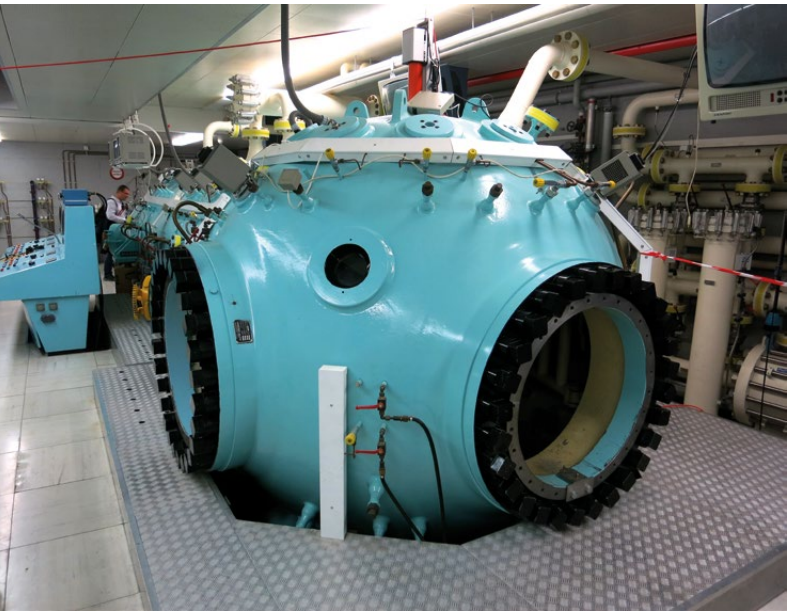
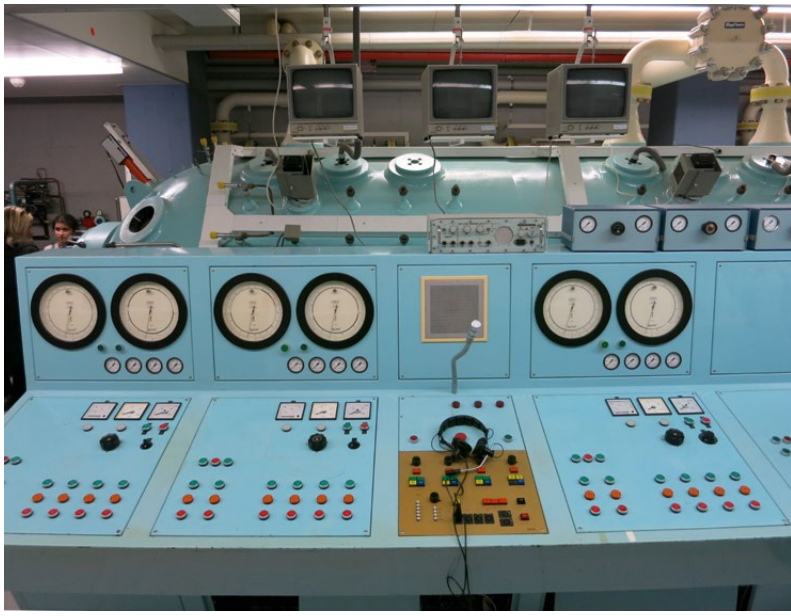
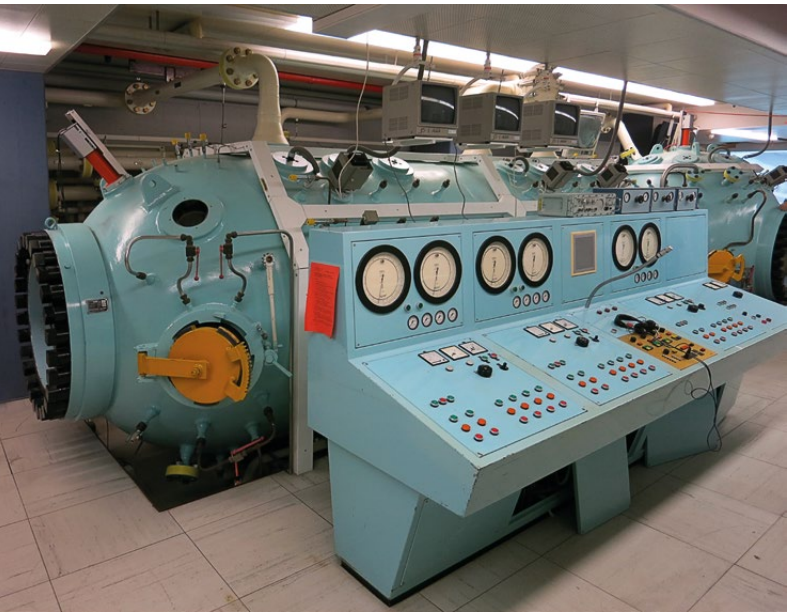
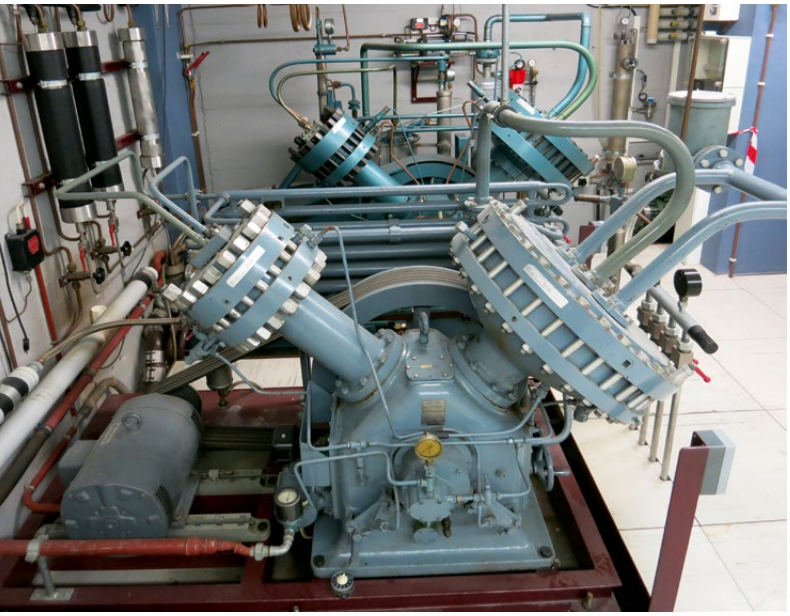
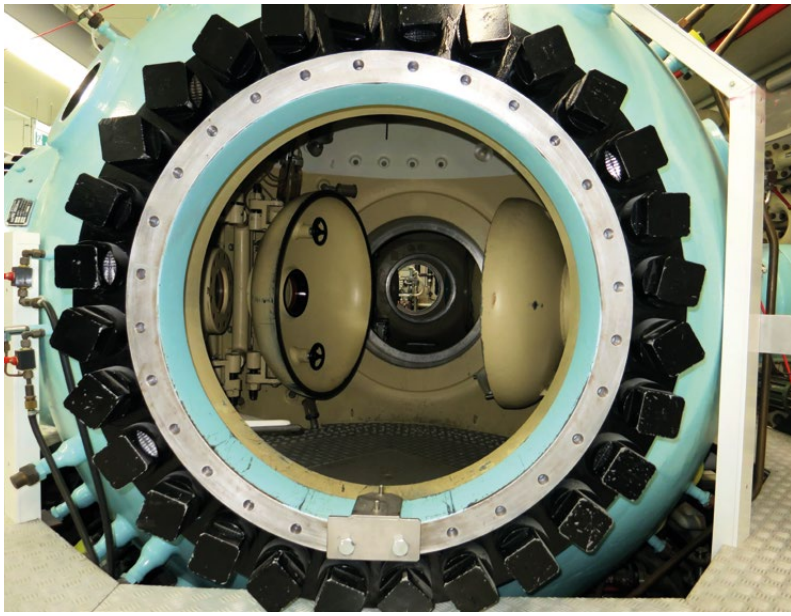
www.gtuem.org | Jg. 34 Nr. 3 | Juli 2019

GESELLSCHAFT FÜR TAUCH- UND ÜBERDRUCKMEDIZIN e.V.
G T Ü M

tauchmedizin

Albert Alois BÜHLMANN - Gedächtnis-Symposium
Teil 1 - TIEF- & SÄTTIGUNGSTAUCHEN
TAUCHAUSRÜSTUNG - Wartung? Service? Gefahren?
APNOE-TAUCHEN - von Kindern und Jugendlichen

Im Rahmen des A.A. Bühlmann-Gedächtnis-Symposiums am 29. und 30. März 2019 konnte das ehemalige Druckkammerlabor von Prof. Bühlmann im Universitätsspital Zürich besichtigt werden. Oben links: kugelförmige Transferkammer über dem "wet pot" der Druckkammeranlage, oben rechts: Fahrstand, Mitte links: Vor- und Hauptkammer mit Fahrstand, Mitte rechts: Atemgasverrohrung hinter der Hauptkammer, unten links: Atemluft-Kompressoren, unten rechts: Blick in die Transferkammer in Richtung Hauptkammer (Fotos Wilhelm Welslau)

Editorial

Sehr geehrte Leserinnen,
sehr geehrte Leser,

Bühlmann Gedächtnis-Symposium

Anlässlich des 25. Todestages von Prof. Albert Alois Bühlmann veranstalteten die schweizerische Schwestergesellschaft der GTÜM, die "Swiss Underwater and Hyperbaric Medical Society" (SUHMS), und der "Verein Historisches Druckkammerlabor Universitätsspital Zürich" am 29. und 30. März 2019 gemeinsam ein "Albert A. Bühlmann Gedächtnis-Symposium" im Universitätsspital Zürich.
Die Liste der Referenten und Vorträge war vielversprechend, und so hat sich die Caisson-Redaktion bereits im Vorfeld entschlossen, die schriftlichen Ausarbeitungen der Vorträge im Caisson zu veröffentlichen.
Als die Texte und Bilder dann nach und nach in der Redaktion eintrafen wurde klar, dass das Material den Rahmen einer einzelnen Caisson-Ausgabe sprengen würde. Sie finden daher in dieser Ausgabe des Caisson nur den ersten Teil die Vorträge, der sich mit den Tieftauchversuchen von A.A. Bühlmann beschäftigen. Alle Symposiumsbeiträge, die sich mit der Entwicklung der Dekompressionstabellen für Sporttaucher befassten, werden wir im nächsten Caisson veröffentlichen.

Vorträge zum Download

Wer durch die Lektüre dieses Caissons "Lust auf Mehr" bekommen hat, kann sich alle Vorträge zusätzlich als PDF-Präsentationen herunterladen. Albrecht Salm, einer der Referenten des Symposiums und Ihnen als Autor von Caisson-Artikeln bekannt, hat dankenswerter Weise alle Vorträge gesammelt und mit Einverständnis der Referenten als geschützte PDF-Präsentationen unter einen Download-Link zur Verfügung gestellt.
Die Caisson-Redaktion bedankt sich bei den Organisatoren und Referenten des Albert A. Bühlmann Gedächtnis-Symposiums für die gute Kooperation und wünscht allen Lesern viel Spaß mit diesem Caisson.

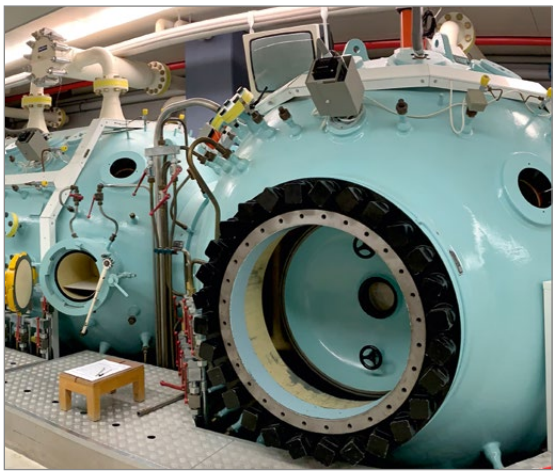
Ihr

Unter dem Link https://www.divetable.info/BS_ZH/ oder dem nebenstehenden QR-Code finden Sie alle Vorträge des Albert A. Bühlmann Gedächtnis-Symposiums zum kostenlosen Download. Außerdem finden sie dort auch Fotos vom Symposium und dem ehemaligen Druckkammerlabor von A.A. Bühlmann, sowie weitere interessante Links zum Thema.

06
Titelthema

A. A. Bühlmann Gedächtnis-Symposium

08
Diving Medical Research



28
Meilensteine...

46
Interview

50
Tauchaus-rüstung

Zum Titelbild:
Das Titelbild zeigt Prof. Dr. Albert A. Bühlmann, eine der herausragenden Persönlichkeiten der tauchmedizinischen Forschung des letzten Jahrhunderts. Im Frühjahr 2019 fand anläßlich des 25. Todestages von A.A. Bühlmann in Zürich ein Gedächtnissymposium unter Beteiligung zahlreicher Zeitzeugen und Weggefährten seines Wirkens statt. Caisson berichtet in dieser und der nächsten Ausgabe über dieses Symposium (Foto: Archiv A. Bühlmann).

Inhalt

03 ***EDITORIAL***
Wilhelm Welslau

05 ***Impressum & Hinweise für Autoren***

TAUCHMEDIZIN

06 ***A. A. Bühlmann Gedächtnissymposium in Zürich***
Christian Wölfel

08 ***Diving Medical Research in Zürich 1959 to 1994***
Thomas A. Bühlmann

27 ***Albert A. Bühlmann - Beyond Diving Physiology***
Erich W. Russi

28 ***Meilensteine des Tieftauchforschungslabor Zürich***
Jürg Wendling

38 ***Verein Historisches Druckkammerlabor Universitätsspital Zürich (DKL-USZ)***
Christian Wölfel

42 ***500 m Tieftauchsimulationen im Druckkammerlabor Zürich***
Christian Wölfel

46 ***Interview mit Livio de Toffol***
Christian Wölfel und Livio de Toffol

50 ***Tauchausrüstung – Wartung? Service? Gefahren?***
Ralf Krause

AKTUELLES

64 ***Stellungnahme der GTÜM-AG Tauchmedizin im Kindes-Jugendalter***
Christian Beyer, Peter Ahrens, Heike Gatermann, Andreas Glowania, Uwe Hoffmann, Anette Meidert, Else Schirber, Karsten Theiß

66 ***Bericht 2. Symposium Tauchen von Kindern & Jugendlichen***
Lars Eichhorn

71 ***Leserbrief***
Ullrich Siekmann

72 ***Kongress-Ankündigungen***

74 ***Kursangebote***

76 ***GTÜM-zertifizierte Veranstaltungen***

78 ***GTÜM-Adressen***

Impressum & Hinweise für Autoren

caisson | Organ der Gesellschaft für Tauch- und Überdruckmedizin e.V. | ISSN 0933-3991

redaktion: Dr. Wilhelm Welslau, Seeböckgasse 17/2, A-1160 Wien, Tel.: +43 (0)699 1844 2390, caisson@gmx.net

herausgeber: Dr. Karin Hasmiller (Vorstand der GTÜM), c/o BG-Unfallklinik Murnau, Prof. Küntscher-Straße 8, D-82418 Murnau
Tel.: +49 (0)8841 48 2709, k.hasmiller@gtuem.org

Geschäftsstelle: GTÜM e.V., Susanne Keller, c/o BG-Unfallklinik Murnau, Prof.-Küntscher-Straße 8, D-82418 Murnau
Tel. +49 (0)8841 48 2167, Fax +49 (0)8841 48 2166, gtuem@gtuem.org
Satz, Layout: medien@19, Paderborn, dagmar.venus@gmx.de, www.dvenus.de, **Lektorat:** taucherarzt.at, Wien, **Druck & Versand:** Druckerei Marquart GmbH, Aulendorf, Auflage 1.600
caisson erscheint viermal jährlich, et9 wa zur Mitte der Monate Januar, April, Juli und Oktober. Redaktionsschluss: 15. Feb., 15. Mai, 15. Aug. und 15. Nov.

Der Bezugspreis ist im Mitgliedsbeitrag enthalten.
Alle Zuschriften an die Redaktionsadresse. Kürzungen vorbehalten. Namentlich gekennzeichnete Beiträge stellen die Meinung des Autors dar und sind nicht als offizielle Stellungnahme der Gesellschaft aufzufassen.

- Einsendeschluss ist jeweils der 15. Tag im ersten Monat des Quartals.
- Es können nur solche Arbeiten und Zuschriften veröffentlicht werden, die per E-Mail oder CD bei der Redaktion eingehen.
- Datenformat: Microsoft Word, Silbentrennung: keine, Literaturverzeichnis: Nummerieren.
- Die Autoren werden gebeten, nach Möglichkeit Artikel aus früheren caisson-Heften zu zitieren.
- E-Mail: caisson@gmx.net

A. A. Bühlmann

Gedächtnissymposium in Zürich

Autor/Referent

Dr. med. Christian Wölfel
Präsident

Verein DKL-USZ
Sekretariat
Frau Michèle Spahr
Lerchenweg 9
CH 2543 Lengnau

sekretariat@druckkammer.ch

Am Freitag 29.03. und am Samstag 30.03. fand das A. A. Bühlmann Gedächtnissymposium, das in einer Kooperation der Schweizerischen Gesellschaft für Unterwasser- und Hyperbarmedizin (SUHMS) mit dem Verein Historisches Druckkammerlabor Universitätsspital Zürich (DKL-USZ) organisiert wurde, sehr erfolgreich statt. Anlass war der 25ste Todestag von Prof. Bühlmann.
Gut einhundert interessierte Taucher und Taucherärzte aus der Schweiz und Europa erhielten Einblicke in die Geschichte der tauchmedizinischen Forschung durch das Team um Prof. A. A. Bühlmann aus erster Hand, d.h. von seinem Sohn Dr. jur. Thomas Bühlmann und vielen Zeitzeugen und ehemaligen Mitarbeitern wie Beat Müller, Ing. ETH, der die Bergseetauchtabellen und Algorithmen für Höhenaufenthalte nach dem Tauchen errechnete und E. Völlm, Ing ETH, der den Aladin-Tauchcomputer entwickelte. In einem Interview berichtete Livio De Toffol, der erst Versuchsperson in einem 500m Tieftauchversuch im Sommer 1977 und dann Druckkammertechniker im DKL-USZ war, darüber, wie man sich als Versuchskaninchen auf 500m Tiefe fühlt.
Dr. Jürg Wendling, Gründer von DAN Europe Suisse, sprach über die Meilensteine der Dekompressionsforschung in Zürich und den Einsatz des Bühlmann-Algorithmus in der Berufstaucherei und bei Druckluftarbeiten.
Dass A. A. Bühlmann nicht nur Tauchmedizinier, sondern vor allem Lungen und Kreislaufphysiologe war und mit seinen Forschungen auf diesen Gebieten bis heute gültige Erkenntnisse erarbeitete, wurde von seinem Nachfolger am USZ Prof. E. Russi sehr anschaulich und umfassend dargestellt.
Den aktuellen Stand der tauchmedizinischen Forschung vermittelten Dr. Marc-Alain Panchard, der die zahlreichen tauchmedizinischen Publikationen der letzten Jahre "made in Switzerland" vorstellte, Dr.

Abbildung 1
Teilnehmer des A.A. Bühlmann-Gedächtnis-Symposiums in Zürich (Foto Christoph Schmied)

Francis Héritier, der erklärte, wie wichtig die Funktion der Haargefässe der Lunge für bestimmte Tauchzwischenfälle ist, Dipl. Phys. Albrecht Salm, der aus Sicht des Physikers die verschiedenen Dekompressionsmodelle für jedermann/-frau nachvollziehbar erklärte und vermittelte, was ein Dekompressionsmodell leisten kann und was nicht, sowie Dr. Frank Hartig, der neue Theorien und Erklärungsansätze für die Entstehung des Tiefenrausches vorstellte.
Der Gründer von DAN Europe, Dr. Alessandro Marroni, stellte die Ergebnisse aus den Daten von über 50.000 Tauchgängen in der DAN Datenbank vor und berichtete über laufende Forschungsprojekte von DAN Europe.
Der "immediate past president" der europäischen tauch- und überdruckmedizinischen Gesellschaft EUBS Prof. Jacek Kot wies mit einer Bestandaufnahme über "extreme recreational diving" auf Gefahren und Risiken hin, die von Tauchern eingegangen werden, um immer grössere Tiefen zu erreichen und spektakulärere Tauchgänge durchzuführen.
Wir freuen uns sehr darüber, dass die Redaktion des Caisson in der vorliegenden Ausgabe die Abtracts der Vorträge aufbereitet hat und sie einer grösseren Öffentlichkeit zugänglich macht. Wir danken ihr und der GTÜM dafür ganz herzlich.

Christian Wölfel

Abbildung 2
Referenten und Teilnehmer des A.A. Bühlmann-Gedächtnis-Symposiums vor der Kammeranlage des ehemaligen Druckkammerlabors in Zürich (Foto Christoph Schmied)

Diving Medical Research in Zürich 1959 to 1994

Autor/Referent

Dr. iur.
Thomas A. Bühlmann
Rechtsanwalt

Zürich
Schweiz

Einleitende Bemerkungen

Der Swiss Underwater and Hyperbaric Medical Society und dem Verein Historisches Druckkammerlabor Universitätsspital Zürich sowie dessen Vorsitzenden Dr. med. Christian Wölfel danke ich ganz herzlich für die Einladung zu diesem besonderen Anlass, der 25 Jahre nach dem Tod meines Vaters eine meines Erachtens spannende Geschichte aufleben lässt.

Albert A. Bühlmann war hauptberuflich Arzt, Pneumologie, Kardiologe und Lehrer für Pathophysiologie an der Universität Zürich. Die tauchmedizinischen Forschung in Zürich betrieb er als angewandte Wissenschaft im Rahmen der inneren Medizin mit engen Beziehungen zu Pneumologie, Kardiologie und Intensivmedizin. Anfänglich ging es darum, mit einfachen Mitteln Methoden für das Tieftauchen zu finden. Die ersten spektakulären und medienwirksamen Erfolge erweckten das Interesse der Öl- und Gasindustrie. Dank den Forschungsgeldern der Industrie und dem Verständnis der Universitätsbehörden wurden die Voraussetzungen für eine kontinuierliche Forschungstätigkeit an der Universität Zürich geschaffen. Die Ergebnisse spielen für die Sport- und Berufstaucherei bis heute eine wichtige Rolle. Der Nebenberuf meines Vaters als Tauchmediziner hat mich als kleinen Jungen besonders fasziniert. Mein Vater nahm mich immer wieder mit an die Orte des Geschehens. Eine meiner ersten Erinnerungen war der Drucktest der von Sulzer gebauten Druckkammer "Atlantis" in Aadorf, die dann beim Weltrekordversuch vor Catalina Island im Pazific zum Einsatz kam. Ein Ventil versagte und das ganz Publikum wurde unfreiwillig geduscht. 1961 war ich in Brissago als Zuschauer bei dem 222 m-Versuch dabei. 1966

Abbildung 2
Quellenmaterial von A.A. Bühlmann
(Foto Archiv A. Bühlmann)

Die Erbschaft

Als Albert A. Bühlmann vor 25 Jahren verstarb, hat er in einem Schrank ein umfangreiches Archiv hinterlassen. Dieses wurde ungesehen verpackt und bei mir im Keller und in der Garage gelagert. Im Herbstsemester 2015 immatrikulierte ich mich für den Master of Advanced Studies in Applied History an der Universität Zürich. Mit dem Begriff «Applied» verband ich schon bald, zumindest begrifflich, die angewandte Tauchmedizin. Weil die jüngere Industrie- und Firmengeschichte in den letzten Jahren bei den Historikern zunehmend Beachtung fand, fragte ich Prof. Dr. Tobias Straumann, der an der Universität Zürich Wirtschaftsgeschichte lehrt, ob ich eine Arbeit über die Geschichte der Tauchmedizin an der Universität Zürich von 1959 bis 1994 schreiben könne. Er akzeptierte diesen Themenvorschlag und seit einiger bin ich nun am Schreiben.

