

**G u t a c h t e n**

**Über die**

**b i o m e c h a n i s c h e W i r k u n g**

**von**

**W a s s e r s t r a h l e n**

**aus**

**W a s s e r w e r f e r n**

**von**

**Karl Sellier**

## Inhaltsverzeichnis

### Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

1. Einleitung
2. Physikalische Messungen im Strahl
  - 2.1. Messungen mit Drucksonde kleinen Querschnitts
  - 2.2. Eigenschaften des Strahles aus Messungen mit der Drucksonde
  - 2.3. Konstruktion eines neuen Aufnehmers und Meßergebnisse
3. Wasserstrahl und biomechanische Toleranz
  - 3.1. Welche Körperteile und Organe können durch Wasserstrahlen geschädigt werden?
  - 3.2. Biomechanische Toleranzwerte aus der Literatur
    - 3.2.1. Belastung der Halswirbelsäule (HWS)
    - 3.2.2. Brustkorb
    - 3.2.3. Bauchorgane
    - 3.2.4. Haut, Muskulatur (Hämatome)
    - 3.2.5. Augen
4. Richtlinien bei Einsatz von Wasserwerfern

### Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen.

a	Beschleunigung [ $m/s^2$ ]
g	Erdbeschleunigung [ $m/s^2$ ], $g = 9,81 m/s^2$
n	g-Zahl
A	Fläche [ $m^2$ ], [ $cm^2$ ]
F	Kraft [N]
M	Biegemoment [Nm]
p	Druck [bar]
$p_x$	Druck in der Entfernung x[m]
$p_M$	mittlerer Druck
s	Schwerpunkts-Abstand [m]

## 1. Einleitung.

Ziel der Arbeit sollte sein, in Abhängigkeit des Strahlendrucks an der Mündung eine untere Grenze der Einsatz-Entfernung des Wasserwerfers anzugeben, bei der der Strahl noch keine ernsthaften Verletzungen hervorruft.

Die Definition "ernsthafte Verletzung" ist nicht absolut, sondern hängt (leider) vom Standpunkt des Beobachters ab. Hier sollen unter diesem Begriff lebensbedrohliche Verletzungen oder wesentliche Funktionsstörungen oder -ausfälle wichtiger Organe verstanden werden, während z.B. Hämatome als tolerabel angesehen werden sollen.

Die Arbeit wurde in zwei Abschnitten angegangen:

1. Physikalische Messungen von Druck bzw. Kraft im Strahl in Abhängigkeit von Entfernung und Druck an der Mündung, 2. Versuch, aus diesen Ergebnissen und Angaben in der Literatur über biologische Toleranzgrenzen zu einer Aussage über Schädigungen am menschlichen Körper zu gelangen. Verletzungen durch den Strahl des Wasserwerfers sind nicht bekannt. Angeblich strahlbedingte Verletzungen können wegen fehlender Werte (Einsatz-Entfernung usw.) nicht ausgewertet werden.

## 2. Physikalische Messungen im Strahl.

### 2.1. Messungen mit Drucksonde kleinen Querschnitts.

Zunächst wurde versucht, über den Querschnitt des Strahls in verschiedenen Entfernungen ein Druckprofil zu messen. Dies erfordert Sonden kleinen Querschnitts, um eine möglichst hohe Auflösung des Profil-Verlaufs zu erreichen.

Zu diesem Zweck wurde eine Sonde verwendet, die sich senkrecht zum Strahl über eine motor-getriebene Spindel zur Abtastung des Strahls bewegen ließ. Die Sonde selbst war ein piezoresistiver Empfänger mit einer Aufnahme-fläche von  $0,75 \text{ cm}^2$  (Absolut-Druckaufnehmer der Fa. Kistler Typ 4045 A 20), dessen Meßbereich  $0 \dots 20 \text{ bar}$  betrug (Eigenfrequenz  $> 70 \text{ kHz}$ ) und mit einem geeichten Verstärker betrieben wurde (Typ 4601 der gleichen Firma). Bei  $20 \text{ bar}$  gab dieser Verstärker am Ausgang eine Spannung von  $10,0 \text{ V}$  ab. Das Signal wurde mit einem Schreiber sehr kurzer Ansprechzeit der Fa. Höflein in Abhängigkeit der Zeit registriert. Nach dem technischen Datenblatt des Schreibers HKS 120 beträgt die Einstellzeit für  $120 \text{ mm}$  Ausschlag (=Endausschlag) etwa  $100 \text{ ms}$ .

Typische Meßkurven zeigt die Abb.1. (Die Meßkurve für  $30 \text{ mm}$  bei  $p_0 = 18 \text{ bar}$  ist mit zehnfach erhöhter Empfindlichkeit aufgenommen). Die Vorschubgeschwindigkeit des Papiers betrug - wenn nicht anders angegeben -  $1,0 \text{ mm/s}$  (bei einigen Messungen  $2,5 \text{ mm/s}$ ).

### 2.2. $P_0$ -Messung. Eigenschaften des Strahls aus Messungen mit der Drucksonde.

Selbst bei möglichst ruhigem Halten des Strahlrohrs war es unmöglich, den Strahl im Bereich der Meßentfernungen ( $\geq 10 \text{ mm}$  bis  $\leq 25 \text{ mm}$ ) so ruhig zu halten, daß er konstant im Ziel bleibt. Dies zeigen die Meßergebnisse eindeutig: Maximal- und Minimalwerte des Druckes wechseln in schneller Folge ab. Nach diesen Erkenntnissen erschien es sinnlos, die Sonde zur Abtastung des Strahlquerschnitts seitlich zu bewegen. Die abgebildeten Ergebnisse sind daher mit raumfester Sonde erzielt. Die Unruhe des Strahls ist sicher durch die turbulente Strömung bedingt, die 1. ein Aufreißen des Strahls nicht weit vor der Mündung ( $< 10 \text{ mm}$ ) und 2. statistische Schwankungen des Querschnitts und der Richtung des Strahls hervorruft. Die Randgebiete des Strahls verlieren durch dessen Auflösung schnell Energie und leisten daher - außer der Nässe-Wirkung

keinen Beitrag zur Kraftwirkung im Ziel.

