. respiratoriska kvoten, är något lägre vid propenförbränning än i människokroppen, vilket gör att ytterliggare koldioxid måste tillföras för att fullständigt simulera människans metabolism. Detta görs genom att dosera in en blandning bestående av 60% koldioxid och 40% propen, vilket ger en respiratorisk kvot på 1.0.

Simuleringar av det aktuella dyket genomförs i en delvis vattenfylld tryckkammare på 30 meters djup med dykapparaten gasförsörjd med en gasblandning innehållande 32.3% syrgas. Mätningarna genomförs med varierande ventilation och syrgasförbrukning. Den inspiratoriska syrgasfraktionen är då mätt som medelfraktionen från början av inspirationen, d.v.s. precis före  $O_2$ -halten börjar stiga, till slutet av inspirationen, d.v.s. precis innan  $O_2$ -halten börjar sjunka. Detta ger ett tidsvägt medel och inte ett volymvägt medel. Teoretiska värden på förväntad syrgasfraktion i andningskretsen beräknas med hjälp av ekvation (7).

## 10.3 Mätuppställning

Dykapparaten kopplas, via en blandningskammare (FRC), till andningssimulatoren som beskrivs i avsnitt 8.3. Från blandningskammaren extraheras en viss mängd gas, via en cirkulationspump, in i en katalysator där förbränning sker tillsammans med en blandning av propen och koldioxid som doseras in i kretsen med hjälp av en massflödesregulator. Syrgasförbrukningen och koldioxidproduktionen styrs av mängden propen/koldioxidblandning som doseras in i kretsen. Gasen kyls därefter med hjälp av kylvatten som cirkulerar genom en plattvärmeväxlare. Därefter strömmar gasen

tillbaka in i blodningskammaren. Figur 11 visar en schematisk bild av mätupställningen.



**Figur 11:** Schematisk bild av mätupställning för simulering av människans metabolism.

## 10.4 Resultat

Tabell 5 visar en sammanställning av erhållna resultat. Syrgasfraktionen i andningskretsen vid olyckstillfället, d.v.s. då apparaten försörjdes med en gasblandning innehållande 31% syrgas, har här estimerats genom att beräkna skillnaden i syrgasfraktion för  $x = 0.323$  respektive  $x = 0.31$  för de olika extraktionskvoterna och subtrahera dessa från de uppmätta värdena.

**Tabell 5:** Beräknade och uppmätta syrgasfraktioner för olika förhållanden mellan ventilation och syrgasförbrukning. Dykapparaten matas med en gasblandning innehållande 32.3% syrgas. De uppmätta värdena har korrigerats för att estimeras den syrgasfraktion som erhålls i andningskretsen då apparaten matas med en gasblandning innehållande 31% syrgas.

Extraktionskvot	Beräknad	Uppmätt
	syrgasfraktion [%]	syrgasfraktion [%]
16	20.2	21.3
20	22.4	24.3
30	25.3	28.2

## 10.5 Diskussion

Både de beräknade och de uppmätta syrgasfraktionerna skiljer sig markant från den som legat till grund för dykplaneringen. Den verkliga syrgasfraktionen har sannolikt varit avsevärt lägre än 30% som anges i avsnitt 2.

På Halcyons hemsida angavs vid olyckstillfället att syrgashalten i andningskretsen blir två procentenheter lägre än fraktionen i flaskan som gasförsörjer apparaten, för djup större än 26 meter. Som kan ses i tabell 5 är minskningen för den uppmätta syrgasfraktionen snarare ca 7%.

## 11 Dekompressionsberäkningar

Tabell 6 visar en sammanställning av de etapper som erhålls vid insättning av syrgasfraktionen 30%, dykdjupet 27 meter respektive syrgasfraktionen 24% och dykdjupet 29 meter i dekompressionsberäkningsprogrammet *V-planner v3.82*. Båda beräkningarna är baserade på en uppstigningshastighet på 5 m/min samt att dykaren andas 100% syrgas från 6 meter och uppåt. Här kan ses att skillnaden i etappetid för de två fallen är avsevärd. Den totala etapptiden för de två fallen blir ca 19 respektive 42 minuter. Vidare kan konstateras att dykaren, enligt dessa beräkningar, missar två djupare etappstopp helt p.g.a. felaktiga indata.

**Tabell 6:** Etapptider beräknade med *V-planner v3.82* med VPM-B och konservatism 3 för: Planerat dyk (djup 27 meter, andningsgas 30% syrgas, 25% helium, resten kväve), verkligt dyk (djup 29 meter, andningsgas 24% syrgas, 27% helium, resten kväve). Expositionstiden sätts till 105 minuter och dykaren andas 100 % syrgas från 6 meter i båda fallen.