Dabei stellte sich bald heraus, welche zentrale Bedeutung das Archiv von Albert A. Bühlmann bildet. Mit diesem Quellenmaterial, den Berichten in den Medien und den von mir durchgeführten Interviews mit Zeitzeugen können seine wissenschaftlichen Publikationen im Bereich der Tauchmedizin in einen breiteren Kontext gestellt werden.

In der ersten Vorlesung des Geschichtsstudiums wird dem Studierenden die Bedeutung von Quellen eingebläut. Aussagen zur Geschichte zu machen ohne nachvollziehbare Quellenangaben erfüllt die Anforderungen an die Arbeit eines Historikers nicht. Quellen müssen auch einer kritischen Überprüfung

nahm mein Vater mich und meinen Bruder mit nach Porto San Stefano in der Toscana, wo wir Zeugen der Capshell Versuche in den Gewässern um die Insel Giglio wurden. Es waren die ersten Sättigungstauchgänge im offenen Meer in Tiefen von über 200 Meter. Unzählige Male war ich im alten und neuen Druckkammerlabor und verfolgte dort die Versuche. In den 80iger und 90iger Jahren begleitete ich meinen Vater bei Vortragsreisen in den USA. Es waren auch die Jahre, in denen ich ihm ab und zu einen juristischen Rat geben konnte.

hinsichtlich ihres Erkenntniswertes standhalten. Bei der Quellensuche musste ich erfahren, wie bescheiden der Fundus nach wenigen Jahren sein kann, wenn nicht jemand in alter Manier Schriftstücke aufbewahrt hat.
Im Universitätsspital Zürich gibt es mit der im Jahre 1975 in Betrieb genommenen und im Jahre 2005 endgültig stillgelegten Druckkammer ein eindrückliches Zeitzeugnis. Die Druckkammer ohne Quellen über ihre Entstehung und ihren Einsatz sagt jedoch wenig aus zur Forschungsgeschichte. Gemäss meinen Abklärungen gibt es im Universitätsspital Zürich keine weiteren Unterlagen, die Auskunft geben würden über die Forschungsprogramme, ihre Genehmigung, die Finanzierung durch Staat und Industrie, das Ende der Druckkammerversuche, die Verbreitung der Forschungsresultate und über deren Nachhaltigkeit. Im Staatsarchiv des Kantons Zürich sind einige Film- und Tonbandaufnahmen von Versuchen in der Druckkammer archiviert. Die Filme geben einen Eindruck über den Tagesablauf der Versuchsprobanden während eines Versuches in der Druckkammer. Über die Forschungsziele, welche mit dem Versuch beabsichtigt wurden, die Versuchsanordnung, Probleme währende des Versuche usw. finden sich keine Informationen. Im Staatsarchiv sind die Bauskizzen der neuen Druckkammer hinterlegt, zudem eine Chronologie der Ereignisse, die von Benno Schenk, dem langjährigen technischen Leiter des Druckkammerlabors, verfasst wurde. Die Chronologie ihrerseits enthält weder Quellenangaben noch Belege. Es geht um die Dokumentation der neuen Druckkammer, nicht aber um die Geschichte der Tauchmedizin. Der Kontext zur Forschungsgeschichte von 1959 bis 1994 ist im Staatsarchiv nicht belegt.
Das wissenschaftliche Erbe von Albert B. Bühlmann als Tauchmediziner bilden die 58 Fachpublikationen und Bücher, die er allein oder mit Kollegen in den Jahren 1959 bis 1994 veröffentlichte. Einem besonderen Erkenntniswert haben die in sechs Heften handschriftlich von Albert A. Bühlmann protokollierten 455 Tauchexperimente. Die Experimente fanden in der alten und neuen Überdruckkammer der Universität Zürich, in den Überdruckkammern bei der Groupe des études et de recherches sous-marine (GERS) in Toulon/Frankreich, an der Washington University und im Royal Naval Physiological Laboratory in Alverstok/UK statt. Experimente im Wasser wurden im Zürichsee (1959), Lago Maggiore (1961), im Pazifik vor Catalina Island (1962) und vor Porto San Stefano/Italien (1966) durchgeführt. Albert A. Bühlmann's handschriftlich festgehalten Berechnungsgrundlagen für die Dekompressionstabellen und seine Analysen der Vergleiche verschiedener Tabellen sind in mehreren Ordnern zusammengefasst. Im Archiv finden sich Originalfotografien, Dias und Filmaufnahmen sowie graphische Darstellungen von Versuchsergebnissen als Grundlage für Publikationen und Vorträge.
Dokumentiert sind zudem die Forschungs- und Beraterverträge mit der US Navy, mit Shell International Research Maatschappij, Micoperi S.p.A, Sub-Sea Oil Services ("S.S.O.S", ein Gemeinschaftsunternehmen von Shell International Research Maatschappij und Micoperi S.p.A), die Beteiligung von Albert A. Bühlmann und Hannes Keller an einem Gemeinschaftsunternehmen mit Shell und Micoperi zur Verwertung von Intellectual Property Rights sowie die Zusammenarbeit von Albert A. Bühlmann mit den Firmen Divetronic AG, Dynatron AG, Uwatec AG und Montres Rolex SA, die an der Entwicklung von Tauchcomputern beteiligt waren. Die Forschungsbewilligungen und die Finanzierungszusagen der Regierung des Kantons Zürich und der Eidgenossenschaft sind ebenfalls durch Quellenmaterial belegt. Ein wichtiges Dokument stellt der Auszug aus dem Protokoll des Regierungsrates des Kantons Zürich von der Sitzung vom 11. November 1970 dar. Im ausführlich begründeten Entscheid bewilligte der Regierungsrat auf Antrag von Albert A. Bühlmann und der Direktion der Medizinischen Universitätsklinik einen bedeutenden Beitrag zur Finanzierung des Neubaues des Druckkammerlabors. Dank weiteren Quellen im Archiv können die Projektkosten für das neue Druckkammerlabor und die Finanzflüsse während der gesamten Dauer der tauchmedizinischen Forschung in den Grundzügen nachvollzogen werden. Dokumentiert ist auch, wie Albert A. Bühlmann von 1963 bis 1994 die Kontrolle über die Forschungsgelder und deren Verwendung ausübte.
Im Archiv finden sich des Weiteren Orginalmanuskripte wie die Antrittsvorlesung aus dem Jahre 1960 zum Thema "Atmung unter extremen Bedingungen" sowie die Abschiedsvorlesung aus dem Jahre 1990 zum gleichen Thema oder das Referat zur Ankündigung des Aladin Air X mit dem Rechenmodell ZH-8 ADT auf der "BOOT" im Jahre 1994 in Düsseldorf.
Die Geschichte der Tauchmedizin an der Universität Zürich war immer wieder Gegenstand von Publikationen in nationalen und internationalen Printmedien wie der Tagespresse, Magazinen und Fachzeitschriften. Das Schweizer Fernsehen hat über die Jahre verschiedene Sendungen ausgestrahlt wie z.B. über die Erkundung des Schiffswracks Jura im Bodensee, die Erfolgsgeschichte des Tauchcomputers Aladin und zwei Sendungen in den Jahren 2012 und 2014 über

Abbildung 3
Prof. Dr. med. Albert Alois Bühlmann, Foto aus den 1960er Jahren (Foto Archiv A. Bühlmann)

den Weltrekordtauchgang von Hannes Keller.
Nebst diesem Quellenmaterial spielen für meine Arbeit die von mir durchgeführten Interviews mit den Zeitzeugen wie Hannes Keller, dem Weltrekordtaucher, Beat Müller, Promotor der Bühlmann Tabellen einschliesslich Höhentabellen, Ernst Völlm, Entwickler des Aladin, Livio de Toffel, Versuchsperson beim 500 m-Versuch im Druckkammerlabor in Zürich, Tobias Keller und Mitarbeitenden seiner Firma Hannes Keller Druckmesstechnik AG, beteiligt an der Entwicklung des Deco-Brain und erfolgreiche Produzenten von Drucksensoren, sowie schriftliche Antworten von zahlreichen Auskunftspersonen eine wichtige Rolle als Quellen.

35 Jahre Tauchmedizin in Zürich ist eine in sich abgeschlossene Geschichte, die sich wie ein Kreis schliesst. Die abenteuerliche Phase der Rekorde in den Jahren 1959 bis 1962 wird durch eine, was die wissenschaftlichen Resultate betrifft, äusserst produktive Phase von 1963 bis 1981 mit dem Schwerpunktthema Sättigungstauchgänge in grossen Tiefen abgelöst. In dieser Phase profitierte primär das Berufstauchen von den Forschungsergebnissen. Dank den bedeutenden finanziellen Beiträgen von Shell, Micoperi, dem Kanton Zürich und dem Bund konnte während dieser Jahre in einem finanziell und organisatorisch stabilen Umfeld geforscht werden. Dekompressionstabellen für den Bereich des Sporttauchens waren aber auch in diesen Jahren ein Thema. 1976 publizierten Albert A. Bühlmann gemeinsam mit Mitarbeitern neue Lufttabellen für verschiedene Höhen. Nachdem Shell und Micoperi den Forschungsvertrag über den 30. Juni 1981 hinaus nicht mehr verlängerten war Albert A. Bühlmann gezwungen im Bereich der Tauchmedizin neue Forschungsziele zu setzen. Das Sporttauchen stand von nun an im Fokus. Die von 1959 bis 1981 erarbeiteten theoretischen und empirischen Erkenntnisse bildeten dafür die Basis. 1982 publizierte Albert A. Bühlmann die Arbeit «Experimentelle Grundlagen der risikoarmen Dekompression nach Überdruckexposition, 20 Jahre praktische Dekompressionsforschung in Zürich» in der Schweiz und in UK. In der Monographie "Dekompression – Dekompressionskrankheit" beschreibt er im Jahre 1983 die Regeln für die Berechnung von Dekompressionstabellen. In den folgenden Jahren erfolgen die Ankündigung der Bühlmann Tabellen 86, der Tabellen für Bergseetauchen und Tabellen für Caissonarbeiten. Im Jahre 1985 beginnen die Arbeiten an den Tauchcomputern. Die Ankündigung des Aladin Air X mit dem Rechenmodell ZH-8 ADT anlässlich der "BOOT" in Düsseldorf im Januar 1994 kurz vor dem Tod von Albert A. Bühlmann am 16. März 1994 schloss den Kreis.
Lassen Sie mich aber jetzt nochmals zurückgehen ins Jahr 1959.

Hannes Keller trifft auf Albert A. Bühlmann

Das Zusammentreffen von Hannes Keller und Albert A. Bühlmann im Jahre 1959 war für den Auslöser der Geschichte der Tauchmedizin in Zürich entscheidend.
Der 25-jährige Hannes Keller hatte eine Vision. Er wollte eine Rolle spielen in der grossen Welt. Grenzen waren da, um überschritten zu werden. Er wählte mit dem Tauchen ein Gebiet, das für neue Grenzerfahrungen bereitstand. Er stellte die bekannten Tiefengrenzen für Taucher radikal in Frage und setzte sich als Ziel, als erster Mensch 300 Meter im offenen Meer zu erreichen. Dies sollte ihm Anerkennung verschaffen sowie einen bleibenden Eindruck – einen Fussabdruck auf der Welt - hinterlassen.
Hannes Keller verfügte über keine finanzielle Mittel. Obwohl er von sich sagt, dass er jedes Wissenschaftsgebiet innerhalb einer Woche erfassen könne, fehlte ihm der Hintergrund oder, wie er sagt, die Reputation, Sponsoren von seiner Idee zu überzeugen. Er suchte deshalb den Kontakt zu einem Mediziner und Wissenschaftler einer angesehenen Institution, der seinem Projekt die notwendige Seriosität verschaffen konnte und stiess so auf Albert A. Bühlmann.
Dieser war als Pneumologe und Kardiologe zunächst in der Poliklinik und dann in der Medizinischen Klinik des Universitätsspital Zürich tätig. Schwerpunktgebiet seiner wissenschaftlichen Arbeit in den 50 Jahren war die Atmung unter extremen Bedingungen. Themen wie die künstliche Beatmung, sportliche Leistungen in der Höhe oder das Fliegen in grossen Höhen beschäftigten ihn. Er war Oberarzt, verfügte über die venia legendi und die Liste seiner wissenschaftlichen Publikationen im Alter von 36 Jahren war bereits ziemlich lang. 1955 publizierte er zusammen Prof. Dr. P.H. Rossier das Standardwerk "Klinische Pathophysiologie der Atmung", das in verschiedenen Sprachen erschien. Im Jahre 1959 bereitete er sich auf seine Antrittsvorlesung vor.
Als Hannes Keller auf ihn zukam erkannte er schnell, dass die wissenschaftliche Forschung im Bereich Tieftauchen mehr oder weniger auf dem Stand Ende des 19. Jahrhunderts respektive Beginn des 20. Jahrhunderts stehen geblieben war. Trotz des Technologieschubes, ausgelöst durch zwei Weltkriege und die ersten Satelliten im Weltall, fehlte es an Innovation im Bereich Tieftauchen. Er brauchte nicht lange, um die damals herrschende Lehre in Frage zu stellen und dank seines Verständnisses für Atmungsphysiologie und Physik neue theoretische Verfahren zu entwickeln. Er entwickelte für das Neben- und Nacheinander von Stickstoff und Helium im Atemgemisch ein Konzept für die Berechnung des Druckausgleiches zwischen den Atemgasen und den Geweben. Die Richtigkeit seiner Theorie musste empirisch erhärtet werden.
Hannes Keller wollte dieses Risiko als Taucher eingehen. Albert A. Bühlmann war bereit seine Reputation als Mediziner und Wissenschaftler zu riskieren. Er sah für sich die Chance, in einem Gebiet, das von Tauchmedizinern aus Frankreich, UK und den USA besetzt war, auf internationaler Ebene wahrgenommen zu werden und im Bereich des Beruftauchens etwas Entscheidendes zu bewegen. Seine Vision damals war nicht der Einsatz von Tauchern, die bei der Erschiessung von neuen Öl- und Gasfeldern im Meer eingesetzt werden, sondern es Tauchern zu ermöglichen, die im Jahre 1956 vor New York gesunkene Andrea Doria zu heben. Der Kiel der Andrea Doria lag in einer Tiefe von 120 Meter und war damals für die Taucher nicht erreichbar.

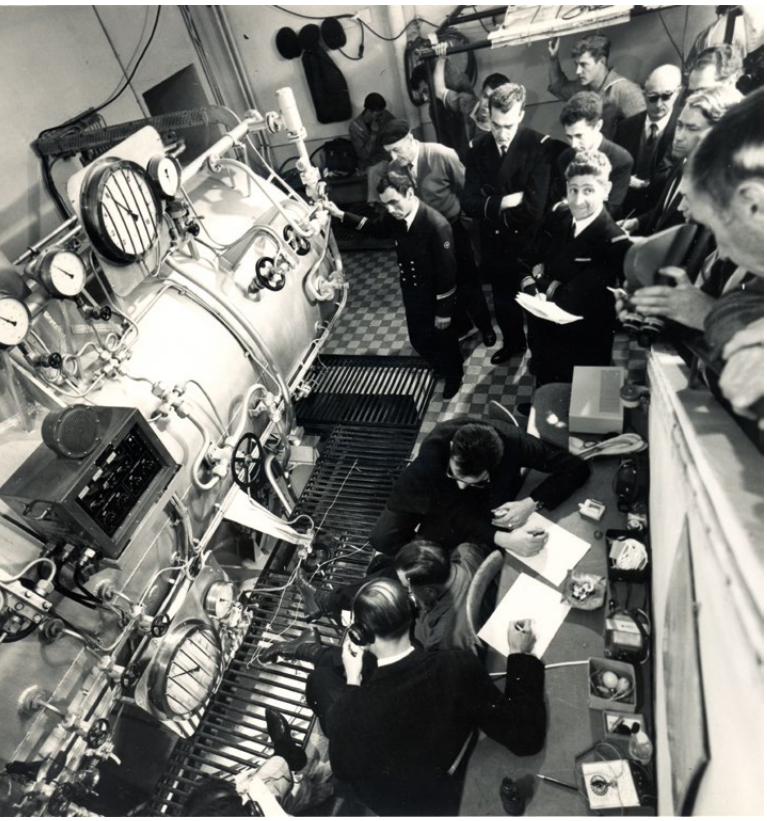
Projekt Weltrekord

Dank der Mitwirkung von Albert A. Bühlmann als Arzt und Wissenschaftler bekam das Projekt Weltrekordversuch das Siegel der Seriosität und Hannes Keller war erfolgreich bei der Suche der ersten Sponsoren. Die Boulevard-Zeitung "Blick" bekam die Exklusivrechte an der Story des 120 Meter-Ritts in die Tiefen des Zürichsees am 21.11.1959. Hannes Keller baute sich dafür mit Benzinfässern eine an einem Kran hängende Tauchplattform, mit der er sich in die Tiefe führen liess. Das Atemgerät war eine Eigenkonstruktion von Hannes Keller. Albert A. Bühlmann veröffentlichte seine theoretischen Überlegungen bezüglich der Gaswechsel in der Kompressions- und der Dekompressionsphase und für die Dekompressionsberechnungen sowie die ersten empirischen Erfahrungen im Rahmen seiner Antrittsvorlesung vom 25.6.1960.
Noch im Jahre 1960 wurden die beiden Schweizer eingeladen, im medizinischen Zentrum der Marine de France in Toulon (GERS) die oben beschriebene Theorie unter Beweis zu stellen. In Selbstversuchen in einer Einmannkammer wurden die Tauchprofile und die Theorie der unterschiedlichen Gasmischungen vorgängig nochmals getestet. Der Versuch vom 4.11.1960 auf 250 Meter und einer Aufenthaltsdauer von 10 Sekunden löste bei den Fachleuten in Toulon grosses Erstaunen aus. Noch nie war ein Mensch in der von Jacques Cousteau entworfenen Druckkammer in eine solche Tiefe vorgedrungen. Kommen-

Abbildung 4
Rekordversuch auf 120 m Tiefe im Zürichsee am 21.11.1959 (Foto Archiv A. Bühlmann)

tare wie "mit welchen Gasen fliegt Hannes Keller in die Luft" waren von den Anwesenden zu hören. Verblüffend war für die französischen und die eingeladenen amerikanischen Marineärzte nebst der Tiefe vor allem die kurze Dekompressionszeit. Dies wird illustriert durch den Vergleich des Tauchprofils von Hannes Keller und dem der Rettungstaucher, die beim Versuch in Toulon vorsichtshalber in der Nebenkammer im Einsatz standen. Hannes Keller verliess die Druckkammer 55 Minuten nach dem er die Tauchtiefe von 250 Meter erreichte und ohne Beschwerden auf Meereshöhe dekomprimierte. Die Rettungstaucher starteten ihren Tauchgang auf ihre Zieltiefe von 60 Metern gleichzeitig wie Hannes Keller. Ihr Tauchgang dauerte aber insgesamt 90 Minuten. In der fünfteiligen Artikelserie "Der Weg in die Tiefe", erschienen bei Dokumenta J.R. Geigy 1961, beschrieb Albert A. Bühlmann die neue Theorie und die praktischen Erfahrungen.

Am 25.4.1962 erreichte das Team aus der Schweiz in der gleichen Kammer 300 Meter mit einer Aufenthaltszeit von 10 Sekunden. Einen Tag später ging es auf 210 Meter mit einer Aufenthaltsdauer von 10 Minuten. Albert A. Bühlmann verlangte bei diesem Versuch von Hannes Keller nach Erreichung der Zieltiefe einen Arbeitseinsatz im Wissen, dass körperliche Arbeit Auswirkungen auf die Dekompression hat. Mit einem Werkzeug gab er Hannes Keller den Takt vor für das Heben von Gewichten.
Die US Navy lud "die Schweizer" für eine Wiederholung des Tauchganges auf 210 Meter nach



Abbildungen 5 und 6
Druckkammer im medizinischen Zentrum der Marine de France in Toulon (GERS) während des Rekordversuchs am 25. April 1961, Hannes Keller (im Tauchanzug) und A.A. Bühlmann (im Hintergrund) in der Druckkammer
(Fotos Archiv A. Bühlmann)

Washington DC ein. Dieser Versuch fand am 10.5.1961 statt.
Zurück in der Schweiz tauchten Hannes Keller und Damien McLeish am 28.6.1961 vor Brissago auf 222 Meter. Die beiden Taucher stellten sich auf eine Plattform, auf der sie sich in die Tiefe führen liessen. Das Life Magazine und der Blick berichteten über die Rekordjagd. Montres Vulcain war Co-Sponsor und lanciert bei dieser Gelegenheit die "Cricket Nautical", eine Taucheruhr mit einer Weckerfunktion und hinterlegten Tauchtabellen für Nullzeittauchgänge mit Luft.
Mit den verschiedenen gelungenen Tieftauchgängen und Aufenthaltszeiten von bis zu 10 Minuten gelang der Beweis für die Richtigkeit der Züricher Theorie. Diese erlaubte es, tief zu tauchen und schnell und sicher zu dekomprimieren.
Die US Navy und Shell sagten Hannes Keller für einen Versuch auf 300 Meter vor der kalifornischen Küste ihre Unterstützung zu. Sie waren bereit, das Unternehmen logistisch und finanziell zu unterstüt-

Abbildung 7
Taucheruhr "Cricket Nautical" von Montres Vulcain mit Weckerfunktion und hinterlegten Tauchtabellen für Nullzeittauchgänge mit Luft, 1962 (Foto T. Bühlmann)

zen. Albert A. Bühlmann schloss mit der US Navy einen Forschungsvertrag ab. Darin wurden US$ 10.000,- für die tauchmedizinischen Vorbereitungen zugesagt. Für die Annahme des Geldbetrages war die Zustimmung des Bundesrates nötig, der diese am 20.12.1961 erteilte mit der Begründung, dass damit die Neutralitätspolitik der Schweiz nicht in Frage gestellt werde.