Bei Messungen in 15m Entfernung wurde nach einer gewissen Benutzungsdauer des Gebers dessen Meßmembran aus der Fassung geschleudert, sodaß weitere Messungen mit der Sonde nicht mehr angestellt werden konnten. Die Sonde war für (statische) Messungen bis 20 bar (Berstdruck  $\approx$ 50 bar) ausgelegt, hätte also die gemessenen Drücke bis zu 1 bar aushalten müssen. Offenbar ist der Druckempfänger durch die zahlreichen schnellen Lastwechsel zerstört worden.

Insgesamt kann aufgrund der Messungen gesagt werden, daß sich der kompakte Strahl einige Meter vor der Mündung mehr oder weniger auflöst und seinen Querschnitt dabei bedeutend vergrößert. Dieser Effekt ist schon mit bloßem Auge deutlich sichtbar. Biologisch ist die große Ausdehnung des Querschnitts natürlich günstig, weil die Verletzungs-Wahrscheinlichkeit erheblich vermindert wird.

### 2.3. Konstruktion eines neuen Aufnehmers und Meßergebnisse.

Aufgrund der Erfahrungen mit der "punktförmigen" Meßsonde und der Überlegung, daß solche Messungen wenig über flächenhafte Kräfte aussagen, wurde die Wirkfläche des Sensors erheblich (um den Faktor 10 linear = Faktor 100 in der Fläche) vergrößert. Die Konstruktion ist in den Abb.2 bis 5 zu sehen.

Dabei erhob sich die Frage, welche Größe der Aufnehmer-Fläche am günstigsten sei. Sicher ist ein Durchmesser von mehr als 35 cm (entspricht etwa der Körperstamm-Breite) irrelevant. Eine vernünftige Größe dagegen ist etwa die des Kopfes, weil er - zusammen mit der Halswirbelsäule - , wie später erörtert, eines der kritischen Körperteile ist. Aus diesem Grunde wurde als Größe der Wirkfläche ein Kreis von 10 cm  $\varnothing$  gewählt.

Zwei konzentrische Rohre lassen sich gegeneinander leicht verschieben. Das innere Rohr (Abb.4) ist an einem im Boden verankerbaren Gestelle (Abb.2) fest angebracht. Darüber läuft das äußere Rohr (Abb.3). Zwischen beiden (dem Strahlrohr zugewandten) Stirnflächen befindet sich konzentrisch ein ringförmiges Meßelement (Abb.4 und 5), welches die Kraft auf piezoelektrischer Basis zwischen beiden Zylindern mißt, wenn

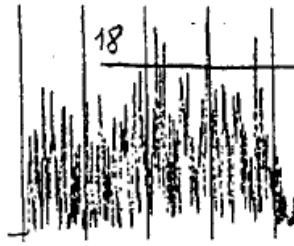
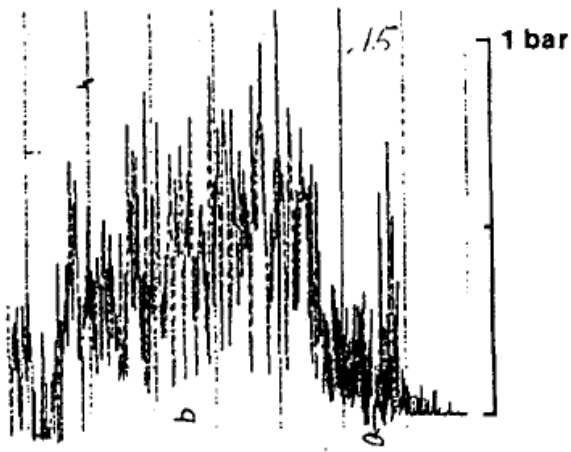