Etappstopp [m]	Planerad tid [mm:ss]	Verklig tid [mm:ss]
12	-	2:11
9	-	12:10
6	18:10	27:30

## 12 Slutsatser

Dykapparaten bedöms fungera felfritt. Det finns inget som talar för att någon teknisk felfunktion har föranlett olyckan. Följande kan dock konstateras:


- Dyket har genomförts till ett större djup än vad som planerats. Dykplaneringen är baserad på 27 meters medelexpositionsdjup, när det faktiska medelexpositionsdjupet har varit 29 meter.
- Syrgasfraktionen i den flaska som gasförsörjde återandningsapparaten under större delen av dyket har varit något lägre än vad som användes i dykplaneringen. Dykplaneringen är baserad på att apparaten gasförsörjs med 32% syrgas. Gasanalysen visar dock att syrgasfraktionen i flaskan var 31%.
- Gassammansättningen i andningskretsen skiljer sig från vad som erhålls efter beräkning i enlighet med vad som angavs på tillverkarens hemsida vid det aktuella tillfället. Simuleringar visar att syrgasfraktionen kan ha varit så låg som 21%, men bör ha legat omkring 24% under större delen av dyket, vilket skiljer avsevärt från de 30% som användes vid dykplaneringen.

Detta sammantaget har sannolikt lett till för korta och/eller för få etappstopp under uppstigningen, vilket resulterar i dekompressionssjuka till följd av gasövermättnad. Vår bedömning är att felaktigheter i informationsmaterialet tillhörande denna apparat föranlett denna allvarliga dykolycka.

## Referenser

- [1] Lundgren Claes E. G. et.al., *The Lung at Depth*, Lung Biology in Health and Disease, 1999.
- [2] Warkander Dan E., *Ergonomics of Breathing Apparatus, with Special References to Work of Breathing, Dead Space and Breathing Resistance*, Chalmers University of Technology, 1994.
- [3] *SS-EN 14143 Andningsskydd - Bärbar andningsapparat för dykning med sluttet/halvsluttet gasregleringssystem*, Swedish Standards Institute, 2003.
- [4] Alfert P., Örnhagen H., *Kapacitetstest av två fabrikat CO<sub>2</sub>-bindande kalk vid intermittent användning i sluten andningsapparat av typ AGA Oxydive.*, Försvarets forskningsanstalt, 1990.
- [5] Bennett P.B., Elliott D.H., *Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving, 3rd ed.*, Best Publishing Company, 1982.
- [6] Loncar M, Örnhagen H., *Testing and performance of rebreathers*, In: South Pacific Underwater Medicine Society annual Meeting, 1996.


## A Analyscertifikat från gasanalys



**ANALYSCERTIFIKAT**

Analys av: Dykgaser  
Kund: Försvarsmaktens Dykeri och Navalmedicinska Centrum  
Kundens ref.: Mikael Ericsson  
Vår ref.: Britt-Marie Dahlin  
Flaskmärkning: Flaska 1 (dubbelpaket)

Analysen utförd i Kungsängen 2007-04-24

  
Britt-Marie Dahlin

Komponenter:	Halt:
CO	< 1 ppm
CO <sub>2</sub>	394 ppm
H <sub>2</sub> O	ca 7 ppm
O <sub>2</sub>	< 0,1 mg/m <sup>3</sup>

SP 3011 3/01



## ANALYSCERTIFIKAT

Analys av: Dykgaser  
Kund: Försvarsmaktens Dykeri och Navalmedicinska Centrum  
Kundens ref.: Mikael Ericsson  
Vår ref.: Britt-Marie Dahlin  
Flaskmärkning: Flaska 2 (oxygen 6)

Analysen utförd i Kungälv den 2007-04-24

  
Britt-Marie Dahlin

Komponenter:	Halt:
CO	< 1 ppm
CO <sub>2</sub>	< 1 ppm
H <sub>2</sub> O	ca 15 ppm
Olja	< 0,1 mg/m <sup>3</sup>



## ANALYSCERTIFIKAT

Analys av: Dykgaser  
Kund: Försvaretsakademiens Dykeri och Navalmedicinska Centrum  
Kundens ref.: Mikael Ericsson  
Vår ref.: Britt-Marie Dahlin  
Flaskmärkning: Flaska 3 (silvertejp 34)

Analysen utförd i Kungsängen 2007-04-24

  
Britt-Marie Dahlin

Komponenter:	Halt:
O <sub>2</sub>	31,0%
He	25,4%
N <sub>2</sub>	42,9%
CO	< 1 ppm
CO <sub>2</sub>	272 ppm
H <sub>2</sub> O	ca 14 ppm
Olja	< 0,1 mg/m <sup>3</sup>