Weltrekordversuch vor Catalina Island, Kalifornien

Am 30.10.1962 führten Hannes Keller und Peter Small in der Druckkammer in Zürich einen Testtauchgang auf 300 Meter mit einer Aufenthaltszeit von 5 Minuten in der Zieltiefe durch.
Am 3.12.1962 wurde die Druckkammer "Atlantis" auf dem von Shell zur Verfügung gestellten Schiff "Eureka" zum Einsatzgebiet vor Catalina Island geführt. Das Ereignis war ein Medienhype. Hannes Keller hatte für diesen Anlass ein Filmteam organisiert. Die nationale und internationale Presse war vor Ort.
Hannes Keller und Peter Small wurden in der Druckkammer, die mit normaler Luft gefüllt war, auf eine Tiefe von 1.000 Fuss respektive 305 Meter gelassen. Beide atmeten mit einer Atemmaske während der Kompressions- und der Dekompressionsphase unterschiedliche Gase, in der Kompressionsphase zuerst reinen Sauerstoff, dann Sauerstoff mit Stickstoff und ab ca. 90 Meter zunehmend Helium anstelle von Stickstoff und Sauerstoff. In der Dekompressionphase wechselte die Gaszusammensetzung in der umgekehrten Reihenfolge.
Auf 1.000 Fuss angekommen verliess Hannes Keller die Druckkammer, setzte seinen Fuss auf den Rand des Kontinentalsockels, schwamm ein paar Minuten und steckte je eine Schweizer und US Flagge auf dem Meeresgrund ein. Bei der Rückkehr in die Kammer verklemmte sich beim Schliessen der Druckkammer eine Schwimmflosse. Der Aufstieg verzögert sich. Hannes Keller stellte während der Dekompressionsphase fest, dass die Atemgaszufuhr gestört war. Er erkannte die tödliche Gefahr der ungenügenden Sauerstoffversorgung. Er versuchte Peter Small das Problem und dessen Lösung zu erklären. Gemäss den Ausführungen von Hannes Keller war diese Situation im vorgängigen Briefing besprochen worden. In der Druckkammer hatte es Luft und damit genügend Sauerstoff. Hannes Keller wusste, dass er wegen des hohen Druckes beim Atmen des Luftgemisches das Bewusstsein verlieren würde. Er tat das Richtige. Er riss sich die Atemmaske ab und verlor das Bewusstsein. Peter Small blieb an der Atemmaske und wurde deshalb ungenügend mit Sauerstoff versorgt. Als Hannes Keller das Bewusstsein wiedererlangte, war Peter Small immer noch an der Atemmaske. Hannes Keller riss Peter Small die Atemmaske ab. Es war aber zu spät. Der Sauerstoffmangel war für Peter Small tödlich. Ein Eingreifen von Aussen während der von 270 auf 410 Minuten verlängerten Dekompressionszeit als Folge der entstandenen Verzögerungen war nicht möglich. Zwei mit Peter Small und Hannes Keller befreundete Rettungstaucher tauchten der Atlantis entgegen und versuchten das Problem mit der verklemmten

Abbildung 8
Druckkammer "Atlantis" auf der "Eureka" vor Catalina Island am 3. Dezember 1962 (Foto Archiv A. Bühlmann)

Schwimmflosse zu beheben. Chris Whittaker kam von diesem Einsatz nicht zurück.
Der Todesfall von Peter Small wurde in Kalifornien strafrechtlich unter Einbezug der Gerichtsmedizin untersucht. Albert A. Bühlmann stellte den Untersuchungsbehörden und der US Navy alle relevanten Daten der Versuchsanordnung, insbesondere die Zusammensetzung der Atemgase und die Zeitpunkte der Gaswechsel sowie die Dekompressionsstufen, transparent dar. Die Untersuchungsbehörden stellten fest, dass das Tauchprofil, die Gaszusammensetzungen, die Gaswechsel, die schnelle Kompression und die Dekompression nicht ursächlich für den Tod waren. Ursächlich für den Tod war der Sauerstoffmangel, die lange Bewusstlosigkeit und die Kreislaufstörung von Peter Small, die eine erfolgreiche Dekompression verunmöglichten.
Was war die Ursache für die Unterversorgung mit Sauerstoff? Technische Störungen, ungenügende Vorbereitung, menschliches Versagen, das Wetter, Stress wegen Zeitdruck als Folge der hohen Medienpräsenz? Wir wissen es nicht.
Albert A. Bühlmann zog für sich aus dem tragischen Ereignis folgende Lehren: Die Universität Zürich beschränkte sich fortan darauf, in der Laborumgebung des Universitätsspitals Forschung zu betreiben. Später wurde dies von einem ein Journalisten treffend mit "Tauchmedizin im Reagenzglas" umschrieben. Die Umsetzung der Forschungsergebnisse in der Praxis lag nach Beginn der Forschungszusammenarbeit mit Shell, Micoperi und S.S.O.S. im Jahre 1963 in der Verantwortung der Geldgeber.
Hannes Keller hatte mit dem Versuch in Kalifornien die Reputation als verwegener Weltrekordtaucher erlangt und bis in die heutigen Tage bewahrt. Die menschliche Tragödie, die mit dem Versuch verbunden war und für die er die Verantwortung übernommen hat, hat daran nichts geändert. Albert A. Bühlmann machte sich international als Tauchmediziner einen Namen. Er referierte zum Thema "Respiratory resistance with hyperbaric gas mixture" anlässlich des 2nd Underwater Physiology Symposium im Februar 1963 in Washington. Albert A. Bühlmann und Hannes Keller publizierten den Artikel "Deep Diving and short decompression by breathing mixed cases" mit detaillierten Ausführungen zum Tauchgang vor Catalina Island hinsichtlich Tauchprofil, Gaszusammensetzung und Gaswechsel im Journal of Applied Physiology im Jahre 1965.

Zusammenarbeit mit Shell International Research Maatschappij, Micoperi S.p.A und Sub Sea Oil Services S.p.A

An neuen Forschungsresultaten war in der Folge nicht mehr das Militär, sondern die Erdöl- und Gasindustrie interessiert.
Shell übernahm als Sponsor des Forschungsprogramms die Führungsrolle. Shell sah das wissenschaftliche Potential des Tauchmediziners und war überzeugt von den Fähigkeiten von Hannes Keller als Taucher und Entwickler. Wirtschaftlicher Hintergrund war die Erschliessung von Öl- und Gasvorkommen im Kontinentalsockelbereich, die dann in den 70er Jahren in Angriff genommen wurde. Für die technische Umsetzung war aus Sicht von Shell der Einsatz von Tauchern in grosse Tiefen erforderlich. Bereits kurz nach den Ereignissen in Kalifornien begannen Vertragsverhandlungen zwischen Shell und Micoperi einerseits und Hannes Keller und Albert A. Bühlmann andererseits. Der Forschungs- und Beratervertrag wurde im November 1963 unterzeichnet. Das Ziel des Forschungsvertrages war wie folgt umschrieben: "Developent of commercialy applicable procedures, techniques and equipment to enable free divers to reach and work safely and effectively at water depths of up to 700 meters."
Zusätzlich gründeten die Vertragsparteien eine gemeinsame Aktiengesellschaft mit dem Zweck der Vermarktung der Rechte an immateriellen Gütern wie Patentrechten oder geheimem Know-how. Hannes Keller und Albert A. Bühlmann hielten je eine Beteiligung von 7.5%. Einige Jahre später wurden die Aktien von Hannes Keller und Albert A. Bühlmann von den Hauptaktionären für eine bescheidene Abgeltung zurückgekauft. Es gibt keine Hinweise darauf, ob Patentanmeldungen erfolgten.
Vieles spricht dafür, dass es keine gab, nicht zuletzt auch, weil sich Albert A. Bühlmann vertraglich ausbedungen hatte, über die Forschungsresultate zu referieren und sie zu publizieren. Dies tat er bereits vor dem Vertragsabschluss und auch danach. Damit war die Grundlage für eine Patentanmeldung nicht mehr gegeben. Alles spricht dafür, dass die Sponsoren gut damit leben konnten. Die Forschungsresultate wurden den Sponsoren als erste bekanntgegeben und sie mussten nebst den Forschungsgeldern und den Beratungshonoraren keine weiteren Entschädigungen zahlen.
Das alte Druckkammerlabor im Keller des Universitätsspitals wurde in der Folge sukzessive ausgebaut, mit der Druckkammer "Atlantis" im Zentrum.

Mitarbeitende für die technische Unterstützung wurden zunächst privat angestellt und später vom Kanton Zürich übernommen, als das Druckkammerlabor zunehmend auch Dienstleistungen im Interesse der Öffentlichkeit übernahm, wie z.B. die Behandlung von verunfallten Tauchern oder die Ausbildung von Polizei- und Armeetauchern. Benno Schenk, der langjährige technische Leiter des Druckkammerlabors, wurde so zunächst von Hannes Keller angestellt. Dank seines technischen Verständnisses und seinem organisatorischen Fähigkeiten bei der Vorbereitung und Durchführung der Überdruckversuche setzte er sich schon bald als technischer Leiter des Labors gegenüber Hannes Keller durch.
Bis zum 3. Mai 1966 wurden in der Druckkammer 103 Versuche mit dem Schwerpunktthema Sättigungstauchgänge bis 300 Meter durchgeführt.

Capshell Versuche vor Porto San Stefano 1966

Dreieinhalb Jahre nach dem Weltrekordversuch in Kalifornien fand ein für die Berufstaucherei bedeutendes Experiment in den Gewässern zwischen Porto San Stefano und der Insel Giglio statt.
Für diese Versuche bauten Shell und Micoperi eine ringförmige Überdruckkammer, die in verschiedene Räume aufgeteilt war. Die konzeptionelle Idee war es, die Kammer bei späteren Einsätzen auf Bohrinseln entlang des Bohrgestänges in die Tiefe zu führen, wo dann die Taucher ihre Arbeitseinsätze durchführten. Die Druckkammer war für lange Aufenthalte ausgelegt und sollte den Tauchern einen relativ komfortablen Aufenthalt über viele Tage bieten.

Abbildung 9
Capshell-Versuche vor Porto San Stefano, Italien, 1966 (Foto Archiv A. Bühlmann)

Die Versuche auf 30 Meter und 220 Meter Tauchtiefe dauerten jeweils mehrere Tage. Es wurden wiederholte Arbeitseinsätze simuliert. Die Versuche erfolgten auf der Grundlage der in Zürich getesteten Tauchprofile, der Zusammensetzung der Gase, der Gaswechsel und der Dekompressionsberechnungen. Shell und Micoperi waren nicht nur für das Design und den Bau der Druckkammer, sondern auch für die Logistik, die Durchführung der Versuche und die Sicherheitsprozesse verantwortlich. Albert A. Bühlmann schrieb: "Die Cap Shell Versuche wurden dank der umsichtigen Leitung durch Commander John Carr ohne ernsthafte Zwischenfälle durchgeführt". John Carr war der Leiter Research auf der Seite von Shell. Im Archiv von Albert A. Bühlmann gibt es keinen Hinweis, dass Hannes Keller bei der Vorbereitung und Durchführung der Experimente involviert war.
Die bedeutenden Experimente waren kein Medienereignis. Es vergingen viele Jahrzehnte, bis die Insel Giglio wegen der Havarie der Costa Concordia ins Rampenlicht rückte. Die Firma Micoperi führte die Bergung durch und erhielt dafür einen Award.
Die Experimente bei Porto San Stefano zeigten, dass lange Taucheinsätze in grossen Tiefen für die Taucher sicher durchgeführt werden konnten. Ein wichtiges Zwischenziel wurde damit bereits dreieinhalb Jahre nach Beginn der Forschungszusammenarbeit mit Shell erreicht.

Die Resultate von Zürich und Porto San Stefano werden in Alverstoke/UK überprüft

Bis 1969 wurden in Zürich weitere 51 Überdruckversuche durchgeführt. Im Februar 1969 wurde Albert A. Bühlmann nach Alverstoke/UK eingeladen, wo in einem mehrtägigen Versuch der Einsatz von Tauchern in Tiefen bis 350 Meter simuliert wurde. Benno Schenk begleitete ihn und unterstützte die

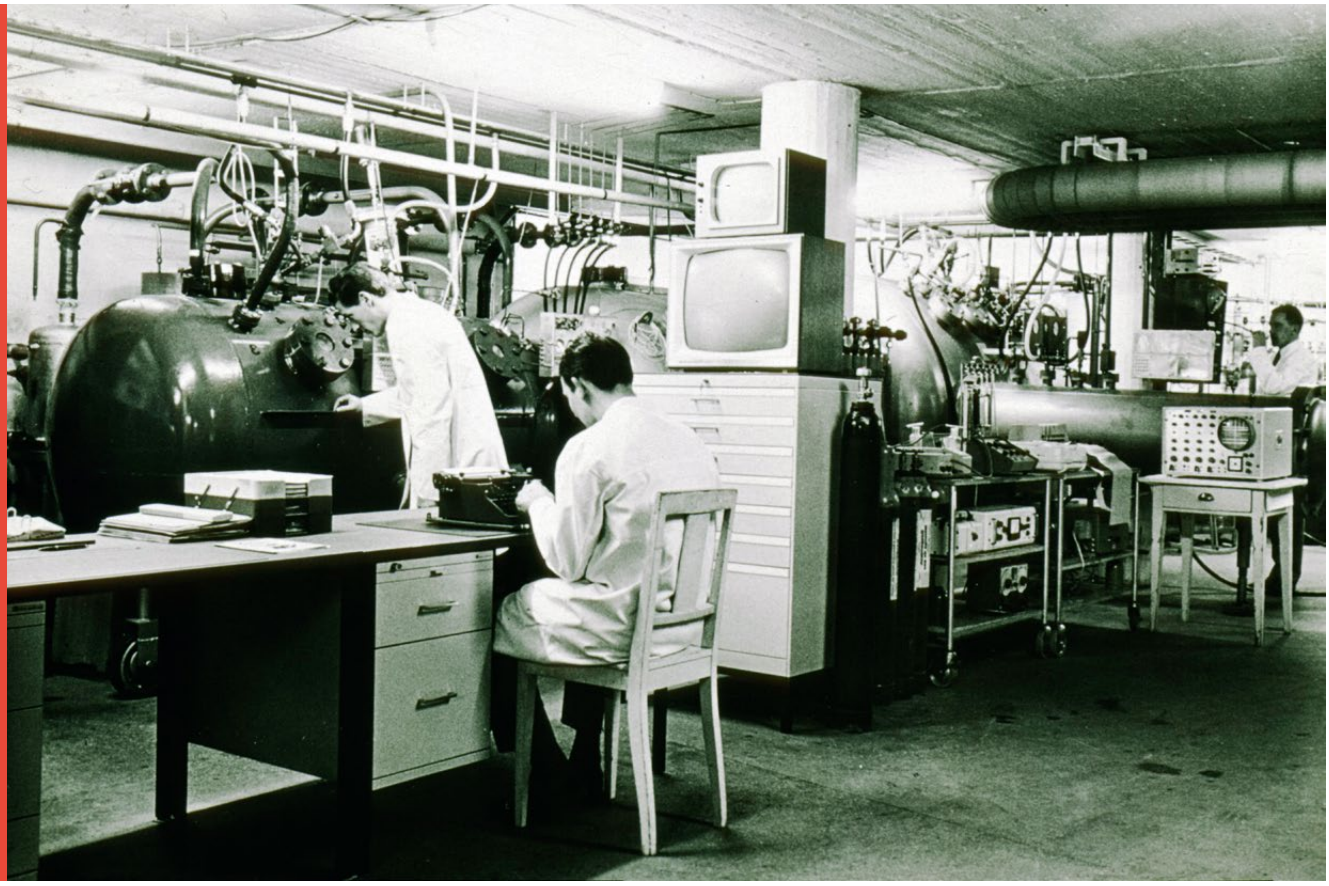


Abbildung 10
Druckkammer Uni Zürich 1973 (Foto Archiv A. Bühlmann)

Techniker in Alverstoke. Die Überdruckkammer in Alverstoke verfügte über einen Wassertank, der für Exkursionen genutzt wurde, um möglichst realitätsnahe Bedingungen zu schaffen. Die Versuchspersonen verbrachten 3 Tage in einer Tiefe von 300 Meter und unternahmen an drei aufeinanderfolgenden Tagen Exkursionen auf 350 Meter. Die Dekompression dauerte 4 Tage. Damit wurde ein weiterer Beweis erbracht, dass wiederholte Taucheinsätze in grossen Tiefen möglich sind und die sichere Dekompression eine akzeptable Dauer nicht überschritt.

Projekt Bau einer neuen Druckkammer in Zürich

1970 startet Albert A. Bühlmann das Projekt für den Bau der neuen Druckkammer in Zürich. Diese sollte Tauchgänge bis 1000 Meter erlauben und, wie die Anlage in Toulon oder diejenige in Alverstoke, über einen Wassertank verfügen. Die Herausforderung dieses Projekts war die Finanzierung. Erste Kostschätzungen gingen von Kosten von ca. CHF 2.000.000,- aus.
Shell erklärte sich bereit, einen bedeutenden Teil der Kosten im Umfange von ca. CHF 1.100.000,- zu übernehmen. Das reichte jedoch nicht. Albert A. Bühlmann beantragte mit der Unterstützung der Direktion der Medizinischen Klinik beim Regierungsrat des Kantons Zürich eine Kostenbeteiligung von CHF 650.000,-. Mit einer ausführlichen Begründung, unter Hinweis auf die grossen Forschungserfolge und der erwarteten künftigen Forschungsresultate unterstützte der Regierungsrat den Antrag mit Beschluss vom 12. November 1970. Das Eidgenössische Militärdepartement bewilligte einen Beitrag von CHF 150.000,-. Der Kanton Zürich, das Eidgenössische Militärdepartement und Shell erhöhten in den folgenden 5 Jahren ihre Zahlungszusagen um insgesamt ca. CHF 500.000,-. Der Kanton Zürich übernahm zusätzlich bauseitige Kosten in der Höhe von mehr als CHF 400.000,-. Albert A. Bühlmann leistete einen Beitrag von CHF 85.000,-. Die Gesamtkosten für die neue Druckkammer beliefen sich

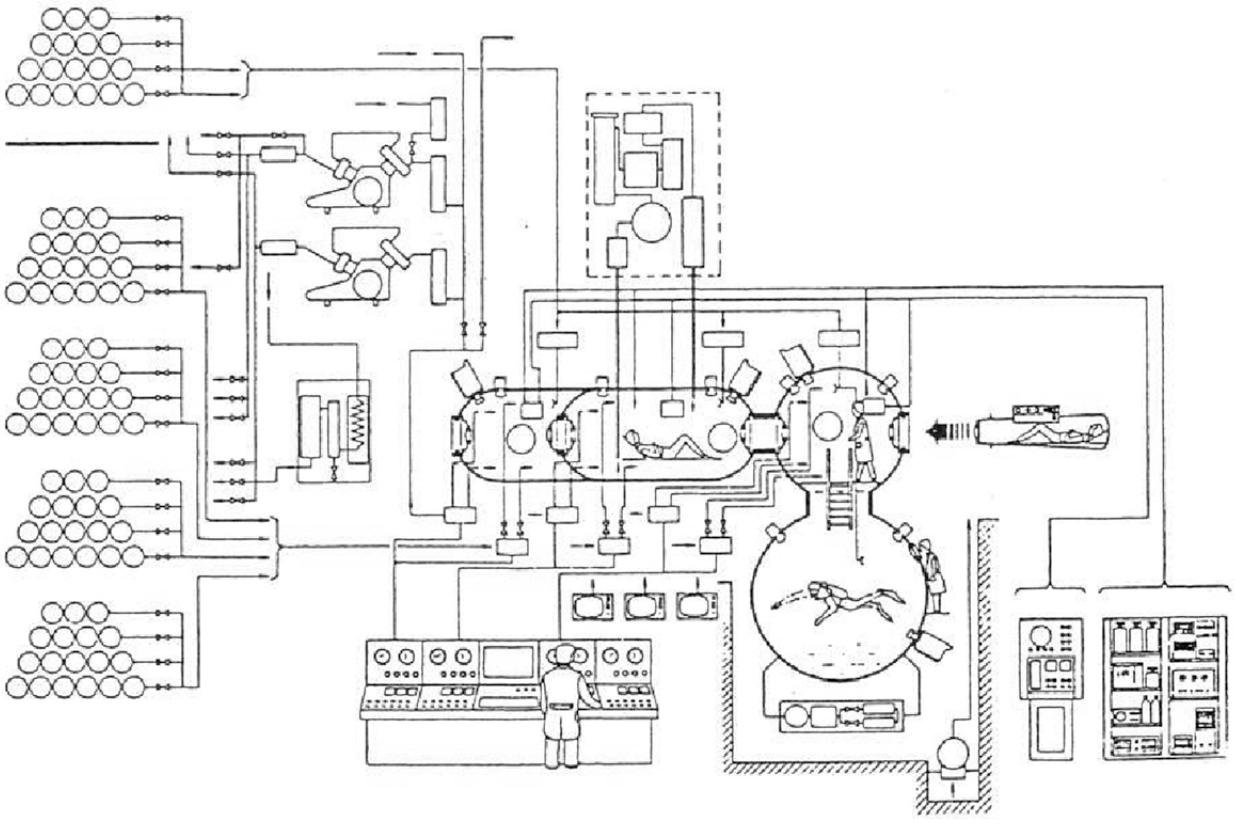


Fig. 1: Schematische Darstellung des Druckkammersystems

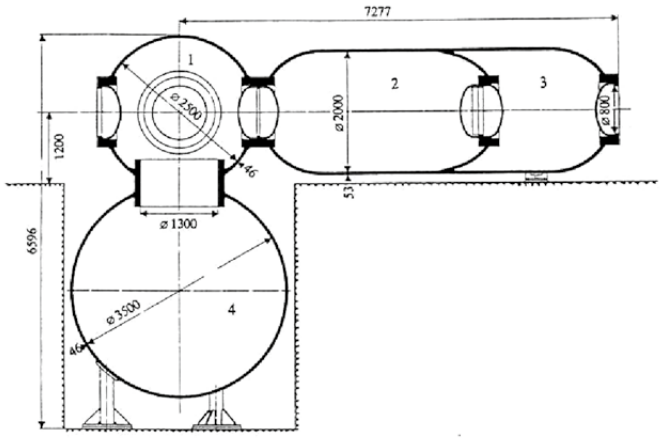
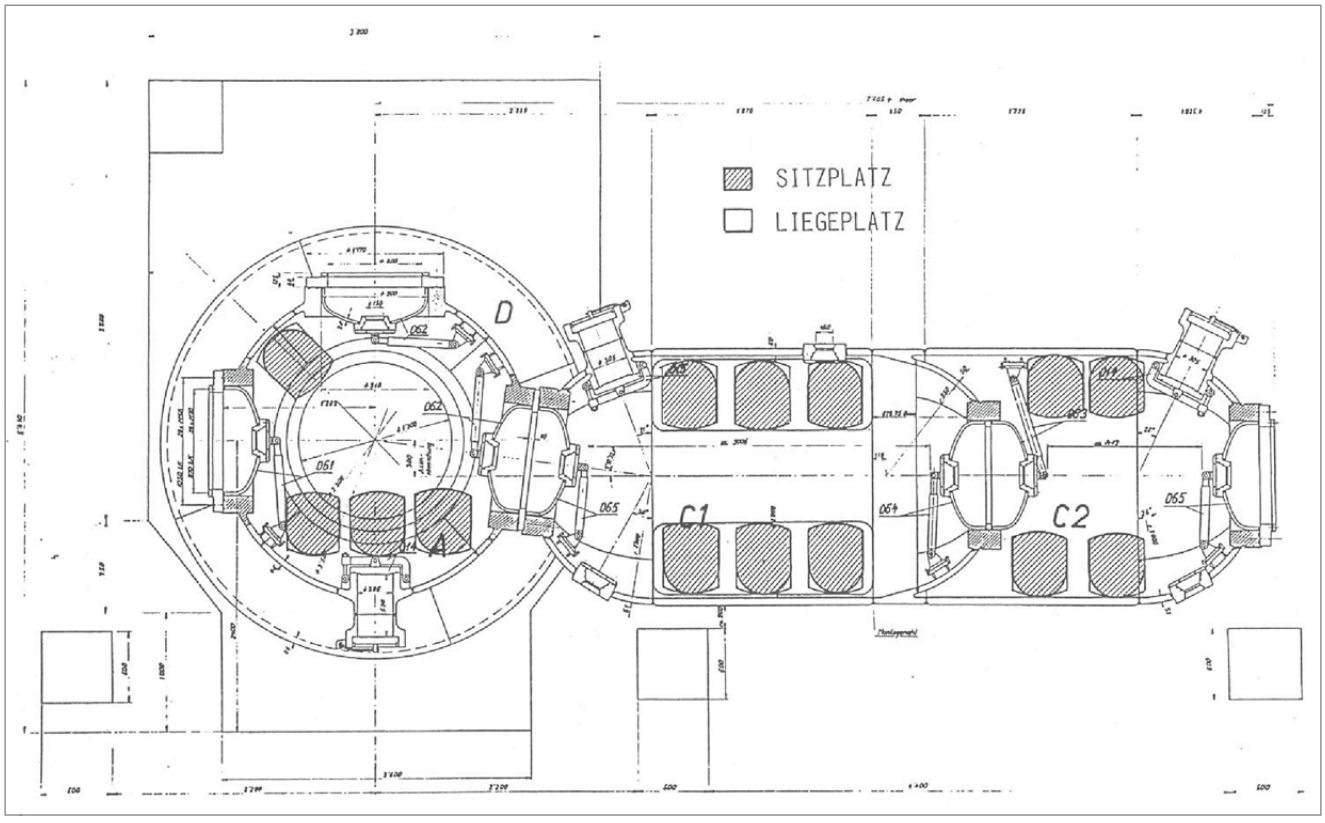