Abb.1

15

20

25

30 m

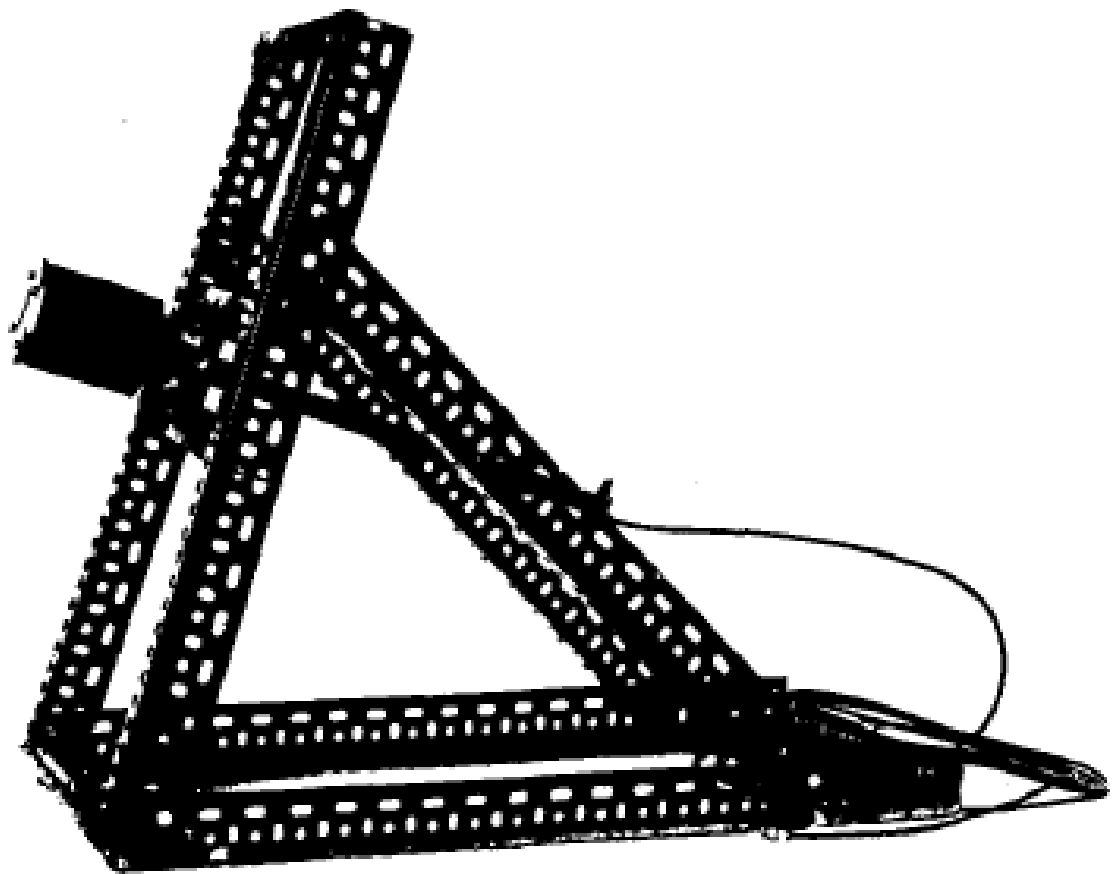


Abb.2: Gesamtansicht des Druck-Meßgerätes. Der Strahl trifft von links her auf die Stirnfläche des Meßtopfes.

Abb.3: Äußerer Zylinder des Meßgerätes, die Stirnfläche ( $\varnothing=10\text{cm}$ ) ist abschraubbar. Rechts wird der Fuß des inneren Zylinders sichtbar.



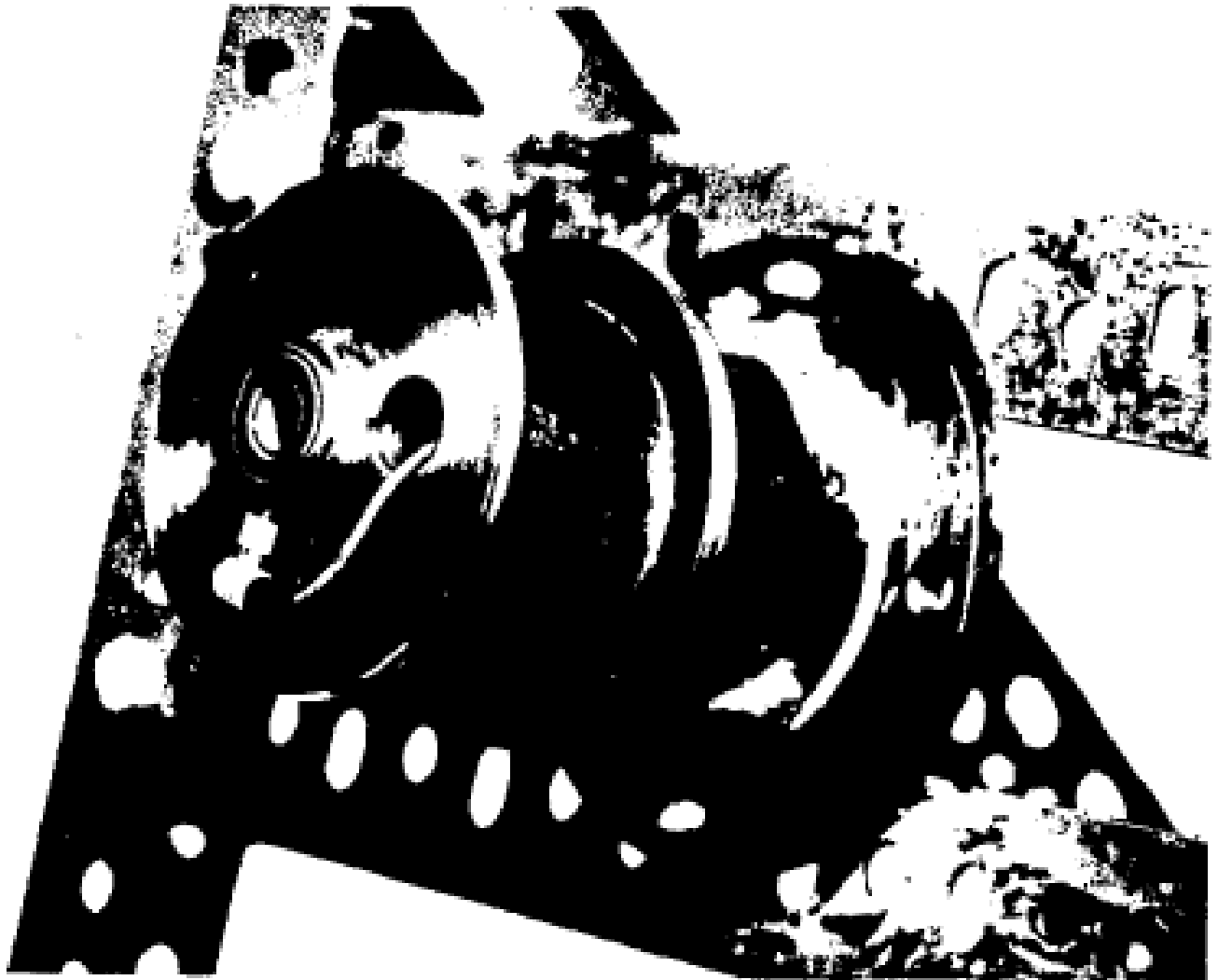
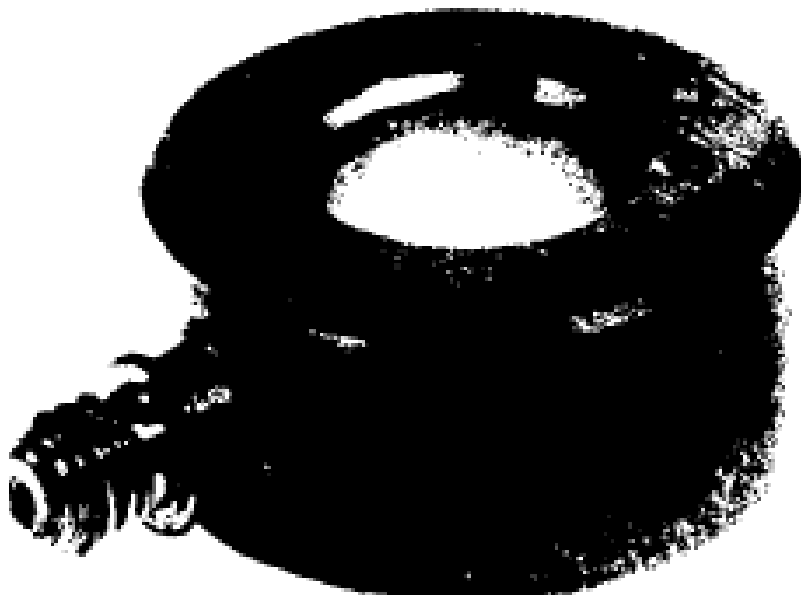


Abb.4: Innerer Zylinder mit piezoelektrischem Meßelement auf der Stirnfläche.

Abb.5: Meßelement mit hochisolierenden Kabelanschluß  
Ø des Elementes 22 mm, Höhe 10 mm.





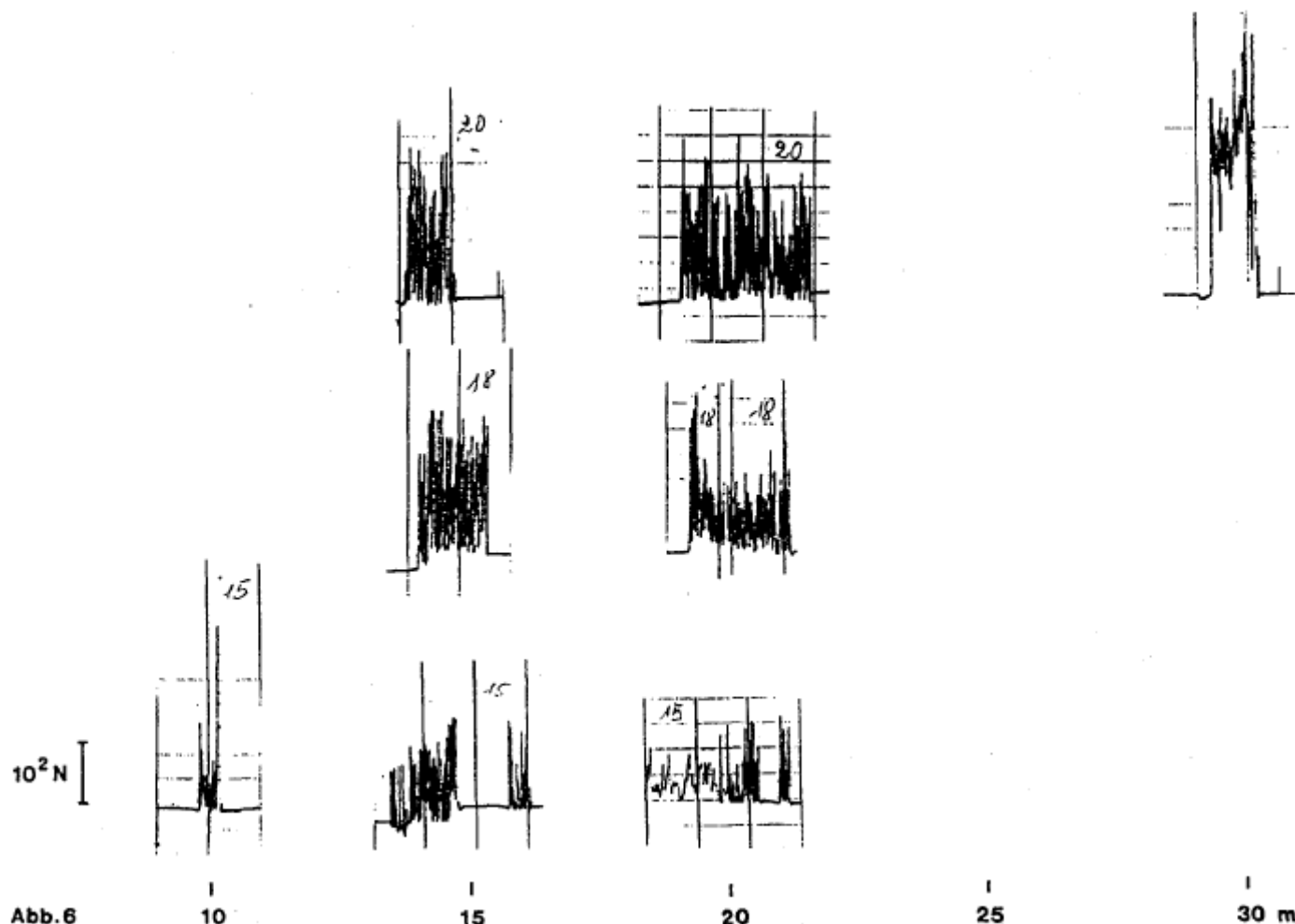


Abb. 6

nämlich die Stirnfläche des äußeren Zylinders durch den Wasserstrahl beaufschlagt wird. Der elektrische Anschluß erfolgte über ein Koax-Kabel, das durch den inneren Zylinder und ein langes Metallrohr nach hinten hinaus zum Verstärker geführt wurde. Großer Wert mußte auf die völlige Dichtheit der Anordnung gelegt werden, da feuchte Kabelverbindungen die kraft-erzeugte (geringe) elektrische Ladung