Fig. 2: Abmessungen der Druckkammer

DRUCKBEREICH:	in allen Kammern 0.25 - 100 bar			
ABMESSUNGEN:	Kammer 1	Kammer 2	Kammer 3	Wassertank
Durchmesser	2.5 m	2.0 m	2.0 m	3.5 m
innere Länge	-	3.2 m	1.6 m	-
Luken Ø	0.8 m	0.8 m	0.8 m	1.3 m
Volumen	8.0 m^3	10.0 m^3	6.5 m^3	22.0 m^3
LIFE SUPPORT SYSTEM (LSS): Betriebsbereich				
Temperatur (°C)	+15 - +45	+15 - +45	+15 - +45	+4 - +45
Luftfeuchtigkeit	30 - 100%	30 - 100%	30 - 100%	-
FUELLGAS KAMMER:	reiner Sauerstoff, Helium, Luft, oder andere			
ATEMGAS MASKEN:	reiner Sauerstoff, Helium, Luft, oder andere			
MAXIMALE DRUCKAENDERUNG:	bis 20 bar/min möglich			
PERSONENSCHLEUSEN:	Kammer 1 und Kammer 3			
MATERIALSCHLEUSEN:	von aussen nach Kammer 1, 2, und 3			
KOPPLUNGSMOEGLICHKEIT FUER TRANSPORTABLE DRUCKKAMMERN:	an Kammer 1 anzukoppeln			



am Schluss auf CHF 3.000.000,-. Ob und wie weit die Mehrkosten auch durch zusätzliche Ausbauwünsche verursacht wurden, kann durch Quellen nicht belegt werden.
Der erste Versuch in der neuen Druckkammer fand am 27.11.1975 statt. Die Neue Zürcher Zeitung und der Tagesanzeiger widmeten dem Ereignis ausführliche Artikel.
Der Forschungs- und Gutachtervertrag mit Shell, Micoperi und S.S.O.S. wurde ab 1974 mit Albert A. Bühlmann alleine, ohne Hannes Keller, weitergeführt. Ein Schwerpunktgebiet in der Zeit bis zum 30.6.1981, als der Vertrag endete, bildeten Versuche in sehr grossen Tiefen. 1977 beschrieb Albert A. Bühlmann erstmals das "High Pressure Nervous Symptome" (HPNS). Livio de Toffel, der am Tauchgang auf 500 Meter im Jahre 1977 teilnahm und unter diesen in grossen Tiefen auftretenden Symptomen litt, sagte mir als Zeitzeuge im Interview, "es war der Weltuntergang". Diese Beschreibung des Befindens von Livio de Toffel findet sich auch im Protokollheft von Albert A. Bühlmann. Mit einer verlangsamten Kompression wurde am 28.2.1981 die Zürcher Rekordtiefe von 575 Metern erreicht. Bei diesem Versuch fühlten sich die Taucher im Vergleich zum Versuch im Jahre 1977 deutlich besser.
Mit dem Versuch am 28.2.1981 fand der letzte Tieftauchversuch in Zürich statt. Shell, Micoperi und S.S.O.S. verlängerten den Forschungsvertrag mit Zürich über den 30.6.1981 hinaus nicht.

Abbildung 12
Albert A. Bühlmann an der Druckkammer der Uni Zürich (1980er Jahre) (Foto Archiv A. Bühlmann)

Gründe für das Ende der langjährigen erfolgreichen Forschungszusammenarbeit mit Shell International, Micoperi und S.S.O.S.

Die Gründe für das Ende der Forschungszusammenarbeit dürften vielschichtig gewesen sein. Im Archiv fehlen Quellen aus denen die Gründe direkt abgeleitet werden können. Gemäss meiner Einschätzung waren die industriellen Geldgeber mit folgender Situation konfrontiert:
Das Ende von ausserordentlichen Forschungserfolgen im Bereich Tieftauchen war absehbar. Die Leistungsfähigkeit der Taucher bei Tauchgängen in sehr grosse Tiefen war eingeschränkt. Der Zeitaufwand für die verlangsamte Kompression und die aus Gründen der Risikoabwägung tendenziell länger werdenden Dekompressionszeiten verteuerten Taucheinsätze. Bleibende Gesundheitsschäden als Folge der HPNS-Symptome wurden von einzelnen Tauchmedizinern nicht ausgeschlossen. Die rechtlichen Risiken für die Einsatzfirmen von Tauchern stiegen. Auf der anderen Seite wurden neue technische Hilfsmittel entwickelt wie Tauchroboter oder U-Boote, mit deren Einsatz auf Tauchereinsätze mehr und mehr verzichtet werden konnte. Schliesslich erwuchs Zürich mit Bergen in Norwegen eine gewichtige Konkurrenz im Bereich tauchmedizinische Forschung. Norwegen war die wichtigste Ausgangsbasis für die Berufstauchereisätze in der Nordsee. Die norwegische Arbeitssicherheitsbehörde nahm zunehmend eine aktive Rolle ein bei der Regulierung von Tieftaucheinsätzen wahr. Die in Norwegen zur Verfügung

stehenden finanziellen Mittel für die Forschung im Bereich Tauchmedizin dürften diejenigen von Zürich bei weitem überstiegen haben.
Albert A. Bühlmann hat diese Gründe wohl erkannt. Nach dem Rekordversuch auf 575 Meter vom 28.2.1981 wurden in Zürich keine weiteren Tieftauchversuche mehr durchgeführt. Ob er sich auch die Frage stellte, ob das Prinzip der Subsidiarität bei Versuchen mit freiwilligen Probanden beim Wissensstand im Jahre 1981 nicht mehr erfüllt sein könnte, ist nicht erwiesen. Das Prinzip der Subsidiarität besagt, dass Versuche mit Menschen nur durchgeführt werden dürfen, sofern die medizinischen Erkenntnisse nicht mit anderen Mitteln gewonnen werden können und der Gewinn der neuen Erkenntnisse die Versuche als verhältnismässig erscheinen lässt. Zürich beteiligte sich als wohl erstes bedeutendes Forschungszentrum nicht mehr bei der "Jagd" nach weiteren Tiefenrekorden.
Für Albert A. Bühlmann standen nach der Beendigung des Forschungsvertrages mit Shell, Micoperi und S.S.O.S. neue Forschungsziele im Vordergrund. Er legte diese wie folgt fest:

1. Erweiterung der Datenbasis für Tauchgänge bis 44 Meter mit verschiedenen Gasmischungen, d.h. für einem Tiefenbereich, in dem sich Sporttaucher bewegen
2. Verbesserungen seines mathematischen Rechenmodells für die Berechnung von Dekompressionen
3. Neue verbesserte Dekompressionstabellen ZH-86 für Sporttaucher
4. Erweiterung der Datenbasis für Tauchgänge in der Höhe
5. Entwicklung von Rechenmodellen für den Einsatz in Tauchcomputern auf der Grundlage des Rechenmodells ZH-L16A
6. Publikation von Dekompressionstabellen für Caissonarbeiten
7. Publikation der gesammelten Forschungsresultate aus 24 Jahren tauchmedizinischer Forschung in Zürich

In der Druckkammer wurden vom 1.7.1981 bis Ende 1985 noch 81 Tauchversuche mit Tiefen bis 44 Meter und mit unterschiedlichen Gasmischungen durchgeführt. Der letzte Druckkammerversuch mit der Nummer 455 fand am 11.9.1985 statt. Dank der Tauchcomputer konnten empirische Daten zunehmend durch reale Tauchgänge erfasst werden und machten deshalb Versuche in der Druckkammer obsolet.
1983 erschien die erste Monographie "Dekompression - Dekompressionskrankheit" von Albert A. Bühlmann auf Deutsch und 1984 auf Englisch. Die Berechnungsgrundlagen für risikoarme Dekompressionen und Dekompressionstabellen für unterschiedliche Tiefen bis maximal 54 Meter und unterschiedliche Höhenlagen bis 3.500 m ü. NN einschliesslich Zeitzuschlägen für Repetitivtauchgänge wurden publiziert. Ende 1985 intensivierte sich die Zusammenarbeit von Albert A. Bühlmann mit Jürgen Hermann von der Firma Divetronic bezüglich der Weiterentwicklung des Deco-Brain 1 zum Deco-Brain 2 und beim Projekt "Entwicklung einer Luxustaucheruhr" mit Montres Rolex SA. Der Deco-Brain 2 nutzte das Zürcher Rechenmodell ZH-L16A.

Abbildungen 13 bis 15
Tauchcomputer Aladin (1987), Aladin Pro (1988) und Aladin Pro Nitrox (1988) (Fotos Archiv E. Völlm)

Forschungsresultate von 1986 bis 1994

1. Entwicklung der Rechenmodelle ZH-L6 und ZH-L8 ADT
Abgeleitet von dem Rechenmodell ZH-L16A entwickelt Albert A. Bühlmann in enger Zusammenarbeit mit den Gründern der Firma Dynatron Ernst Völlm und Markus Mock zunächst das Rechenmodell ZH-L6. Das Rechenmodell ZH-L16A musste aus Gründen der damals beschränkten Rechenleistung der Prozessoren und der limitierten Energieversorgung auf 6 Gewebe reduziert werden. Das Rechenmodel ZH-L6 bildet die Grundlage für die Tauchcomputer Aladin und Aladin Pro der Firma Uwatec, die 1987 respektive 1988 auf den Markt kamen. Die Erkenntnisse werden auch der Firma Divetronic zur Verfügung gestellt, für deren Berücksichtigung beim Tauchcomputer Microbrain. Anlässlich der "BOOT" 1994 in Düsseldorf stellen Albert A. Bühlmann, Ernst Völlm und Markus Mock den Tauchcomputer Aladin Air X vor mit dem Rechenmodell ZH-L8 ADT. Das Modell berücksichtigte die Mikrogasblasenbildung, die Temperatur und die Arbeitsleistung und ermöglichte damit erstmals eine individualisierte Dekompressionsberechnung. Der Tauchcomputer Aladin Air X nutzte in kompakter Weise die Erkenntnissen von 35 Jahren Forschung im Bereich der Tauchmedizin.

2. Bühlmann Tabellen ZH-86
Auf der Grundlage des Rechenmodells ZH-L16A publiziert Albert A. Bühlmann im Jahre 1986 die "Bühlmann Tabellen ZH-86". Diese berücksichtigen die im Rahmen von 455 Tauchversuchen gewonnen

Abbildung 16
Tauchcomputer Aladin Air X (1994) (Foto Archiv E. Völlm)

Erfahrungen. Beat Müller als Leiter der technischen Kommission des Schweizerischen Unterwassersportverbandes begleitet die Einführung. In einem Artikel, publiziert im Publikationsorgan des Verbandes, erläutert er die Entstehung der neuen Tabellen und die Gründe für deren Empfehlung. Die Tabellen wurden von verschiedenen weiteren Tauchsportverbänden als Standard übernommen.

3. Tabellen für Bergseetauchen
Erste Dekompressionstabellen für Bergseetauchen entstanden Anfangs der 70er-Jahre. Auf

Abbildung 17
Bühlmann Tabelle 86 (Foto Archiv T. Bühlmann)

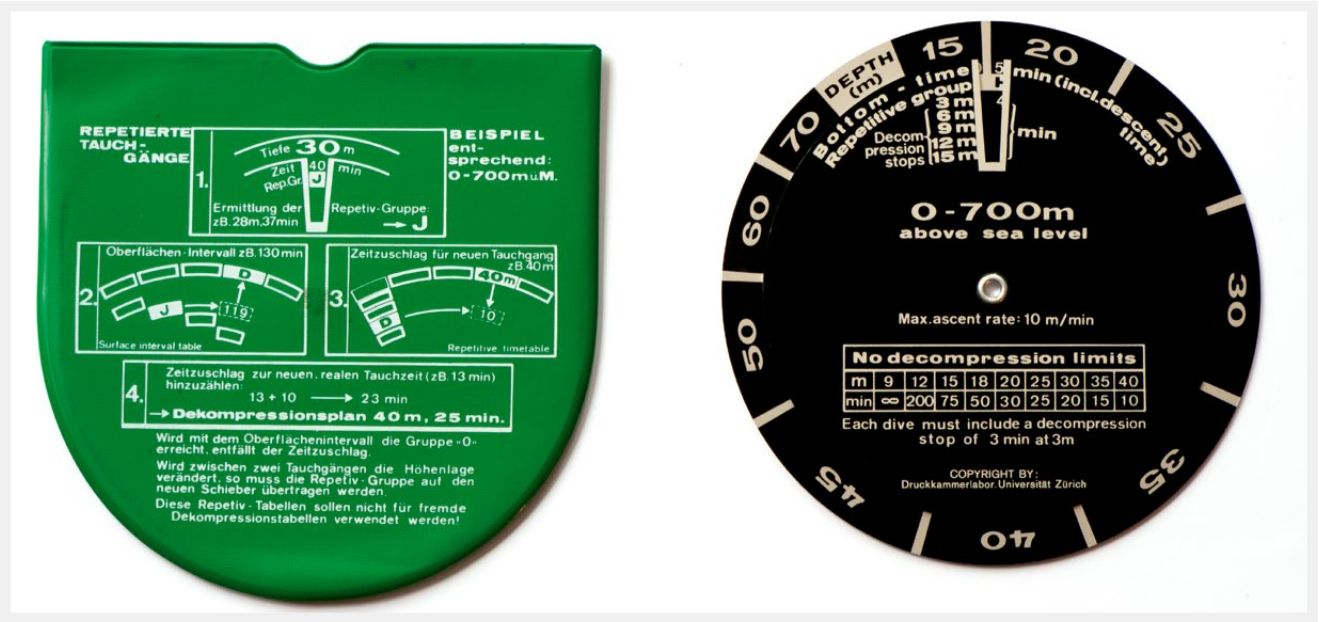


Abbildung 18
Bühlmann Tabelle 86 als Rechenschieber (Aluminium-Drehscheibe) (Foto Archiv T. Bühlmann)

der Grundlage von bei Tauchversuchen in der Höhe systematisch gewonnenen Daten sollten verbesserte Tabellen für Höhen bis 4.500 Meter herausgegeben werden. In den Jahren 1986 bis 1988 haben im Titicacasee, Muttsee, Lago di Lucendro und im Mount Kenya Massiv zahlreiche Taucher reale Tauchgänge unter tauchmedizinischer Anleitung durchgeführt. Die Tauchexpedition im Titicacasee im Jahre 1987 war ein internationales Projekt mit Tauchern und Tauchmedizinern aus England, der Schweiz und Bolivien. Albert A. Bühlmann rechnete für diese Expedition neue Dekompressionstabellen. Bei diesen Tauchexperimenten wurden auch die Tauchcomputer Deco-Brain 2 und Aladin ausgedehnt getestet. Auf der Grundlage der gewonnen Daten wurden neue Tabellen für Bergseetauchen herausgegeben.

4. Tabellen für Caissonarbeit
Gemeinsam mit der Schweizerischen Unfallversicherungsanstalt, welche für Fragen der Arbeitssicherheit in der Schweiz zuständig ist, wurden für die Caissonarbeit neue verbesserte Dekompressionstabellen eingeführt.

5. Monographie
Im Jahre 1990 erscheint die Monographie "Tauchmedizin" als 2. Auflage des Buches "Dekompression - Dekompressionskrankheit". Albert A. Bühlmann beschreibt das Rechenmodell ZH-L16A. Er geht auf die theoretischen Toleranzgrenzen und die experimentellen Ergebnisse eingehend ein. Im Anhang werden die überarbeiteten Tabellen für Luftdekompressionen für unterschiedliche Höhenlagen publiziert. Retrospektiv wurden 90 Versuchsserien mit 1180 Versuchspersonen ausgewertet. Prospektiv wurden 1986 bis 1988 insgesamt 498 reale Tauchgänge mit Luft in Tauchtiefen von 12 bis 60 m in Höhen von 1.400 m ü. NN bis 3.800 m ü. NN durchgeführt und ausgewertet. Erstmals beschreibt Ernst Völlm in der 2. Auflage der Monographie "Tauchmedizin" die Funktionsweise des Elektronischen Dekompressionscomputers. Im Jahre 1993 erschien die 3. Auflage der Monographie "Tauchmedizin". Das Buch adressiert erstmals auch das Thema individuelle Dekompression.

6. 35 Jahre tauchmedizinische Forschung in Zürich
Der freiwillige Einsatz von über 1.000 Probanden, die sich während Jahren für Tauchversuche zur Verfügung gestellt haben, erfüllte den wichtigen Zweck, das Tauchen, insbesondere auch das Sporttauchen, sicherer zu machen. Dank ihrer Mithilfe und ihrer Schmerztoleranz konnten die theoretischen Erkenntnisse empirisch verifiziert werden. Das Ergebnis waren Verfahren für das Tieftauchen von

Abbildung 19
Systematische Tauchversuche für die Erstellung neuer Bergsee-Dekompressionstabellen im Lago di Lucendro 1986 (Foto Archiv A. Bühlmann)

Abbildung 20
Systematische Tauchversuche für die Erstellung neuer Bergsee-Dekompressionstabellen im Titicacasee 1987 (Foto Archiv A. Bühlmann)

Berufstauchern und für Caissonarbeiten, verbesserte Dekompressionstabellen für Normalhöhe und Höhen bis 4.500 Meter und das Rechenmodell ZH-L16 A "theoretisch", ZH-L16B für Tauchtabellen und ZH-L16C für Tauchcomputer. Davon abgeleitet wurden die Rechenmodelle ZH-L6 und das adaptive Rechenmodell ZH-L8 ADT. Auf die in Zürich entstandenen Rechenmodelle basieren viele der heute angebotenen Tauchcomputer.

Dank der Forschung in Zürich konnten die Behandlungsmethoden von verunfallten Tauchern laufend verbessert werden. Die Erkenntnisse wurden in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

Albert A. Bühlmann war es immer ein wichtiges Anliegen seine Erkenntnisse zeitnah zu publizieren. Für seine Forschung war die finanzielle Unterstützung durch die Industrie unerlässlich. Trotzdem liess er sich in seiner Publikationsfreiheit nicht einschränken. Das wichtigste Ergebnis seiner Forschungsarbeit waren seine 58 Publikationen und seine Bereitschaft, seine Erkenntnisse bei der Entwicklung von technischen Hilfsmitteln wie dem Tauchcomputer praxisnah einzubringen.

Mit meiner Masterarbeit soll aufgezeigt werden, wie eine erfolgreiche Forschungstätigkeit entstehen kann. Die Geschichte der Tauchmedizin veranschaulicht an einem Beispiel der Forschungstätigkeit an der Universität Zürich das erfolgreiche Zusammenspiel von Forschern, Sponsoren, Regierung und Organen der Universität. Es wird auf spezifische rechtliche Fragen eingegangen, Fragen der Ethik in der Forschung und das Thema Forschungsfreiheit diskutiert. Die Arbeit zeigt auf, wie Forschungsziele einer ständigen Überprüfung bedürfen und sich verändernden Verhältnissen anpassen müssen. Schliesslich wird auch aufgezeigt, weshalb die tauchmedizinische Forschung in Zürich mit dem Tod von Albert A. Bühlmann im Jahre 1994 endet. In der Arbeit wird das Quellenmaterial einschliesslich des persönlichen Archivs von Albert A. Bühlmann erstmals umfassend erfasst und als Grundlage für die Darstellung der Geschichte der Tauchmedizin in Zürich von 1959 bis 1994 gewürdigt.

Thomas A. Bühlmann

Abbildung 21
Albert A. Bühlmann, 1990er Jahre
(Foto Archiv A. Bühlmann)

Albert A. Bühlmann -
Beyond Diving Physiology

Autor/Referent

Prof. em. Dr.
Erich W. Russi

former director
pneumological clinic
at Zurich University
Hospital
Follower of A.A. Bühlmann
as professor

A. A. Bühlmann was not only an internationally recognized researcher in diving medicine, but also a pioneer in cardio-pulmonary medicine.
He studied medicine during Second World War in Berlin and finished medical school at the university of Zurich. His talent was detected by Paul-Henri Rossier (1899-1976), who was director of the outpatient clinic from 1937 to 1957, and until 1969 head of the clinic for Internal Medicine at the Zurich University hospital. PH Rossier was well known for his scientific contributions in acid-base physiology and his interest in the relationship between ventilation and arterial blood gases. He was succeeding the famous tradition of former members of the Zurich medical faculty, such as Adolf Fick (1829-1901), known for devising the principle for calculating cardiac output as well as the application of the law of diffusion in physiology, and Kurt von Neergaard (1887-1947), who detected the role of a substance, subsequently called surfactant, for the stabilization of the lungs alveoli.
At the age of 35 years Bühlmann was promoted to Privatdozent, based on extensive studies of the invasive pressure measurements of the pulmonary as well as the systemic circulation. At the university hospital of Zurich, he became head of the cardiopulmonary laboratory. In 1956 he coauthored with PH Rossier and K Wiesinger the text book “Physiologie und Pathophysiologie der Atmung. This very successful book was published in several editions in German, 1960 in English and 1962 in Italian as well as in French. AA Bühlmann and R Froesch published also a paperback on pathophysiology, that served as a teaching base in this field for numerous medical students during two decades. AA Bühlmann explored pulmonary function as well as exercise capacity of healthy persons and published standard value tables, which were used in countless clinical laboratories over decades. He also studied cardiopulmonary function in patients after surgical interventions for tuberculosis (e.g. thoracoplasty), explored functional parameters to predict perioperative mortality in surgery for lung cancer and followed the course of patients with pneumoconiosis.