schnell abgeleitet hätte. Eine (quasi)statische Messung der Kräfte, wie hier notwendig, wäre dann nicht mehr möglich gewesen (der Isolationswiderstand bei Langzeitmessungen muß  $\geq 10^{14} \Omega$  sein).

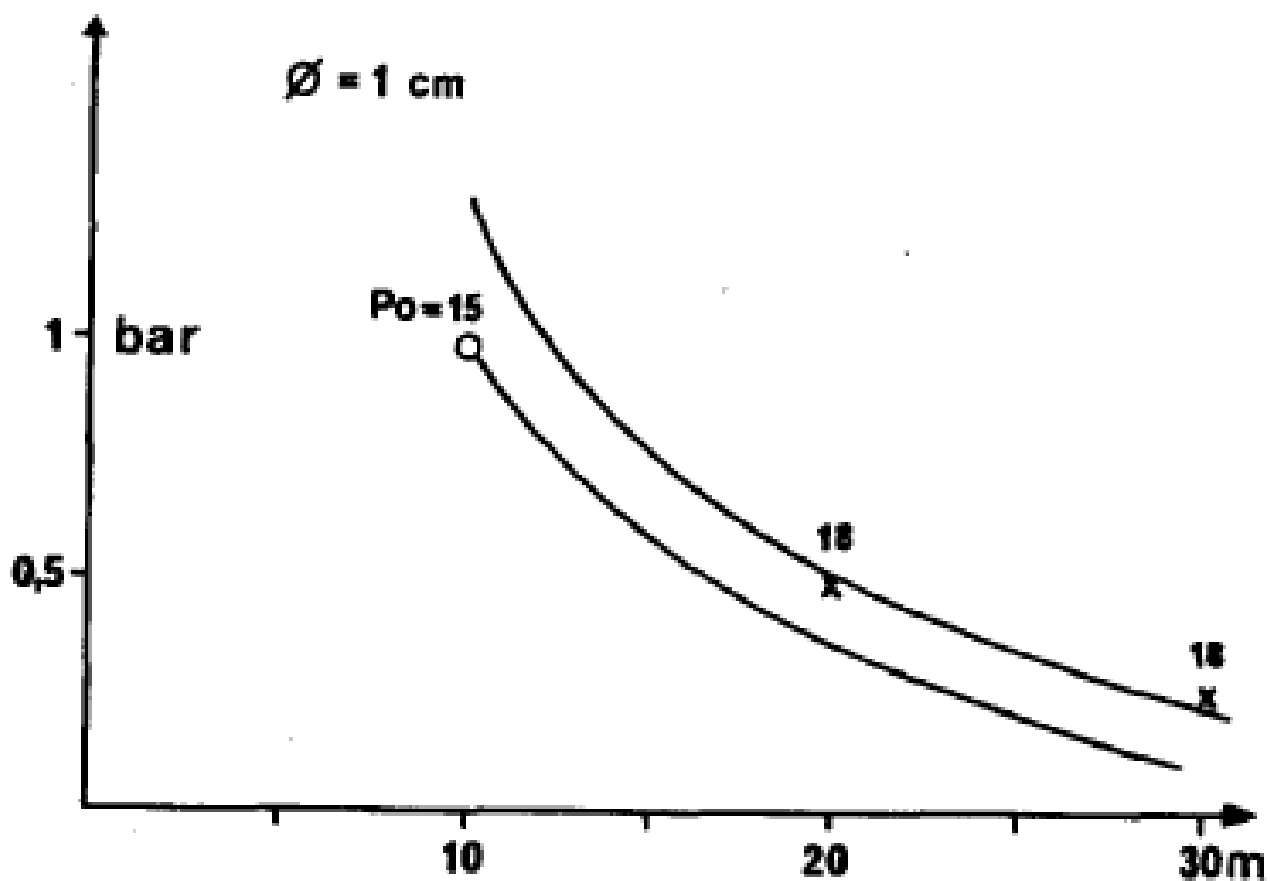


Abb.7

Ergebnisse der Druckmessung mit piezoresistivem Geber. Wasserwerfer-Typ WaWe 9.

Die Zahlen an der Kurve und an den Meßpunkten beziehen sich auf den Mündungsstrahlendruck  $p_0$ .

Mit dem piezoresistivem Geber wurde bei  $p_0 = 15 \text{ bar}$  nur ein Wert gemessen. Durch diesen Wert wurde eine Kurve parallel zur Kurve für  $p_0 = 18 \text{ bar}$  gelegt.

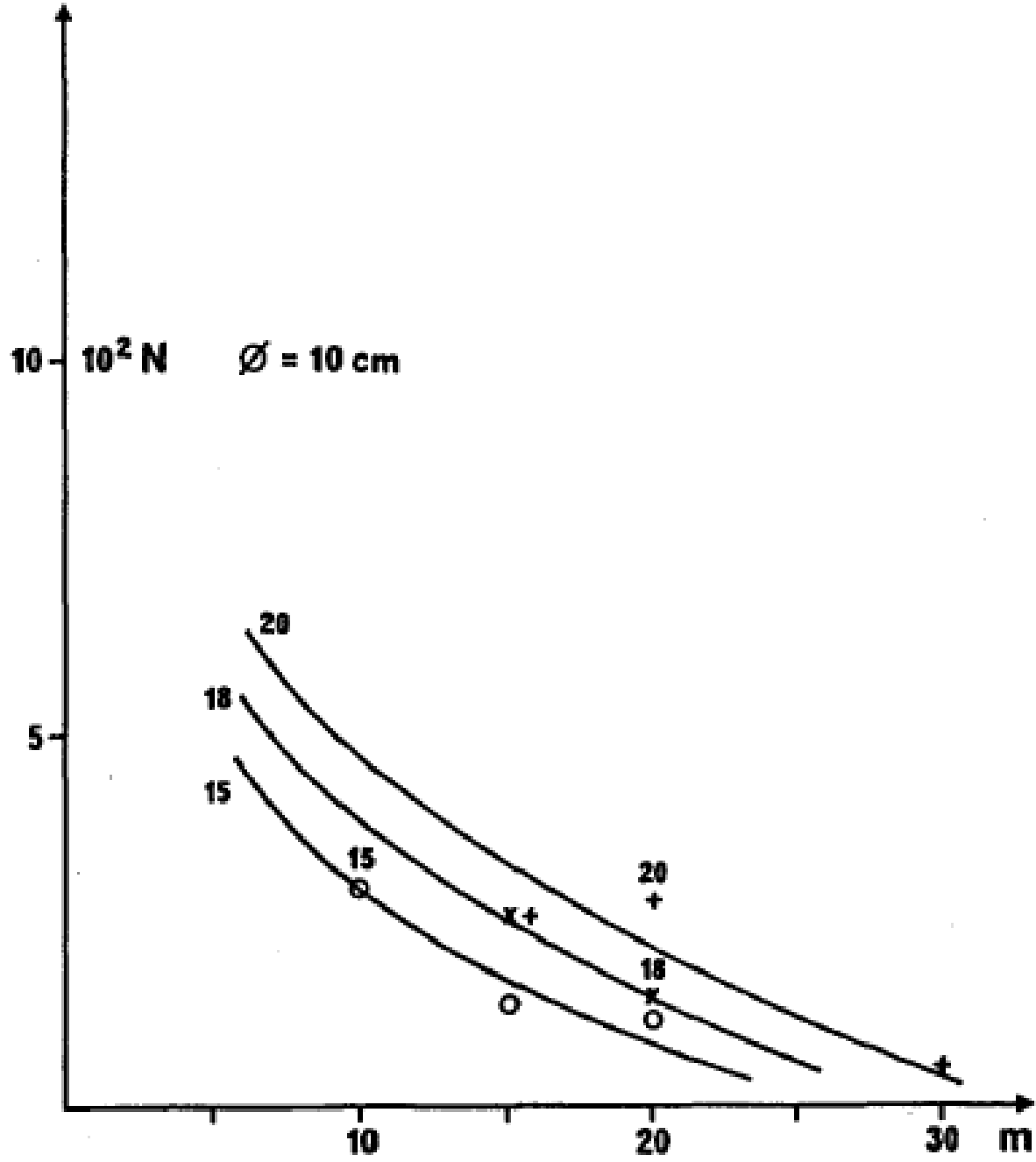


Abb.8

Ergebnisse der Kraftmessung mit piezoelektrischem Geber. Sonst wie Abb.7.

### 3. Wasserstrahl und biomechanische Toleranz.

#### 3.1. Welche Körperteile und Organe können durch Wasserstrahlen geschädigt werden?

Im Gegensatz zur mechanischen Wirkung bei Verkehrsunfällen ("langsame" Einwirkung großer Massen) oder bei Geschossen ("schnelle" Einwirkung kleiner Massen) ist die Energiedichte (=Energie/Fläche) bei Wasserstrahlen wesentlich geringer. Daher sind Knochenbrüche im Kopfbereich oder Frakturen von Becken, Ober- oder Unterschenkel-Knochen (wie beim Anfahren von Fußgängern) nicht zu erwarten.

In Betracht zu ziehen sind jedoch:

1. Belastung der Halswirbelsäule (HWS) durch Flexion (Beugung) oder Extension (Streckung), wenn der Kopf durch Kräfte senkrecht zur HWS beaufschlagt wird,
2. Kompression des Brustkorbs mit evtl. auftretenden Rippenbrüchen,
3. Verletzung der Bauchorgane
4. Belastung der Haut und der darunterliegenden Muskulatur mit Bildung von Hämatomen (Blutergüssen) oder Reißen der Haut,
5. mechanische Einwirkung auf das Auge.

#### 3.2. Biomechanische Toleranzwerte aus der Literatur.

In diesem Kapitel werden diese Werte angegeben, aufgegliedert nach Körperteilen und in der Reihenfolge, wie sie in Kap.3.1. aufgeführt sind.

##### 3.2.1. Belastung der Halswirbelsäule (HWS)

Sie entsteht in Form eines Biegemomentes, wenn der Kopf senkrecht zur HWS durch die vom Wasserstrahl ausgeübte Kraft ausgelenkt wird. MERTZ [5] gibt als ertragbare Momente bei der Flexion  $M = 193 \text{ Nm}$  an, bei der Extension  $59 \text{ Nm}$ . Der Grenzwert ist deutlich überschritten bei  $400 \text{ Nm}$  (LANGE [4]).