One of most prominent scientific contributions of AA Bühlmann was summarized in a paper with the title: the interrelationship between cor pulmonale, capillary bed restriction and diffusion insufficiency for oxygen of the lung, published together with PC Luchsinger, KM Moser and PH Rossier in 1957 in the American Heart Journal. His scientific contributions encompass several hundred publications, mainly published in German.
Although AA Bühlmann focused during later years on the functional aspect of lung diseases, he remained an expert in cardiac pathophysiology and was frequently consulted by academic cardiologists working in the catheter laboratory. Albert Bühlmann died 1994 at the age of 71, few years after his retirement as a professor for pathophysiology at the university of Zurich.

Erich W. Russi

MEILENSTEINE DES TIEFTAUCH-FORSCHUNGSLABORS ZÜRICH

Autor/Referent

Dr. med.
Jürg Wendling

Specialist for Hand Surgery
Diving and Hyperbaric Medicine
Occupational Medicine
DAN Europe Suisse
National Director

Vortrag und Artikel auf der Grundlage des Artikels "Milestones of the Deep Diving Research Laboratory Zurich" von Jürg Wendling, Peter Nussberger und Benno Schenk, veröffentlicht im SPUMS Journal Volume 29 No.2 June 1999, p. 91-98.

Abstract

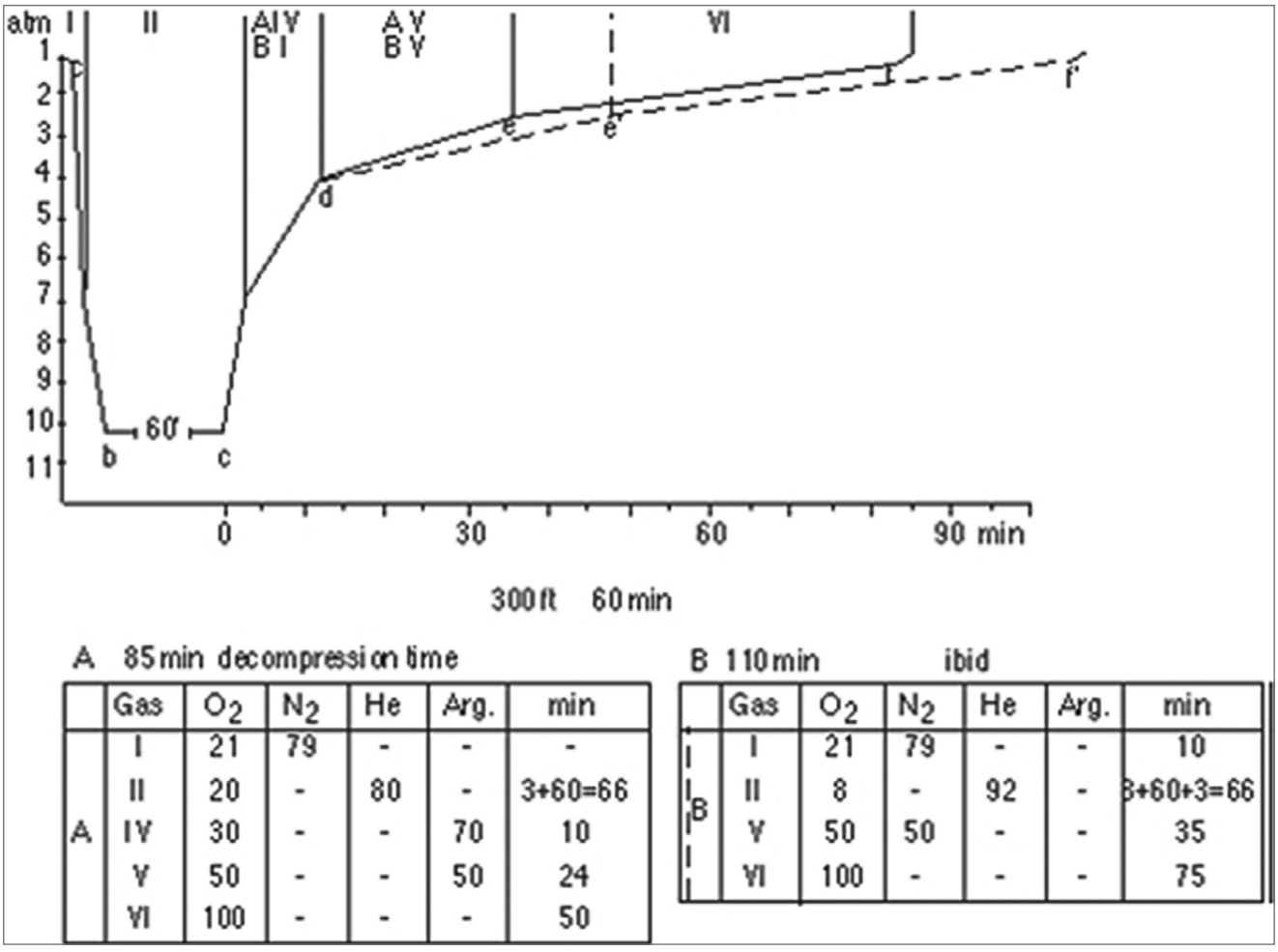
Zwischen 1959 und 1963 führte der Tieftauchpionier Hannes Keller mit Heliox eine Reihe von Tieftauchexperimenten durch. Unterstützt wurde er dabei von dem Lungenphysiologen Professor Albert A. Bühlmann der Universität Zürich. 1961 ermöglichte die Anwendung eines modifizierten, gewebeübergreifenden, perfusionslimitierten Dekompressionsalgorithmus für Stickstoff und Helium einen Freiwassertauchgang auf Santa Catalina Island vor Kalifornien in 305 m Tiefe. Der Preis war jedoch ein Todesfall. Dieser Tauchgang war ein Durchbruch für das kommerzielle Tauchen und bewies die Machbarkeit des Tieftauchens mit Helium.

Ein Forschungsauftrag mit Shell zur Entwicklung von Dekompressionstabellen für Offshore-Arbeiten ermöglichte es dem neu strukturierten Forschungsteam in Zürich eine 100 ATA hyper- und hypobare, mehrkammerige Forschungs- und Behandlungsanlage zu bauen, die von einem der Autoren (Ingenieur Benno Schenk) geplant und geleitet wurde. Die experimentellen Tauchgänge wurden 1969 in Alverstoke, UK, auf 220 und 350 m und 1981 in Zürich auf 575 m fortgesetzt. Die ursprünglichen Dekompressionstabellen wurden bald empirisch modifiziert und fanden breite Anwendung.

Höhentauchtabellen für SCUBA-Tauchgänge wurden speziell für die Bedürfnisse von Militär- und Polizeitauchern in der Schweiz entwickelt. Tauchtabellen mit den Algorithmen von den Tieftauchversuchen wurden berechnet und für verschiedene Höhenbereiche (bis 5000 m) getestet. Bühlmann postulierte ein lineares Verhältnis seiner Übersättigungstoleranz-koeffizienten zum Aussendruck. 1972 wurde die erste Höhentabelle mit einem 12-Gewebe-Modell hergestellt, und 1986 wurde der eigentliche Satz von Tabellen mit 16 Geweben hergestellt. In einer Zeit der allgemeinen Ablehnung jeglicher Tauchpraktiken mit Computern als Online-Tauchgangsplaner unterstützte Bühlmann die Anpassung der Zürcher Tabellen für Tauchcomputer. Das Modell von 1986 wurde weiter angepasst, um Arbeitsbelastung, Temperatur, Atemfrequenz und unzureichende Dekompressionsverfahren zu berücksichtigen, insbesondere unter Berücksichtigung der Blasenbelastung der Lunge in bestimmten Phasen.
In den 90er Jahren wurde die Anlage dann für andere Entwicklungen eingesetzt, einerseits zur Entwicklung von Tieftauchatemgeräten und für die Forschung zur klinischen hyperbaren Sauerstofftherapie (HBO).

Nachweis der Machbarkeit von Tieftaucharbeiten mit Helium (1959-1963)

1958 war der junge Mathematiklehrer Hannes Keller, ein begeisterter Sporttaucher, fasziniert von der Idee, die Grenzen des Tieftauchens zu überschreiten, indem er die bekannten Tricks optimierte und einige seiner eigenen Ideen einführte, die er viele Jahre lang geheim hielt. Um finanzielle



A 85 min decompression time

	Gas	O_2	N_2	He	Arg.	min
	I	21	79	-	-	-
	II	20	-	80	-	3+60=66
A	IV	30	-	-	70	10
	V	50	-	-	50	24
	VI	100	-	-	-	50

B 110 min ibid

	Gas	O_2	N_2	He	Arg.	min
	I	21	79	-	-	10
B	II	8	-	92	-	3+60+3=66
	V	50	50	-	-	35
	VI	100	-	-	-	75

Abbildung 1
Kompressions- und Dekompressionsprofile und Gase, die für einen Tauchgang bis 90 m (300 ft) für 60 Minuten Grundzeit verwendet werden, neun Probanden (Abbildung 2 in [1]).

Unterstützung zu erhalten, musste er einen medizinischen Wissenschaftler konsultieren, den er bei Dr. A. A. Bühlmann, einem Lungenphysiologen des Universitätsklinikums Zürich, fand. Bühlmann musste sich zunächst davon überzeugen, dass Helium notwendig ist, um eine Stickstoffnarkose zu vermeiden, die er für einen CO2-Retentionseffekt hielt. Ein Versuch in einer Monoplace-Kammer, mit Bühlmann als Versuchsperson, überzeugte ihn.
Keller's Geheimnisse waren:

- Fähigkeit, mit seiner fortgeschrittenen Mathematik-Erfahrung und dem neu installierten IBM-Computer in Zürich schnell und komplex zu rechnen. Mit dem perfusionslimitierten Mehrgewebemodell (Haldane, Dwyer)[a,b] berechnete er die Dekompression für die Gasfraktionen verschiedener Gase.
- Reduzierung der Gasbelastung durch ultraschnellen Abstieg (20-50 m pro Minute)
- Reduzierung der Inertgas Belastung durch normo- und hyperbare Vor-Oxygenierung
- Reduzierung der Dekompressionszeit durch mehrfache Gaswechsel unter Verwendung des Gegendiffusionseffekts, der eine temporäre Reduzierung der gesamten Inertgas-Spannung beim Wechsel zu einem Gas mit höherem Molekulargewicht bewirkt.
- Reduzierung der Dekompressionszeit durch Atmung mit einem PO2 von bis zu 2,5 bar.

Mit diesen Prinzipien gelang es ihm, mehrere Rekordtauchgänge durchzuführen (122 m im Zürichsee 1959 und 222 m in Locarno 1960). Der technische Support war jedoch im Vergleich zu ähnlichen Tests der US-amerikanischen, französischen und britischen Marine minimal [1]. Keller benutzte nie ein oberflächenversorgtes Unterwasser-Atemgerät, sondern entwickelte handliche Schlauchventile, die das Nachfüllen und den Gaswechsel seines Scuba-Rebreather-Systems in der Tauchglocke ermöglichten.
Mit sechs Gasgemischen, von denen zwei Argon enthielten, erreichte das Team eine Arbeitszeit von 60 Minuten in 90 m Tiefe bei einer Gesamtdekompressionszeit von nur 85 Minuten (s. Abbildung 1).
Ein Tauchgang von zehn Minuten Grundzeit auf 220 m, gefolgt von nur 140 Minuten Dekompression, wurde mit Hilfe von Simulationen in einer Monoplatzkammer geplant, die in der Lage war, maximal 5 ATA zu erreichen, indem Profile mit identischen Dekompressionsverhältnissen und Gasgemischen durchgeführt wurden, die von 4,4 bar in hypobare Drücke bis zu 0,2 bar übergehen. Der Tauchgang wurde in Toulon und Washington 1961 in einer Überdruckkammer erfolgreich durchgeführt (s. Abbildung 2).

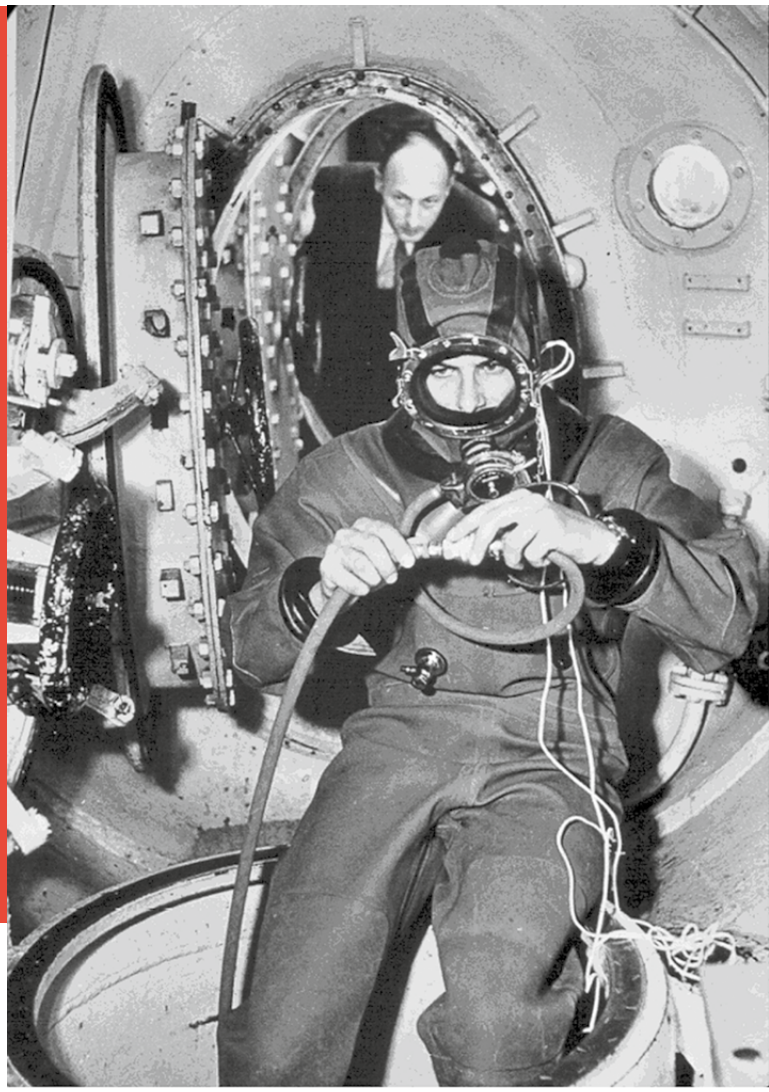


Abbildung 2
Hannes Keller (vorne) und Professor Bühlmann in der Kammer von Toulon vor einem 220-m-Kammertauchgang (Foto Archiv A. Bühlmann).

Der tiefste Tauchgang war 5 Minuten bis 305 m mit einer Dekompression von nur 270 Minuten (s. Abbildung 3). Dieser Tauchgang wurde im Meer mit einer Glocke mit einem Ausstieg auf dem Grund durchgeführt. Der Aufstieg wurde durch eine Tragödie erschwert. Kellers Tauchpartner starb an Hypoxie, wegen fehlender Gasreserven und weil er sein Maskenglas nicht öffnete. Keller war in Schwierigkeiten, wahrscheinlich aufgrund des „High pressure nervous syndrome“ (HPNS), was zu Zeitverlust und falscher Manipulation der Kammer führte. Außerdem verlor ein Bereitschaftstaucher der US Navy sein Leben, als er versuchte die Kammertür in 60 m Tiefe zu schließen.

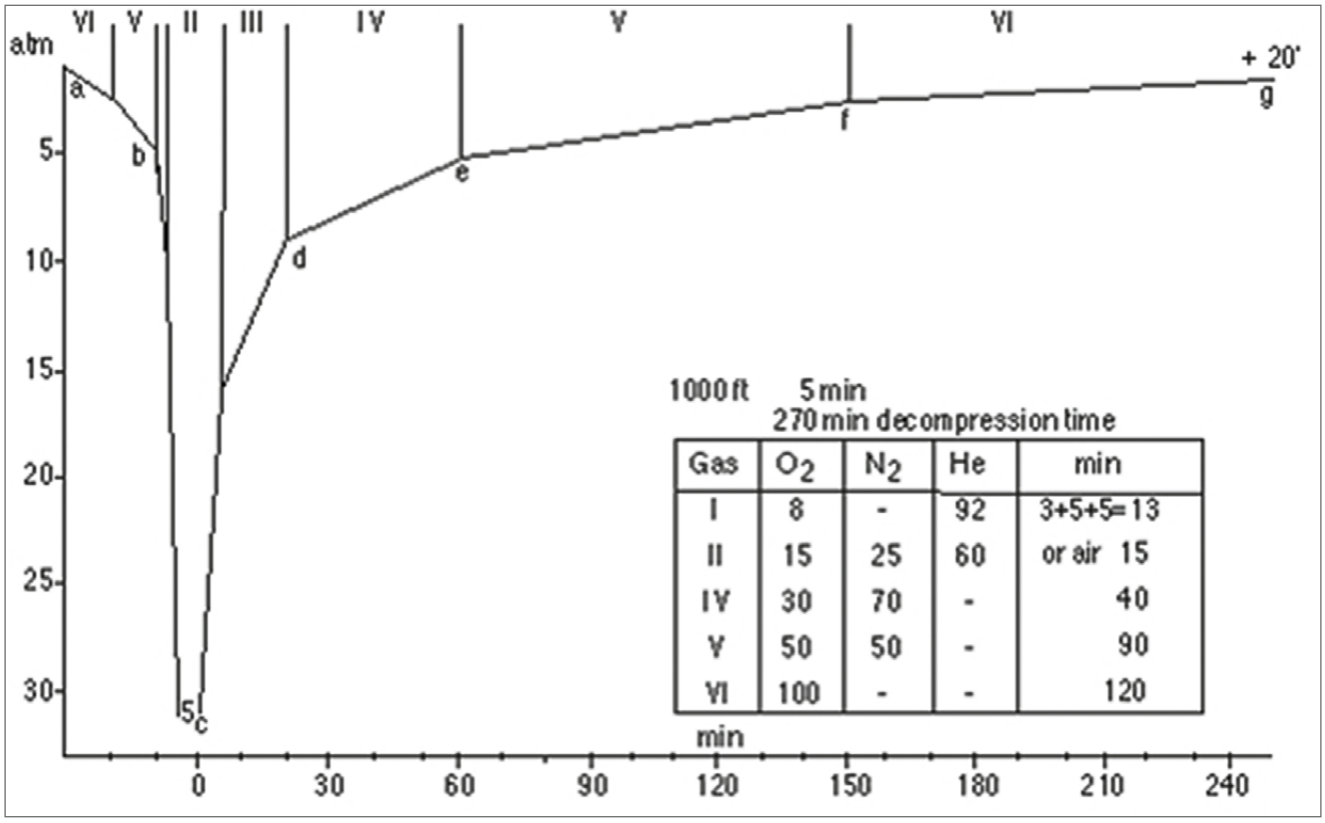


Abbildung 3
Kompressions- und Dekompressionsprofil und Gase, die für einen Tauchgang bis 300 m (1.000 ft) für 5 Minuten Grundzeit verwendet werden, zwei Probanden (Abbildung 6 in [1]).

Entwicklung von Dekompressionstabellen für Offshore-Taucharbeiten (1964-1981)

Basierend auf dem Erfolg der Tieftauchversuche unterzeichnete Shell Oil International einen Forschungsvertrag mit dem Zürcher Team zur Entwicklung von Tieftauchverfahren, die für den Tauchbetrieb auf dem Kontinentalschelf eingesetzt werden können. So wurde die Tauchglocke "Atlantis", ergänzt durch ein "Transfer under pressure-Modul" und eine abnehmbare Monoplace-Einheit, in ein 4 ATA Experimentier-Habitat verwandelt.
Die Anwendung des bisher verwendeten Algorithmus zur Berechnung der "Deep Bounce Dives" wurde nun auf längere Bodenzeiten bis zur Sättigung in 30 m Simulationstauchgängen getestet. Dies zeigte, dass viel längere Halbzeiten benötigt wurden (8 Stunden oder 480 Minuten für N_2 und 3 Stunden oder 180 Minuten für He, unter Verwendung des Multi-Gewebsmodells). 99% Sättigung wurde nach 64 Stunden (N_2) bzw. 24 Stunden (He) erreicht [2].
Die daraus resultierenden Langzeit- und Sättigungs-Dekompressionstabellen wurden viele Jahre lang bei der Tauchfirma Micoperi oder später SSOS (einer Shell-Tochtergesellschaft) eingesetzt. In den anschließenden Versuchsreihen wurden die sicheren Dekompressionsgrenzen für tiefere Tauchgänge bis etwa 200 m mit den Erfahrungen der frühen Pioniertauchgänge getestet. Diese Tauchgänge zeigten, dass alle Vorteile der ultraschnellen Kompression und mehrerer Gaswechsel verloren gingen, wenn die Bodenzeit erhöht wurde. Eine neue 100 bar Kammer (s. Abbildung 4), ein von Benno Schenk entworfener Komplex, ermöglichte Simulationen in wesentlich grösseren Tiefen.
Obwohl während der Pionierserie HPNS nie beobachtet wurde, zeigten die etwas längeren und tieferen Tauchgänge nun Zittern und andere Symptome. So war beispielsweise der 500-m-Experiment-Tauchgang von 1977 mit Heliox kein Erfolg, da die Probanden (Taucher) stark unter HPNS litten und ihre Dekompression aufgrund von Dekompressionskrankheit (DCS) modifiziert werden musste.
Danach wurde die stufenweise Kompression mit

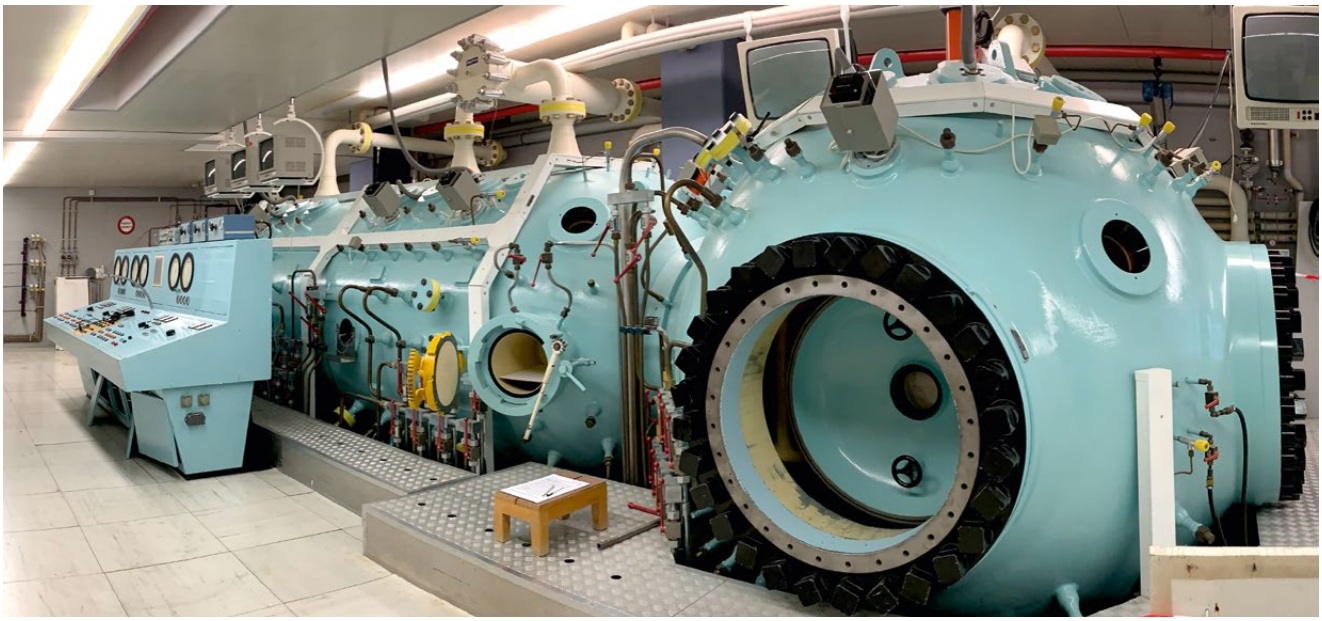


Abbildung 4
Die dreigeteilte Forschungskammer an der Universität Zürich (Foto Wilhelm Welslau).