Für seitliche Einwirkung muß vom unteren Wert (Toleranz für Flexion)

ausgegangen werden. Diese Belastungsart kommt nur selten vor, da von Natur aus - im Sinne des Wortes - der Mensch entweder der Gefahr entgegenläuft (mögliche Gewalteinwirkung von vorn) oder vor ihr flüchtet (Gewalt von hinten). Die Einwirkung von der Seite kommt mehr zufällig (z.B. beim Drehen) zustande. Entsprechend (relativ) gering ist die seitliche Hals-Muskulatur entwickelt.

Das maximale Biegemoment erscheint aus mechanischen Gründen (Hebelarm) zwischen 6. und 7.HW (die darunter liegenden (Brust-)Wirbel werden durch den Brustkorb fixiert). Der Abstand dieser Stelle vom Kopfschwerpunkt liegt bei knapp 0,2 m. Wegen  $M = F \cdot s$  kann die wirksame Kraft  $F$  aus  $M$  berechnet werden. Es ergibt sich so:

für die Flexion  $F \approx 1000 \text{ N}$ ,

für die Extension  $\approx 300 \text{ N}$

Toleranzwert

Überschritten bei  $\approx 2000 \text{ N}$ .

Der unterste Wert beträgt 300 N, er gilt als noch ertragbar. Diese Belastung entsteht, wenn der Kopf von vorn getroffen wird. Bei  $p_0 = 20 \text{ bar}$  wird diese Kraft bei rund 15 m auf die 10cm-Scheibe ausgeübt, für  $p_0 = 15 \text{ bar}$  bei rund 10 m. Diese Entfernungs- und Druckwerte in Bezug auf den Kopf sollen daher nicht unter- bzw. überschritten werden.

Wie oben schon erwähnt, sind Frakturen des knöchernen Schädels nicht zu erwarten, ebenso nicht primär Hirnerschütterungen oder Rotationstraumen des Kopfes, möglicherweise aber sekundäre Schäden durch Aufschlag des Kopfes auf den Boden infolge der Umwerfwirkung des Wasserstrahls.

### 3.2.2. Brustkorb.

Rippenfrakturen entstehen durch Kompression des Brustkorbs. Diese Belastungsart ist - wegen deren Häufigkeit bei Verkehrsunfällen - wiederholt untersucht worden. Es sind daher zahlreiche biomechanische Werte in der Literatur vorhanden.

Zwischen dem Brusttrauma bei Verkehrsunfällen und dem (möglichen) infolge Einwirkung von Wasserstrahlen besteht jedoch ein großer Unterschied. Beim Verkehrsunfall wird der Körper in kurzer Zeit abgebremst. Die Kraft, bedingt durch die träge Masse des Körpers, preßt den Brustkorb gegen das Lenkrad oder in die Gurte. Bei Belastung durch den Strahl ist die Masse des Körpers in Ruhe, die Stoßkraft entsteht durch

den Staudruck des Wassers. Eine große Kraft kann sich daher nur dann entwickeln, wenn der Körper statisch fixiert ist (wenn die Person z.B. vor einer Mauer steht) und so die trägheitsbedingte Kraft ersetzt. Die staukraft-bedingte Kraft des Wassers wird bei Nicht-Fixierung des Körpers nur in geringem Maße zur Geltung kommen, da der freistehende Körper bei der erforderlichen Kraft für die Eindrückung des Brustkorbs sicher umfällt und dann dem Strahl einen flachen (im Gegensatz zum senkrechten) Einfallswinkel  $\alpha$  darbietet, der die vom Strahl ausgeübte Kraft  $F$  ( $F$  proportional  $\sin \alpha$ ) natürlich ganz wesentlich vermindert. Die meisten Meßergebnisse beziehen sich - wie schon erwähnt - auf verkehrsunfall-bedingte Belastungsfälle mit Werten von  $a > 40g$  und stoßzeiten  $< 100ms$ . Für strahlbedingte Belastungen ist von statischen oder quasistatischen Zuständen auszugehen.

Einzelrippen (Leichenversuche) halten 100 N bei Biegung aus (FABRICIUS u.A. [1]). Die Bruchlast bei statischer Belastung liegt bei 400...1000 N (Alter: 12..21 Jahre) und 100...250 N (Alter: 60..72 Jahre) (SCHMIDT [7]). Diese Werte sind weniger interessant, da die Rippen immer im Verband gebogen werden.

Nach NAHUM u.A. [6] wird eine Deformationsenergie von 300 Nm ertragen (Leichenversuche), die dynamische Eindrückung beträgt dabei 4,4..5,7 cm bei Kräften von 3000...9000 N. Statische Biegung bei 5500 N soll etwa die Grenze darstellen. Dieser Wert gilt für großflächige Belastung, bei der der gesamte Brustkorb beaufschlagt wird. Verglichen mit der vom Wasserstrahl ausgeübten Kraft ist bei Entfernungen, die für die HWS kritisch sind, jedenfalls nicht mit erheblicher Gesamtdeformation des Brustkorbs (und damit evtl. auftretenden Serien-Rippenbrüchen) zu rechnen.

### 3.2.3. Bauchorgane

Für strahl-bedingte Belastungen können aus der Literatur nur spärliche Toleranzwerte erschlossen werden, da sich diese Werte meistens auf Experimente und Überlegungen für verkehrsunfall-bedingte Traumen beziehen

FAZEKAS u.A. [3] experimentierte mit Leichenlebern, die er zusammenpreßte, bis sie Rupturen zeigten. Bei einer Kraft von  $1700 \pm 600N$  trat die erste Ruptur auf, was einem Druck von  $1,6 \pm 0,7bar$  entsprach (Umrechnung von Kraft auf Druck über die (einseitige) Oberfläche der Le-

ber). Als Toleranzwert wird 400N angegeben, der als erster Anhaltspunkt anzusehen ist.