Tabelle1

TABLE 1

OCCURRENCE OF HPNS WITH VARIOUS COMPRESSION PROCEDURES

A. Continuous compression, increasing with depth

215 m	in 3‘	(20-50 m/‘↓)	O_2-N_2-He	**HPNS -**	(n=2, 1961)
250 m	in 5‘,10‘	(20-50 m/‘↓)	O_2-N_2-He	**HPNS -**	(n=3, 1960/62)
300 m	in 16‘	(20-50 m/‘↓)	O_2-N_2-He	**HPNS (+)**	(n=5, 1961/62)

B. Continuous compression, constant

220 m	in 22‘	(10 m/‘↓)	O_2-He	**HPNS -**	(n=16, 1965-68)
250 m	in 25‘	(10 m/‘↓)	O_2-He	**HPNS +**	(n=11, 1967-80)
300 m	in 30‘	(10 m/‘↓)	O_2-He	**HPNS +**	(n=30, 1967-80)
350 m	in 35‘	(10 m/‘↓)	O_2-He	**HPNS ++**	(n= 6, 1977)
500 m	in 50‘	(10 m/‘↓)	O_2-He	**HPNS +++**	(n= 3, 1977)

C. Staged compression, continuous compression rate

300 m	in 155‘	(10 m/‘↓)	O_2-He	**HPNS (+)**	(n=6, 1978)
350 m	in 325‘	(4 m/‘↓)	O_2-He	**HPNS -**	(n=3, 1969)
400 m	in 255‘	(10 m/‘↓)	O_2-He	**HPNS ++**	(n=3, 1979)
400 m	in 415‘	(10 m/‘↓)	O_2-He	**HPNS -**	(n=3, 1981)
500 m	in 700‘	(10 m/‘↓)	O_2-He	**HPNS +**	(n=3, 1981)

© A. Bühlmann 1993, Tauchmedizin

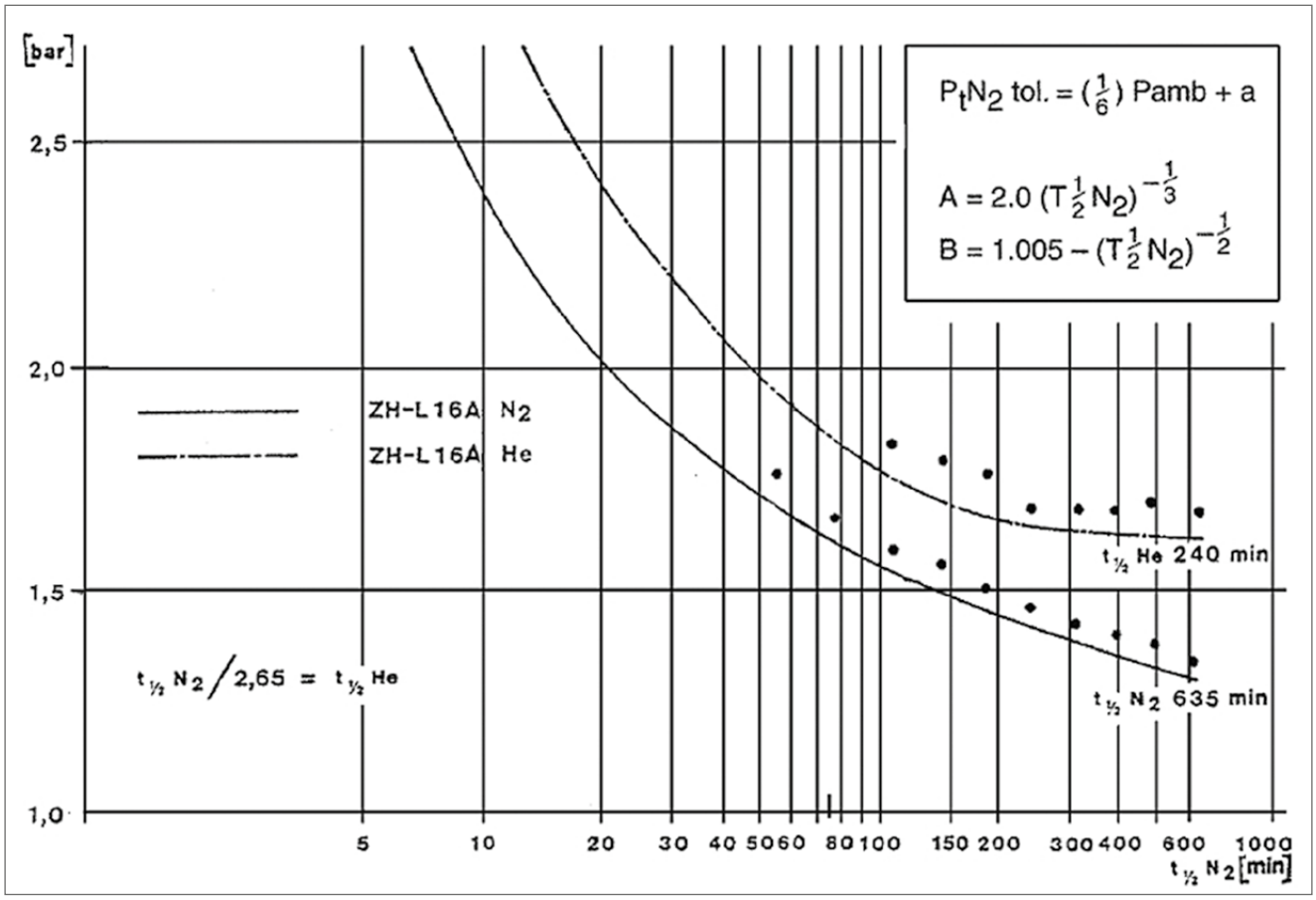


Abbildung 5
Bühlmanns theoretisch maximal tolerierbare Partialdrücke, bei Rückkehr auf 1 bar nach Druckeinwirkung, berechnet für verschiedene Gewebe. Die experimentell ermittelten Grenzen werden durch Punkte dargestellt, die jeweils das Auftreten von Dekompressionskrankheitssymptomen repräsentieren (aus Bühlmann AA. Tauchmedizin (ISBN 3-540-540-58970-8) 1993).

guten Ergebnissen eingeführt. Ein 575 m Druckkammertauchgang wurde 1981 erfolgreich durchgeführt, allerdings mit leichtem HPNS eines Tauchers und reduzierter Arbeitsleistung bei maximalem Druck (s. Tabelle 1). Die Dekompressions-Experimente von bis zu 300 m führten zu neu berechneten Tabellen mit einem Modell und Algorithmus, der im Folgenden erläutert wird.Die Tauchunternehmen fanden es jedoch unakzeptabel, mit dem Sicherheitsniveau der Bühlmann-Tabellen zu arbeiten und modifizierten die Dekompressionsverfahren auf empirischer Basis. Bühlmann war jedoch davon überzeugt, dass sein Algorithmus (der dem Workman-Modell ähnelt) die physiologischen Prozesse während eines Tauchgangs korrekt widerspiegelt, da der Algorithmus, nachdem er experimentell erfolgreich anwendbar war, auch physiologisch korrekt sein "musste". Diese Haltung, welche die Tauchindustrie nicht immer zu schätzen wusste, und das schwindende Interesse von Shell am Tieftauchen waren die Gründe für die fast vollständige Nicht-Veröffentlichung der Zürcher Ergebnisse der experimentellen Tauchgänge in dieser Zeit.

Die Höhen-Tauchtabellen für SCUBA-Taucher (1972-1986)

Trotz der bescheidenen Anerkennung der Ideen von Bühlmann durch die Tieftauchindustrie wurde der von Bühlmann und Schenk vorgeschlagene Algorithmus von der Sporttauchergemeinde angenommen. Bis 1971, als Computer mehr Rechenleistung boten, wurde die Anzahl der "Gewebe" (oder besser gesagt der Halbwertszeiten) auf 16 erhöht. Die längste Gewebe-Halbwertszeit für N_2 betrug 635 Minuten

(knapp 11 Stunden). Bühlmann postulierte, dass es bei der Verwendung linearer und nicht exponentieller Funktionen ausreicht, das Molekulargewicht eines Gases zu kennen, um die a- und b-Werte der Gleichungen abzuleiten [3]. Diese beiden Parameter beschreiben die tolerierte Übersättigung als Funktion des Umgebungsdrucks pro Gewebe, dargestellt durch seine Halbzeit. Abbildung 5 zeigt Bühlmanns theoretisch maximal tolerierbare Partialdrücke bei Rückkehr auf 1 bar nach Überdruckexposition, berechnet für verschiedene Gewebehalbwertszeiten. Die experimentell ermittelten Grenzen werden durch Punkte dargestellt, die jeweils das Auftreten von Dekompressionskrankheitssymptomen darstellen.
Mit dieser Formel war es einfach, ein bestimmtes experimentelles Tauchprofil mit einem tragbaren Taschenrechner zu ändern. Es wurden Validierungsexperimente in verschiedenen Höhen durchgeführt. Die Reduzierung der Dekompressionsstopps, um einen Anstieg des Dekompressionsstresses um etwa 10% zu bewirken, führte zu einer Reihe von experimentellen Tauchgängen mit einer Inzidenz von 30% DCS (diese wurden sofort behandelt).
Diese Studien wurden von den Tauchern der Schweizer Armee und der Polizei unterstützt. Extreme Bergsee-Validierungstauchgänge auf 3.800 m (Titicacasee) und 4.780 m (Mount Kenya, siehe Abbildung 6) bewiesen die akzeptablen Sicherheitsgrenzwerte unter diesen besonderen Bedingungen [4,5].
Die Ergebnisse bestätigten die berechneten Sicherheitsgrenzwerte und unterstützten das allgemeine Modell weiter. Bühlmanns Hypothese war, dass der Algorithmus universell einsetzbar war, da er sich bei Tauchverfahren mit Helium, Luft, Mischgasen für Tief- und Sättigungstauchgänge als durchgängig erfolgreich erwiesen hatte.
Sporttaucher haben die Tabellen in verschiedenen Formen erfolgreich eingesetzt und in der Schweiz war auch die Dekompression von Tunnelarbeitern mit Hilfe von durch die Behörden bestellten Tabellen erfolgreich, die für die jeweilige Höhe der Baustelle berechnet wurden.

Unterstützung bei der Entwicklung von Tauchcomputern (1983-1993)

Als die ersten Tauchcomputer auftauchten, wurde Bühlmann gebeten, bei der Entwicklung eines Programms mit dem Zürcher Algorithmus mitzuwirken. Er hatte noch nie getaucht und hielt Freizeittaucher für tollkühn. Zuerst weigerte er sich, weil er die Begeisterung der Sporttaucher für das Tauchen nicht

Abbildung 6
Walter Keusen bei einem Höhentauchgang auf 4.780 m Höhe am Mt Kenia (Foto Archiv J. Wendling).

verstehen konnte, als es immer mehr Tauchunfälle in Schweizer Seen gab.
Schließlich nahm er die Einladung an, da er erkannte, dass Taucher ohnehin Computer benutzen würden, so dass sie auch einen validierten Algorithmus mit seiner erhöhten Sicherheit verwenden könnten. Er fand auch Freizeittaucher als Forschungsteilnehmer für die Echtzeit-Simulation des Gewebepartialdrucks von Gasen interessant, um eine weitere Validierung seines Algorithmus zu erhalten.
Für Computer wurden die Tabellen an die spezifischen Eigenschaften der Hard- und Software angepasst und die Koeffizienten um die entsprechenden Korrekturfaktoren ergänzt. Tauchcomputer sind mittlerweile in Europa sehr beliebt und die DAN-Unfallstatistik zeigt keinen Anstieg der DCS-Inzidenz bei Computernutzern.

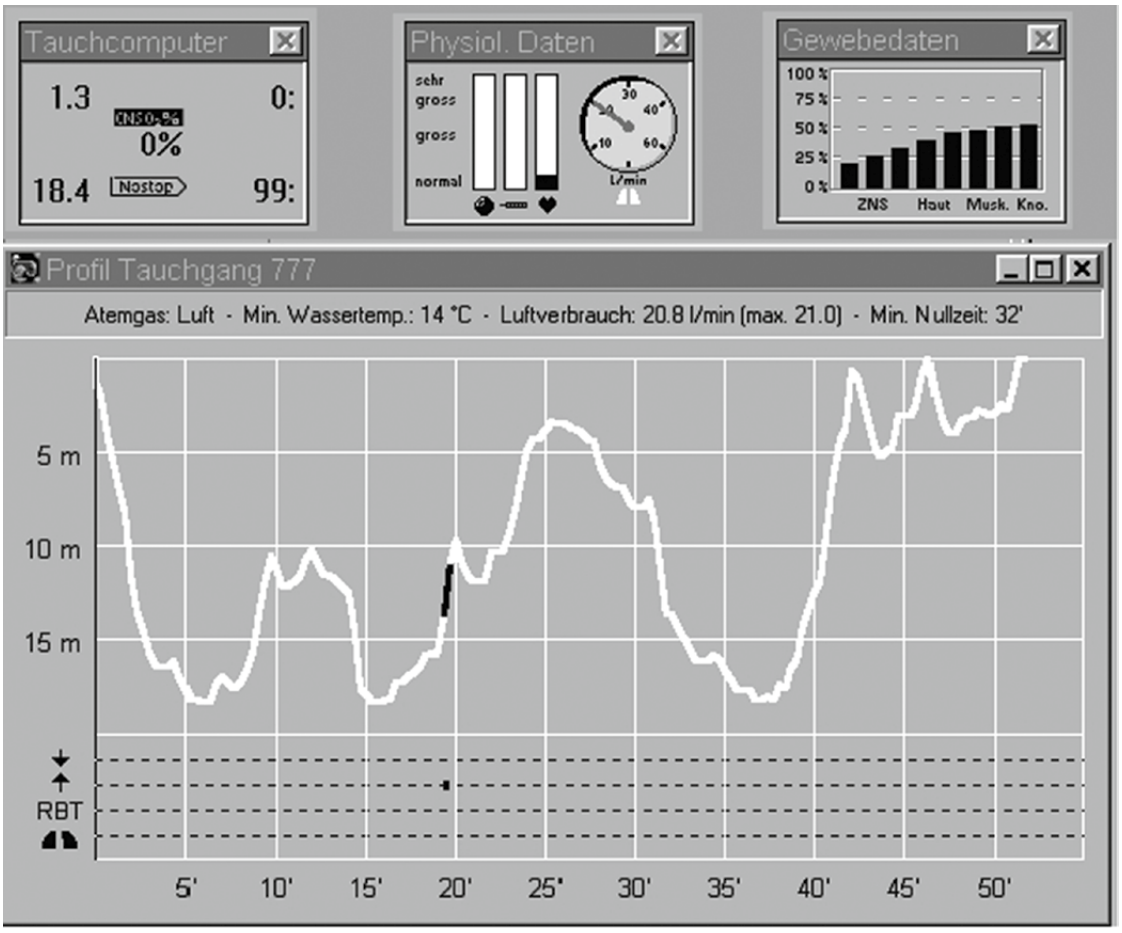


Abbildung 7
Die Grafik (Screenshot) zeigt das Zeit-/Tiefenprofil des Tauchgangs 777, das von einem Aladin Air X Tauchcomputer aufgenommen wurde. Der schwarze Teil des Profils war, als der Taucher zu schnell auftauchte. Unterhalb der Grafik befinden sich vier gestrichelte Linien: Die Schnellaufstiegswarnung (Pfeil nach oben), die Deco-Tiefenverletzungs-Warnung (Pfeil nach unten, der Alarm für unzureichende Restluft, um eine angemessene Dekompression (RBT) zu ermöglichen, und der Hyperventilationsalarm. (Umriss von Herz und Lunge). Die drei kleinen Kästchen oben zeigen die Berechnungen des Tauchcomputers an der Position des Cursors auf dem Profil. Im ersten, oben links, wird der maximale Sauerstoffpartialdruck angezeigt, CNS O2% als Sauerstofftoxizitätseinheiten und die Tauchzeit. Unten links die maximale Tiefe und die verbleibende Nullzeit. In der zweiten Box die erste Spalte, mit einer symbolischen Blase darunter, zeigt die stimulierte Veränderung der Gewebedurchblutung durch arterielle Blasen der Lunge (venöse Blasendurchgang), intraarterieller oder aus Geweben, die zweite Säule, mit einem symbolischen Thermometer darunter, zeigt die erwartete temperaturinduzierte Erhöhung der Halbwertszeiten und die dritte Säule, über einem symbolischen Herz, zeigt die geschätzte Veränderung der Gewebedurchblutung aufgrund des erhöhten Herzzeitvolumens (berechnet aus der Atemfrequenz und Minutenvolumen). Das Zifferblatt mit der symbolischen Lunge darunter zeigt das aktuelle Minutenvolumen an. Das dritte Feld zeigt die Sättigung von acht theoretischen Geweben, definiert durch ihre Halbwertszeiten, im Moment entsprechend der Position des Kursors auf dem Profil. In diesem Fall beträgt die N_2-Sättigung für Hirn 25%, für die Haut 40%, für Muskel etwa 48% und für Knochen 50% der tolerierten Übersättigung. (aus Bühlmann AA. Tauchmedizin (ISBN 3-540-540-58970-8) 1993)

Der nächste Schritt war die Untersuchung der kumulativen Auswirkungen von JoJo- und Multi level-Tauchen und Fliegen nach dem Tauchen. Bühlmann unterstützte die Ideen von Ernst Völlm, einem Software-Spezialisten und Tauchlehrer, der den Tauchcomputer in einen interaktiven Monitor mit verschiedenen ökologischen und physiologischen Parametern umwandeln wollte. Das adaptive Modell ZH16 war geboren. Es wird beeinflusst durch die Arbeitsbelastung des Tauchers, die (angenommene) Anzahl der arteriellen Blasen und die Temperatur während des Tauchgangs. Muskelarbeit verändert vorübergehend die Halbzeit dieses "Gewebes", was zu einer höheren Gasbelastung führt. Blasen verlangsamen die Ausscheidung von Stickstoff in der Lunge. Dies wird durch die Annahme des Beginns der Blasenproduktion berücksichtigt, wenn der Übersättigungsgrad über dem Schwellenwert liegt. Die angewandte Korrektur ändert nicht den Halbzeit-Koeffizienten, sondern addiert vorübergehend einen Verzögerungsfaktor entsprechend der angenommenen Blasenmenge als Funktion der Zeit. Tauchprofile können in den PC übertragen und von den Tauchern sofort analysiert werden (s. Abbildung 7).

Die physiologischen Parameter werden von einem Sensor am Druckminderer erfasst und über ein Radiosignal an den Tauchcomputer gesendet. Auf die gleiche Weise wird der tatsächliche Sauerstoffgehalt von Mischgas-Kreislaufgeräten überwacht und dann so berechnet, dass eine Echtzeitberechnung der theoretischen Gasspannungen auch während eines Nitrox-Tauchgangs mit halb geschlossenen oder geschlossenen Systemen möglich ist. Die Tatsache, dass 90% der Schweizer Taucher und mehr als 80% der europäischen Taucher Tauchcomputer einsetzen, meist mit Bühlmann-Algorithmen, ohne mehr Unfälle zu verursachen, ist eine indirekte Validierung der verwendeten Algorithmen.

Fazit

Die Zürcher Forschungsgruppe ist nun Geschichte. Professor Bühlmann ist 1994 gestorben, Hannes Keller hat das Tauchen aufgegeben und ist Software-Spezialist geworden und ist nun wie Benno Schenk in den Ruhestand getreten. Die Kammer wurde von der Universität aufgegeben, weil nicht mehr im Fokus der Forschungsinteressen und weil auch für die rein klinische Anwendung für HBOT nicht geeignet.
Die ZHL-Forschungsgruppe bekam nie die verdiente internationale Anerkennung, konnte aber dennoch andere dazu anregen, über aktuelle Konzepte nachzudenken und neue zu definieren (Open Bell Bounce Dive-Techniken, Gradient Factors).
Die Tabellen sind die offiziellen Tauchtabellen zahlreicher Sporttauchverbände (CMAS-angeschlossene Tauchverbände in Deutschland, der Schweiz, Österreich, Irland und Portugal, British Sub-Aqua Club (BSAC) in England) und werden von NAUI International offiziell anerkannt. Die höhenangepassten Tabellen für Tunnelarbeiter werden immer noch oft nachgefragt. Die Entwicklung von Tauchcomputern profitiert immer mehr vom nicht perfekten, aber sehr praktischen Algorithmus, der epidemiologisch belegt weiterhin ein akzeptables Restrisiko bietet.

Danksagung

Wir danken allen, die zur Aufarbeitung der Zürcher Laborgeschichte beigetragen haben, insbesondere Herrn Th. Bühlmann, Prof. David Elliott, Max Hahn, Hannes Keller, Walter Keusen, Ernst Voellm und anderen.

Jürg Wendling

Literatur

1. Keller H and Bühlmann AA. Deep diving and short decompression by breathing mixed gases. J Appl Physiol 1965; 20 (6): 1267-1270

2. Bühlmann AA., Frei P and Keller H. Saturation and desaturation with N_2 and He at 4 atm. J Appl Physiol 1967; 23 (4): 458-462

3. Bühlmann AA. Die Berechnung der risikoarmen Dekompression. Schweiz med Wschr 1988; 118 (6):185-197

4. Böni M, Schibli R, Nussberger P and Bühlmann AA. Diving at diminished atmospheric pressure: air decompression tables for different altitudes. Undersea Biomed Res 1976; 3 (3): 189-193

5. Moody M. Report on Exercise Paddington Diamond, Lake Titicaca, Bolivia. 1987

Anzeige

DIVEMASTER

Das Fachmagazin für die Hydrosphäre

Kompetent und spannend

Print oder ePaper

... und für iPad, iPhone und Kindle
als Abo oder Einzelheft

www.divemaster.de

Verein Historisches Druckkammerlabor
Universitätsspital Zürich (DKL-USZ)

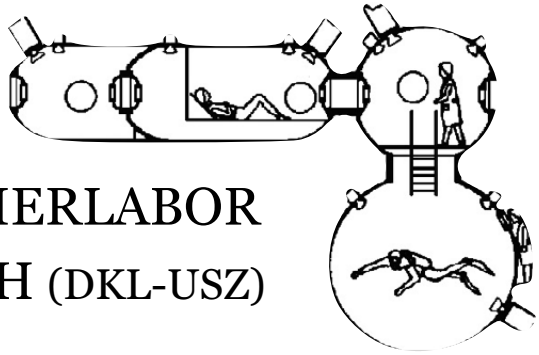
Autor/Referent

Dr. med. Christian Wölfel
Präsident

Verein DKL-USZ
Sekretariat
Frau Michèle Spahr
Lerchenweg 9
CH 2543 Lengnau

sekretariat@druckkammer.ch

Mitte der 70er Jahre des vergangenen Jahrhunderts gehörte die Forschungsdruckkammer am Universitätsspital Zürich zu den modernsten Einrichtungen ihrer Art. Sie löste eine Vorgängeranlage ab, die aus Teilen der Tauchglocke „Atlantis“ bestand, mit welcher Hannes Keller 1962 vor Santa Catalina Island, Kalifornien, den Freiwasser-Rekordtauchgang auf 300 m Tiefe aufstellte. Für längere Tieftauchsimulationen war diese Anlage viel zu klein. Vorbereitungstauchgänge für das Atlantis-Projekt mussten in ausländischen Druckkammern z.B. in Toulon, Frankreich, durchgeführt werden.
Erst das heute noch existierende Druckkammerlabor ermöglichte A. A. Bühlmann und seinem Team notwendige Forschungen um sichere Algorithmen für tiefe Routinetauchgänge zu entwickeln.
Die Planung und Konstruktion der Forschungsdruckkammer erfolgte durch den Ingenieur Benno Schenk. Die Struktur war bis 1.000 m Tauchtiefe ausgelegt. Darüber hinaus konnten hypobare Bedingungen entsprechend 10.000 m Höhe hergestellt werden. Die Anlage wurde grösstenteils in der Schweiz gefertigt.
Nachdem für Bühlmann Anfang der 80er Jahre keine Notwendigkeit mehr bestand, Tieftauchgänge zu simulieren, wurde die Kammer für andere Forschungsprojekte sowie zur HBO-Therapie verwendet.
2005 wurde der Betrieb endgültig eingestellt. Eine Wiederinbetriebnahme kam nie ernsthaft in Betracht, schon weil die Anlagen nicht mehr dem Stand der Technik entsprachen und aufwändige Anpassungen notwendig gewesen wären. Vielmehr wurden essentielle Teile demontiert und verkauft. Der eigentliche Kammerkomplex kann erst entfernt werden, wenn der gesamte Gebäudekomplex, in dessen Untergeschoss sich das Druckkammerlabor befindet, abgerissen wird. Dieser Tatsache ist es zu verdanken, dass die Kammer bisher nicht verschrottet wurde.

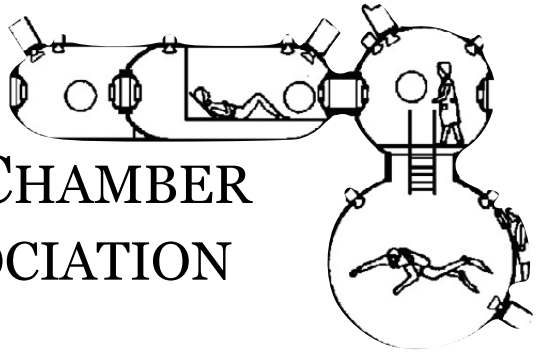


VEREIN
HISTORISCHES DRUCKKAMMERLABOR
UNIVERSITÄTSSPITAL ZÜRICH (DKL-USZ)

Mitgliedschaftsantrag

Hiermit beantrage ich die Mitgliedschaft beim DKL-USZ

Name, Vorname	
Geschlecht	**Korrespondenzsprache**
Weiblich ☐ Männlich ☐	Englisch ☐ Französisch ☐ Deutsch ☐
Titel	**Spezialität**
Strasse, Nummer	
PLZ	**Ort**
Land	
E-Mail	
Alternative E-Mail-Adresse	
Phone/Fax *(nicht obligatorisch)*	
Mitgliedschaft	
Basic (CHF **20.-** pro Jahr) ☐	Sponsor-Mitglied ☐ CHF _____ pro Jahr (Mindestbeitrag CHF **200.-** pro Jahr) Ich möchte, dass mein Name unter „Gönner“ auf der Homepage www.druckkammer.ch veröffentlicht wird ja ☐ nein ☐
Ort, Datum	**Unterschrift**



HISTORICAL HYPERBARIC CHAMBER LABORATORY ZURICH ASSOCIATION
(DKL-ZH)

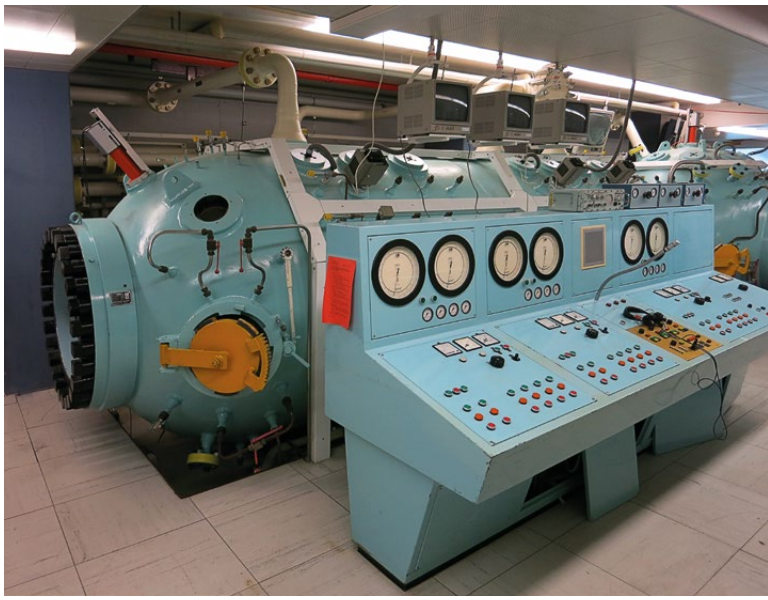
Membership Application

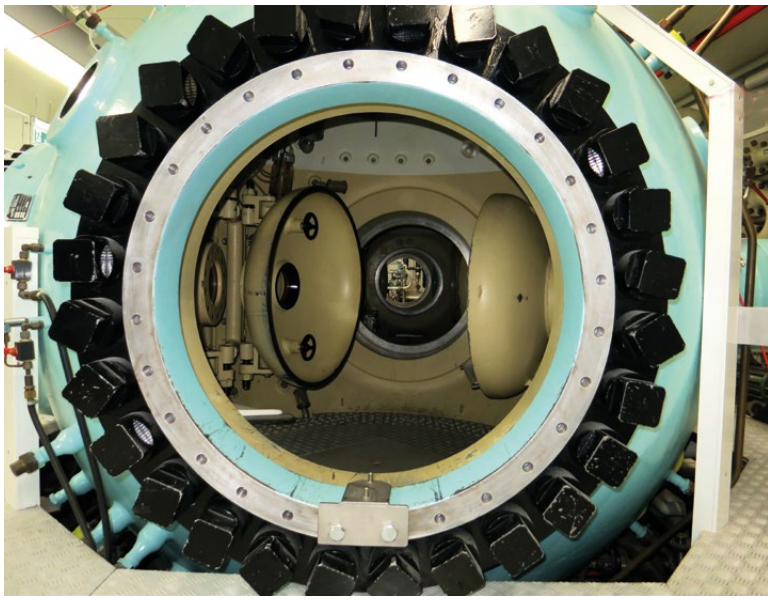
Hereby I apply for DKL-ZH Membership

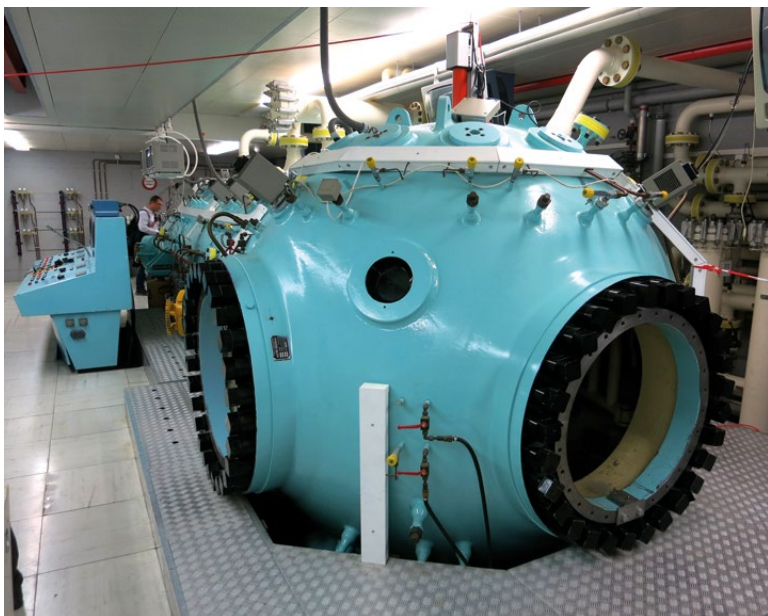
Name, Surname	
Gender Female ☐ Male ☐	Language for Correspondence English ☐ French ☐ German ☐
Title	Speciality
Street, Number	
ZIP	City
Country	
eMail	
alternate eMail	
Phone/Fax *(not compulsory)*	
Membership	
Basic (CHF **20,-** per year) ☐	Sponsoring Member ☐ CHF _____ per year (minimal amount CHF **200,-** per year) I want my name to be published under "Sponsors" on the website www.druckkammer.ch yes ☐ no☐
Place, Date	Signature

2016 gründeten Taucher und Tauchärzte zusammen den „Verein Historisches Druckkammerlabor Universitätsspital Zürich (DKL-USZ)“, der sich zum Ziel gesetzt hat, dieses eindrucksvolle medizinhistorische wie technikgeschichtliche Denkmal zu erhalten. Es soll Kernstück einer Ausstellung über die tauchmedizinische Forschung in der Schweiz werden. Am angestammten Standort steht das DKL einem Neubau im Weg, so dass die Anlage an einen geeigneten Ort transportiert werden muss.
Nur wenn zum Zeitpunkt des Abrisses genügend finanzielle Mittel bereit stehen um den Umzug zu finanzieren, besteht eine Chance das DKL vor der Verschrottung zu bewahren.
Bitte helfen Sie mit, dieses einmalige europäische Monument der Tauchmedizin zu erhalten. Spenden nehmen wir gerne entgegen, noch mehr freuen wir uns über neue Mitglieder. Eine Mitgliedschaft ist ab einem Jahresbeitrag von CHF 20.- (€ 18,-) möglich. Sponsor-Mitglieder (ab CHF 200,-/€ 180,- im Jahr) werden namentlich auf der Vereinshomepage www.druckkammer.ch erwähnt. Es können auch Organisationen und Verbände Mitglieder werden.
Einen Aufnahmeeintrag finden Sie in diesem Caisson auf Seite 39 und 40 oder auf der Homepage.

Christian Wölfel







Abbildungen 1 -3
Die stillgelegte Druckkammer des Druckkammerlabors im Universitätsspital Zürich in ihrem heutigen Zustand (Fotos Wilhelm Welslau)

500 m Tieftauchsimulationen im Druckkammerlabor Zürich

Autor/Referent

Dr. med. Christian Wölfel
Präsident

Verein DKL-USZ
Sekretariat
Frau Michèle Spahr
Lerchenweg 9
CH 2543 Lengnau

sekretariat@druckkammer.ch

Abbildung 1
(Seite 41 oben)
Funktions-Übersicht der Installationen im Druckkammerlabor des Universitätsklinikums Zürich 1973 (Abbildung Archiv Benno Schenk)

Abbildung 2
(Seite 41 unten)
Technische Daten der Druckkammer im Druckkammerlabor des Universitätsklinikums Zürich 1973 (Abbildung Archiv Benno Schenk)

Am Beginn der tauchmedizinischen Forschung bestand das von Hannes Keller gesetzte Ziel, 300 Meter Tiefe zu erreichen und durch den Einsatz geeigneter Gasgemische und innovativer Kalkulationsmodelle die Dekompressionszeit im Vergleich zu den bestehenden Verfahren massiv zu verkürzen. Der Erfolg dieser Versuche lag im unbeschadeten Auftauchen nach dem blossen Erreichen der Tiefe unter Umsetzung des berechneten Dekompressionsverfahrens, ohne dass dabei eine zum Ausführen von Arbeiten ausreichende Grundzeit angestrebt wurde. Nachdem die grundlegende Anwendbarkeit und Sicherheit des Konzeptes mit Tauchgängen auf 131 m (1959), 220 m (1962) und schliesslich 313 m (1962) jeweils im Freiwasser bewiesen worden war, schloss der Mineralölkonzern Shell mit Hannes Keller und Albert A. Bühlmann 1963 einen Forschungsvertrag, in dem unter anderem "...die Entwicklung kommerziell anwendbarer Verfahren, Techniken und Ausrüstungen, die es freien Tauchern ermöglichen, in Wassertiefen von bis zu 700 (Metern) sicher und effektiv zu gelangen und zu arbeiten“ („...the development of commercially applicable procedures, techniques and equipment to enable free divers to reach and work safely and effectively at water depths of up to 700 (meters))“ [1] als Ziel definiert wurde.

Bis zur Inbetriebnahme des im Rahmen dieses Forschungsvertrages zu einem grossen Teil von Shell finanzierten Druckkammerlabors 1973 fanden die nötigen Druckkammerversuche in einer Druckkammeranlage statt, deren Struktur hauptsächlich aus dem Material, das für den Tieftauchgang an der Insel Santa Catalina vor der kalifornischen Küste 1962 Einsatz gefunden hatte, bestand. Beide Anlagen waren in den Räumen des Universitätspitals Zürich untergebracht, die von 1973 besteht dort noch in einem nicht betriebsfähigen Zustand und ist akut von der Verschrottung bedroht.

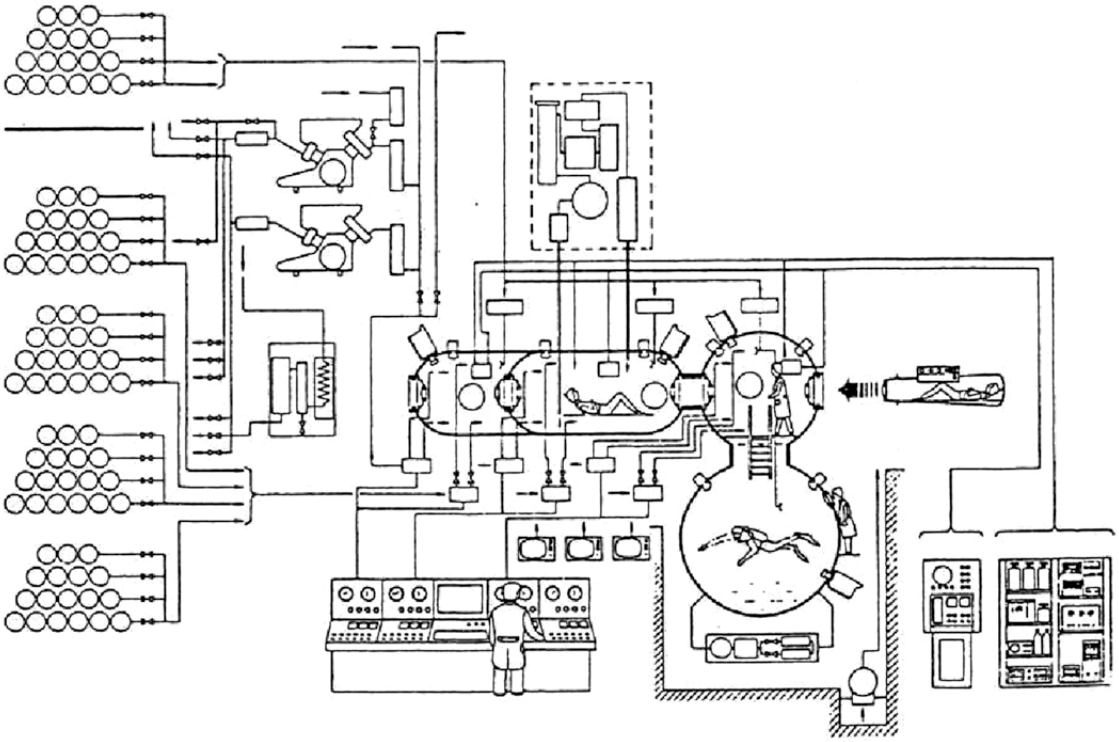


Fig. 1: Schematische Darstellung des Druckkammersystems

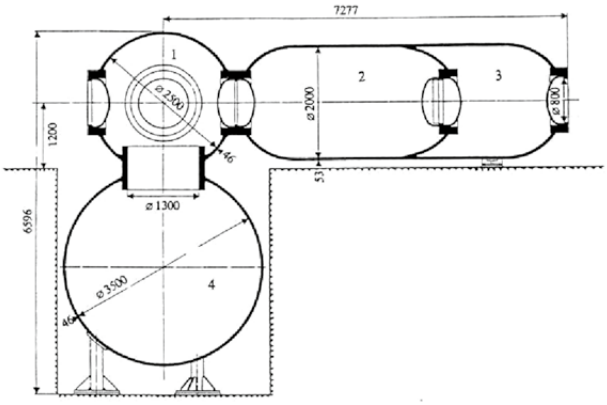


Fig. 2: Abmessungen der Druckkammer

DRUCKBEREICH:	in allen Kammern 0.25 - 100 bar			
ABMESSUNGEN:	Kammer 1	Kammer 2	Kammer 3	Wassertank
Durchmesser	2.5 m	2.0 m	2.0 m	3.5 m
innere Länge	-	3.2 m	1.6 m	-
Luken Ø	0.8 m	0.8 m	0.8 m	1.3 m
Volumen	8.0 m^3	10.0 m^3	6.5 m^3	22.0 m^3
LIFE SUPPORT SYSTEM (LSS): Betriebsbereich				
Temperatur (°C)	+15 - +45	+15 - +45	+15 - +45	+4 - +45
Luftfeuchtigkeit	30 - 100%	30 - 100%	30 - 100%	-
FUELLGAS KAMMER:	reiner Sauerstoff, Helium, Luft, oder andere			
ATEMGAS MASKEN:	reiner Sauerstoff, Helium, Luft, oder andere			
MAXIMALE DRUCKAENDERUNG:	bis 20 bar/min möglich			
PERSONENSCHLEUSEN:	Kammer 1 und Kammer 3			
MATERIALSCHLEUSEN:	von aussen nach Kammer 1, 2, und 3			
KOPPLUNGSMOEGLICHKEIT FUER TRANSPORTABLE DRUCKKAMMERN:	an Kammer 1 anzukoppeln			

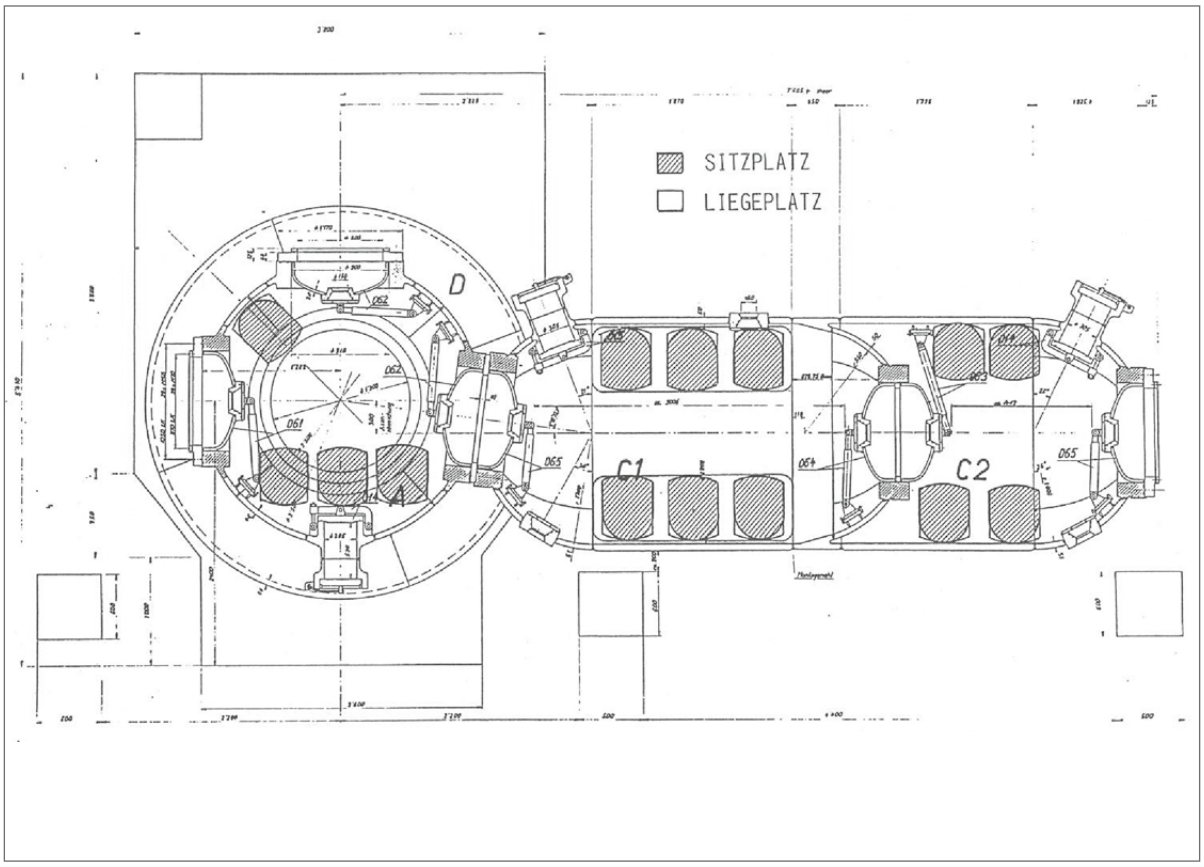


Abbildung 3
Detail-Ausstattung der Druckkammer im Druckkammerlabor des Universitätsklinikums Zürich 1973 (Abbildung Archiv Benno Schenk)