Zu beachten ist, daß durch die Anspannung der Bauchmuskulatur, die auch reflektorisch beim Auftreffen des Strahls abläuft, die erträgliche Belastung ziemlich erhöht werden kann.

#### 3.2.4. Hautverletzungen, Hämatome

Diese Verletzungen sind als tolerabel anzusehen, keinesfalls lebensgefährdend. Sie werden daher nicht diskutiert.

#### 3.2.5. Augen

Die Augen sind gegenüber mechanischer Einwirkung der empfindlichste Teil des Körpers. Aus Kreisen der Feuerwehr wird über Unfälle berichtet, bei denen durch den Wasserstrahl Augen enukleiert wurden (aus der Augenhöhle entfernt) oder der Augapfel zerstört wurde ("Auslaufen des Auges"). Diese Unfälle geschahen auf wenige Meter Entfernung bei Mündungsdrücken um 5 bar, wie sie bei den Feuerwehr-Fahrzeugen üblich sind. Man wird daraus ganz grob abschätzen können, daß Drücke im bar-Bereich nicht mehr toleriert werden.

Die Unfallgeschehen wurden leider nicht genauer rekonstruiert, sodaß aus diesen Aufstellungen der Augenverletzungen und der dazugehörigen technischen Werte keine weitergehenden Schlüsse gezogen werden können.

#### 4. Richtlinien für den Einsatz von Wasserwerfern

Ohne zunächst das Auge zu berücksichtigen, ergibt sich folgendes. Trifft der Wasserstrahl den Kopf von vorn, so ist eine Kraft von 300N noch ertragbar. Bei  $p_0=20\text{bar}$  wird diese Kraftwirkung auf die 10cm-Scheibe bei rund 15 m erreicht, bei  $p_0=15\text{bar}$  in rund 10m. Für den Kopf gelten also die Grenzwerte:

$p_0 = 20 \text{ bar} \Rightarrow$  Entfernung nicht kleiner als 15 m.

$p_0 = 15 \text{ bar} \Rightarrow$  Entfernung nicht kleiner als 10 m.

Im allgemeinen wird sich bei so nahen Entfernungen die betroffene Person als Schutzreflex oder im Sinne einer Abwehrbewegung umdrehen, wodurch die "mildere" Toleranz der Kopf-Biegung zum Tragen kommt.

Für den Brustkorb gelten hinsichtlich Serien-Rippenbrüchen (als Folge einer Gesamt-Deformation) Werte, die erheblich über denen des Kopfes liegen, sodaß keine besonderen Toleranzwerte für diesen Körperteil angegeben werden müssen.

Für den Bauch ist eine tolerable Kraft von 400N angegeben. Sie liegt über dem Wert für den Kopf, braucht daher auch nicht berücksichtigt zu werden, solange der Toleranzwert für den Kopf eingehalten wird.

Ein schwieriges Kapitel sind die Augen. Wegen der Inhomogenität des Strahls sind bei den oben erwähnten Toleranz-Entfernungen von 10 bzw.- 15 m punktuell noch erhebliche Drücke im Strahl zu erwarten, die zu schweren Verletzungen der Augen bis zu deren Verlust führen können. Man muß sich allerdings fragen, warum solche Verletzungen bisher nicht bekannt geworden sind. Dies kann vielleicht so erklärt werden, daß die Betroffenen - wie oben schon einmal erwähnt - sich vom Strahl abwenden und dadurch die Augen geschützt werden. Die Toleranz-Entfernung für das Auge mag um 25..30 m liegen. Dieses als allgemeine Toleranz-Entfernung vorzuschreiben, würde dem Sinn des Wasserwerfer-Einsatzes entgegenstehen. Man kann diesem Dilemma nur entgehen, wenn sichergestellt wird, daß unter 25 m Mündungsentfernung der Strahl nicht das Gesicht trifft



## 5. Literatur-Verzeichnis

- [1] FARRICIUS, B., BASTINI, C.  
Untersuchungen über die Festigkeit menschlicher Rippen  
TU Berlin, Forsch.-Bericht 84, 1969
- [2] FAERBER, E., GULICH, H.-A., HEGGER, A., RUTER, G.  
Biomechanische Belastungsgrenzen, Literaturstudie  
Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr,  
Heft 3, 1976 (hier zahlreiche Literaturangaben)
- [3] FAZEKAS, Gy., KOSA, F., JOBBA, G., MÉSZAROS, E.  
Die Druckfestigkeit der menschlichen Leber mit besonderer  
Hinsicht auf die Verkehrsunfälle  
Z.Rechtsmed. 68, 207-224, 1971
- [4] LANGE, W.  
Die Reaktion des Systems Kopf-Halswirbelsäule  
bei stoßartiger Beschleunigung des Torsos  
Hefte zur Unfallheilkunde 110, 8-15, 1972
- [5] MERTZ, H. J.  
Neck injury  
SAE P 49, 1973
- [6] NAHUM, R. F., KROELL, Ch. K., MERTZ, H. J.  
Prediction of thoracic injury from dummy responses  
Cof.Proc. 19th Stapp, 295-316, 1975
- [7] SCHMIDT, G.  
Versuchsdaten als Grundlage einer gerichtsmedizinischen  
Rekonstruktion von Verkehrsunfällen  
Beitr.gerichtl.Med. 32, 1974