An Zentren in Grossbritannien, Frankreich, den USA und Norwegen wurden in etwa zur gleichen Zeit (1970 bis 1981) Tauchgangssimulationen auf 450 m bis 600 m Tiefe durchgeführt.
Es gab also genug Gelegenheit zu beobachten, dass es in grösseren Tiefen zu neurologischen Symptomen kommen kann, die nicht durch Dekompression erklärt werden konnten, da sie ohne Druckabfall auftraten, letzterer sie vielmehr zu verbessern vermochte.
Für diese neurologischen Beeinträchtigungen, die stark mit der Arbeitsleistung unter hyperbaren Bedingungen interferierten, sie in schweren Ausprägungen sogar vollständig verunmöglichten, führten Fructus und Brauer 1969 den Begriff „Le syndrome nerveux des haute pressions“ [2] ein, welcher als englischsprachiges Akronym „HPNS“ Einzug in die hyperbarmedizinische Fachsprache fand.
Die Erfahrungen, die Bühlmann während der frühen Tieftauchversuche machte, liessen ihn der Existenz dieser Entität zunächst skeptisch gegenüberstehen. Während die frühen Zürcher Tieftauchversuche auf 200 m bis 300 m durch die Verwendung von Trimix, der Akzeptanz vergleichsweise hoher Sauerstoffpartialdrücke, kurzen Grundzeiten und rapider Kompression gekennzeichnet waren, reproduzierten die oben erwähnten Tieftauchsimulationen im Ausland und zuletzt auch in Zürich zwischen 1970 und 1979 auf 450 m bis 600 m zuverlässig schwere HPNS-Symptome mit zögerlicher Rückbildung nach Druckreduktion. Dies weckte bei Bühlmann ein grosses Interesse am HPNS.
In seinen Untersuchungen grenzte er klar schwere Symptome, die zu einer Leistungsbeeinträchtigung

führten, von leichten ab und studierte den zeitlichen Verlauf deren Entwicklung und Rückbildung mit dem Ziel, das Auftreten relevanter Beeinträchtigungen durch geeignete Verfahren zu verhindern.
1977 wurden zwei Druckkammertauchgänge auf 350 m und ein weiterer auf 500 m durchgeführt. Nach der linearen Kompression mit einer Rate von 10 m pro Minute und einer Latenzzeit von 30 bis 60 Minuten litten zwei von drei Probanden unter einem mittelschweren bis schweren HPNS.
Während amerikanische und französische Gruppen mit Akklimatisierungstagen auf 150 m bis 200 m Tiefe arbeiteten um Tiefen von 500 m und 600 m zu erreichen und Bennett einen Stickstoffanteil von 5% statt reinem Heliox propagierte, lag Bühlmanns Ansatz in der Annahme einer Kompressionshalbwertzeit für Helium und einer tolerierten Partialdruckdifferenz, die die Berechnung von Kompressionsstufen ermöglichte - eine gewisse Parallelität zum Sättigungsmodell für die Dekompression ist dabei offensichtlich.
Zwar mussten die sehr raschen Kompressionsraten der Freiwasserversuche verlassen werden um lange Grundzeiten ohne die Arbeitsleistung zu stark vermindernde HPNS-Symptome zu ermöglichen, aber unter der Annahme einer tolerierten Heliumpartialdruckdifferenz zwischen Atemgas und Körpergeweben von weniger als 15 bar in Geweben mit einer Halbsättigungszeit für Helium von weniger als 90 Minuten und einer tolerierten Partialdruckdifferenz von weniger als 20 bar für solche mit mehr als 90 Minuten Halbsättigungszeit, gelang es die benötigten Gesamtzeiten für einen Tieftauchgang, die bei den Versuchen in Frankreich und den USA bei 4 bis 6 Wochen lagen, auf der Kompressionsseite deutlich zu verkürzen. Dabei konnte auf eine Stickstoffbeimischung verzichtet werden. Zur gleichen Erkenntnis gelangte man 1981 auch in Norwegen.
Bühlmann sah angesichts der gewonnenen Erkenntnisse und der bewiesenen Anwendbarkeit seiner Dekompressions- und Kompressionsalgorithmen nach 1981 keine Notwendigkeit mehr dafür, Versuchspersonen den Risiken von Tieftauchsimulationen auszusetzen, da er bereits damals erkannte, dass der Einsatz unbemannter ferngesteuerter Maschinen (Remotely Operated Vehicles, ROVs) in Zukunft Tauchgänge in grosser Tiefe grösstenteils unnötig machen machen würde. Daher wurden nach dem 575m Tauchgang 1981 keine Tieftauchversuche in Zürich mehr unternommen, der Forschungsvertrag von 1963 lief schliesslich am 30.06.1981 aus [1].
Das Druckkammerlabor wurde weiter für hyper- und hypobarmedizinische Untersuchungen und zur hyperbaren Sauerstofftherapie genutzt, Bühlmann unterstützte die Adaptation seiner Algorithmen für Tauchen in hypobarer Umgebung („Bergseetabellen“, Höhenaufenthalte nach Tauchgängen) und für die Verwendung in Tauchcomputern. Mit dieser Zeit beschäftigen sich andere Referate im Rahmen des Bühlmann Symposiums.

Christian Wölfel

Quellen

1. Persönliche Mitteilung Dr. Thomas Bühlmann
2. Brauer RW, Dimov S, Fructus XR, Grosset R, Naquet R (1969) Syndrome neurologique et électrographique des hautes pressions. Rev Neurol (Paris) 121:264-268
3. Tauchmedizin (2) Herausgegeben von F. Gerstenbrand, E. Lorenzoni, K. Seemann. 2. Symposium für Tauchmedizin 23.10. - 24.10.81, Medizinische Hochschule Hannover. Schlütersche Verlangsanstalt
4. Tauchmedizin: Barotrauma, Gasembolie, Dekompression, Dekompressionskrankheit / A. A. Bühlmann. Unter Mitarb. von E. Völlm, 2., völlig überarb. und stark erw. Aufl., Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong; Barcelona: Springer, 1990

Fragen und Antworten zum 500 m Tauchgang im DKL 1977 - Interview mit Livio de Toffol

Autor/Referenten

Dr. med. Christian Wölfel

Verein DKL-USZ

Livio de Toffol

1977 Versuchsperson des DKL-UKZ
später Druckkammer-techniker des DKL-UKZ

Christian Wölfel: Danke Livio De Toffol, dass Sie sich Zeit genommen haben über den legendären Tieftauchversuch Rede und Antwort zu stehen.

Livio de Toffol: Gern geschehen

Wölfel: Erinnern Sie sich noch an den Tauchversuch?

de Toffol: Als ob es letzte Woche gewesen wäre, trotz der 42 Jahre, welche seither vergangen sind.

Wölfel: Wie waren denn die Selektion und Vorbereitung für dieses einmalige Unterfangen?

de Toffol: Im Vorfeld fanden verschiedene Tauchversuche statt. Der tiefste Versuch fand auf 350m statt, nur kurze Zeit, um die Tauchtauglichkeit zu testen. Ein Proband bestand die ‘’Prüfung’’ nicht, so kam ich in die engere Auswahl. Medizinische Tests und Ausdauertests fanden dann im Universitätsspital statt. Dann legte Prof. Bühlmann mit dem techn. Leiter Benno Schenk das Datum fest. Wir drei Mike Korienek, Peter Ita und ich, wurden aufgeboten. Dienstag wars, morgens um ca. 10 Uhr schloss sich die ‘’Tauchkapsel’’. Ein letzter Check von draussen. Es fanden sich dann auch Ärzte und andere Interessierte ein. Presse wurde ausgesperrt.

Wölfel: Was folgte dann?

de Toffol: Wir sassen in unseren weissen Overalls auf der Pritsche, zogen die Headsets an, gaben dann unsererseits das OK und es konnte losgehen. Letzte Anweisungen von Draussen, dass zuerst reiner Sauerstoff bis auf eine Tiefe von 10m einströmt. Kurzer Stopp, nochmals alles checken, Verständigung, Wohlbefinden, alles ok. Dann öffneten sich die ‘Schleusen’. Reines Helium strömte mit infernalischem Geräusch ein. Wir verstanden kein Wort mehr. Durch die Druckerhöhung wurde es ziemlich warm. Nächster Halt bei 100 m. Checks, Stahlkügeli-Test, in dieser Heliumatmosphäre war die Verständigung logischerweise schwierig. Ein spezielles Gerät, ein Scrambler, entwirrte offenbar unsere Mickey Mouse Sprache.

Anmerkung:
Beim "Stahlkügeli-Test" handelt es sich um eine Standarduntersuchung zur psychomotrischen Leistungsfähigkeit, Koordination und zum Tremor, die in den meisten HPNS-Versuchen in Zürich durchgeführt wurde. Dabei mussten kleine Stahlkügelchen mit einer Pinzette in ein Glasröhrchen gelegt werden.

Abbildungen 1 und 2
Livio de Toffol an der Druckkammer des DKL-UKZ (1977) und privat (2019) (Fotos Privatarchiv Livio de Toffol)

Wölfel: Ging es Ihnen allen gut?

de Toffol: Ja, keine Probleme, nur die Wärme und eben die Stimme. Im gleichen Maße und Tempo gings in die Tiefe, alle 100m ein Zwischenhalt für Tests. Dann, nach 50 Minuten (!) erreichten wir die 500 m-Marke.

Wölfel: Ging es Ihnen immer noch gut?

de Toffol: Nein, mir war schlecht, ich musste mich auf die Pritsche legen und die Augen geschlossen halten, weil sich alles um mich drehte.
Wölfel: Und die anderen beiden Kameraden?

de Toffol: Soweit ich mich erinnere, gings ihnen gut. Ob sie den Stahlkügeli-Test noch absolvierten, ist mir nicht mehr bekannt, da ich ja still auf dem Rücken lag. Der Aufenthalt auf 500m war nach Programm 8 Minuten. Dann gings wieder hoch.

Wölfel: Was geht einem so durch den Kopf bei dieser Tiefe und Uebelkeit?

de Toffol: Ich dachte nur noch, Schleusen auf, Wasser rein, mir ist alles egal... keine Todesangst, nur ein willenloses Dasein.

Wölfel: Wurden Sie auch verpflegt und wie?

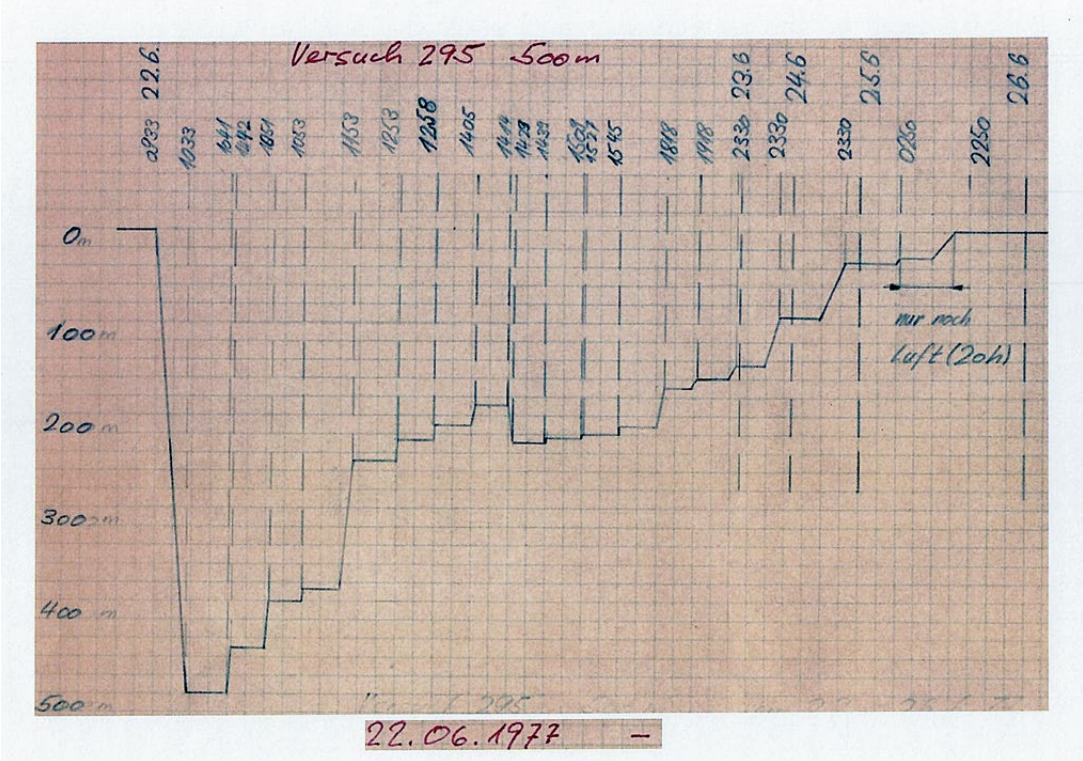
de Toffol: Auf welcher Tiefe weiss ich nicht mehr, aber eines weiss ich noch genau. Es gab so etwas wie Fruchtsalat und der schmeckte wie Styropor, nämlich nach gar nichts.

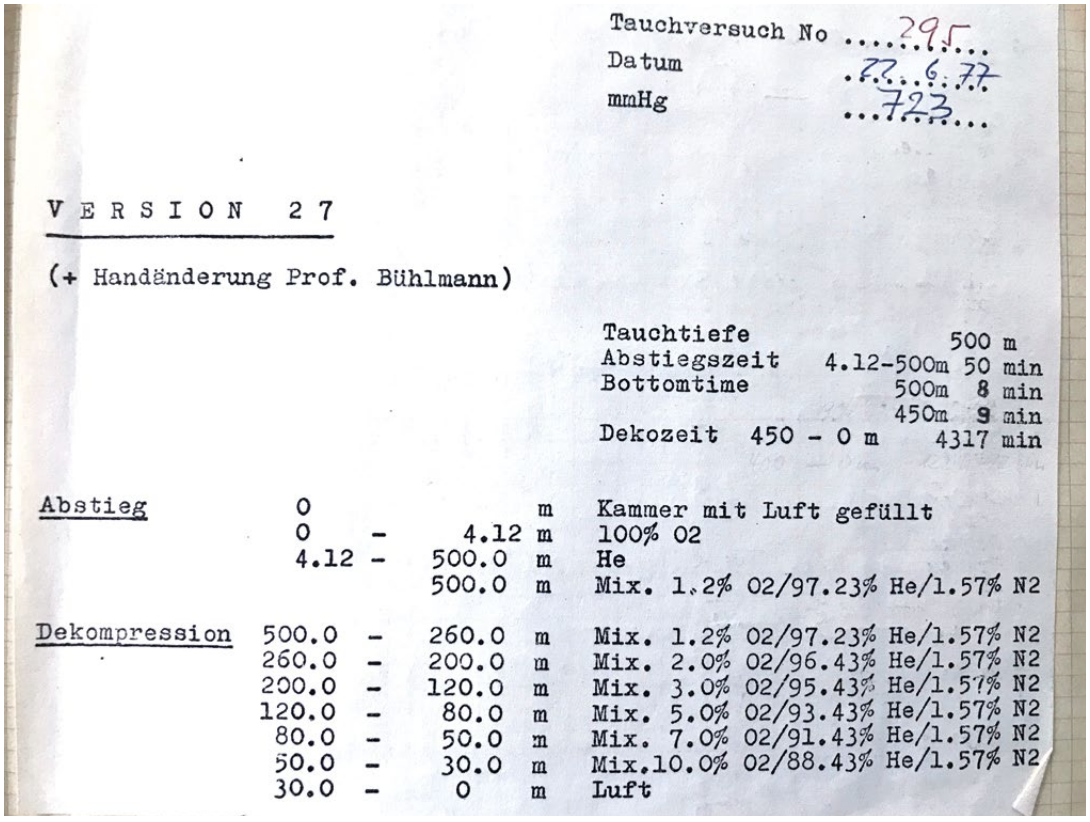
Wölfel: Wie war der Aufstieg?

de Toffol: Langsam, genau nach errechnetem Plan der Entsättigung. Die körperliche Belastung war dann wieder spürbar, wir zogen dicke Daunenjacken an, weil die Entspannungskälte ziemlich spürbar war.

Wölfel: Gab es auch Probleme beim Aufstieg?

de Toffol: So weit ich weiss, nur bei mir. Schwindel bei geöffneten Augen, deshalb lag ich auf der Pritsche, konnte aber alles von Draussen hören. Z.B. als Prof. Bühlmann am Guckloch stand und fragte, wie es mir geht. Ich hörte ihn, konnte aber nicht antworten. Dann sagte er ‘der De Toffol reagiert nicht mehr’.





Tauchversuch No ....295....
Datum ....22.6.77....
mmHg ....723....

VERSION 27

(+ Handänderung Prof. Bühlmann)

				Tauchtiefe 500 m
				Abstiegszeit 4.12-500m 50 min
				Bottomtime 500m 8 min
				450m 9 min
				Dekozeit 450 - 0 m 4317 min
Abstieg	0		m	Kammer mit Luft gefüllt
	0	- 4.12	m	100% 02
	4.12	- 500.0	m	He
		500.0	m	Mix. 1.2% 02/97.23% He/1.57% N2
Dekompression	500.0	- 260.0	m	Mix. 1.2% 02/97.23% He/1.57% N2
	260.0	- 200.0	m	Mix. 2.0% 02/96.43% He/1.57% N2
	200.0	- 120.0	m	Mix. 3.0% 02/95.43% He/1.57% N2
	120.0	- 80.0	m	Mix. 5.0% 02/93.43% He/1.57% N2
	80.0	- 50.0	m	Mix. 7.0% 02/91.43% He/1.57% N2
	50.0	- 30.0	m	Mix.10.0% 02/88.43% He/1.57% N2
	30.0	- 0	m	Luft

Abbildungen 3 und 4
Druck-Tiefen-Protokoll und Gas-Mischungs-Protokoll des 500 m-Versuchs im DKL-UKZ 1977 (Abb.3 Privatarchiv Livio de Toffol, Abb.4 Privatarchiv A.A. Bühlmann]

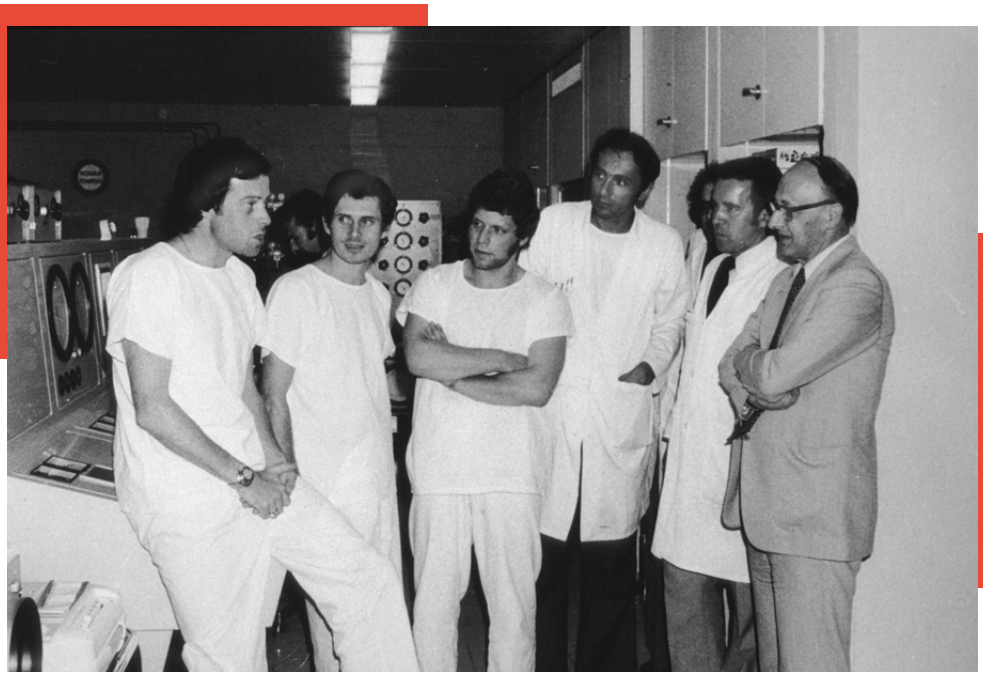


Abbildung 5
Versuchsmannschaft des 500 m-Versuchs im DKL-UKZ 1977 (li. Livio de Toffol, re. A.A. Bühlmann) (Fotos Privatarchiv Livio de Toffol)

Dann, um die Situation zu entspannen, drehte ich mich ganz langsam zum Guckloch, schlug ganz kurz die Augen auf und Prof. B war zufrieden.

Wölfel: Wurden dann Massnahmen getroffen?

de Toffol: Ja, es wurde rekomprimiert um ca. 50m und dann langsamer aufzusteigen. Die Symptome verschwanden dann auch.

Wölfel: Es verging bisher nicht einmal einen Tag. Und euch standen noch 4 Tage bevor. Wie erging es euch während diesem Eingesperrtsein? Nie Platzangst gehabt? Niemand ausgerastet?

de Toffol: Es ging uns ganz gut. Wir schliefen gut, trotz den Geräuschen, hatten Appetit, konnten uns bewegen, in der Mitte sogar stehen, und von draussen hatte B. Schenk ein gut durchdachtes ‘’Freizeit’’ Programm für uns ausgedacht. Jeder erhielt eine grosse Schachtel mit einem Modellauto, welches jeder zusammensetzen durfte. Die Plastikteile durften wir nicht leimen wegen der Dämpfe. Die gaben wir durch die Schleuse zur Bearbeitung nach draussen. So vergingen die Tage einigermassen geordnet und ruhig.

Wölfel: Wie und wann war der Ausstieg?

de Toffol: Am 5. Tag, spätabends ‘krochen’ wir aus unserer Stahlbehausung. Glücklich und heilfroh. Gratulationen hüben und drüben. Duschen, umziehen und dann in den Plattenhof zu einem Imbiss.

Wölfel: Hatte niemand Probleme?

de Toffol: Doch, ich spürte zu Hause Schmerzen im rechten Knie. Am anderen Morgen fuhr ich wieder ins DKL und Dr. Schärmeli und B. Schenk informierten mich zu möglichen Therapien. Rekompression oder Aspirin? Ich entschied mich für Aspirin und zu Hause waren die Schmerzen weg.
Ein einmaliges Erlebnis war's und musste noch verarbeitet werden.

Wölfel: Würden Sie nochmal so einen Versuch wagen?

de Toffol: Nie und nimmer.

Wölfel: Danke für das Interview

caisson
Vorstand der GTÜM - BG Unfallklinik Murnau
Prof. Küntscher-Straße 8 | 82418 Murnau
PVSt, Deutsche Post AG, Entgelt bezahlt, Z K Z 62369

Rekordversuch von Hannes Keller unter Mitwirkung von Albert A. Bühlmann auf 120 m Tiefe im Zürichsee am 21.11.1959. Näheres hierzu im Artikel von Dr. iur. Thomas A. Bühlmann auf Seite 8 ff. (Foto Archiv A. Bühlmann)