

# Bionica en Zwemmen



Weerstand in water

J.J. Videler  
Brakel 28 maart 2009

# Krachten spel op een zwemmer

Onder water!

Archimedes kracht



Zwaartekracht  
(Orde van grootte 1000 N)

Aan het oppervlak!

Golfweerstand  
Spatweerstand



# Eigenschappen van water

## **Vloeibaar medium:**

Geen eigen vorm

Vrij bewegende deeltjes

Vervormt gemakkelijk onder de geringste druk

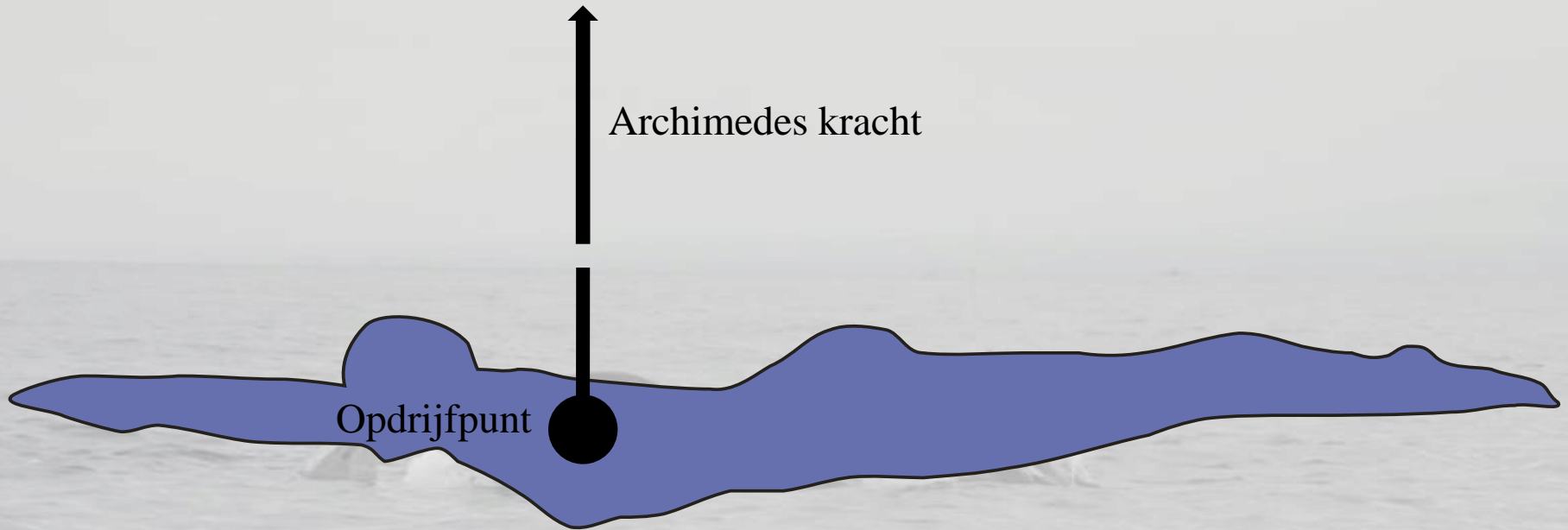
Vult elke holte volledig

Niet samendrukbaar (wel drukverschillen)

## **Belangrijke fysische eigenschappen:**

		<b>Dichtheid</b>	<b>Viscositeit</b>
	°C	Kg m <sup>-3</sup>	m Pa s
<b>Zoet water</b>	10	<b>1000</b>	<b>1,3</b>
	20	<b>998</b>	<b>1,0</b>
	30	<b>996</b>	<b>0,8</b>
<b>Zeewater</b>	20	<b>1027</b>	<b>1,1</b>

# Onder water!



## Archimedes kracht (N):

Gewicht van het verplaatste water (massa water in kg x zwaartekrachtversnelling in  $\text{m s}^{-2}$ )

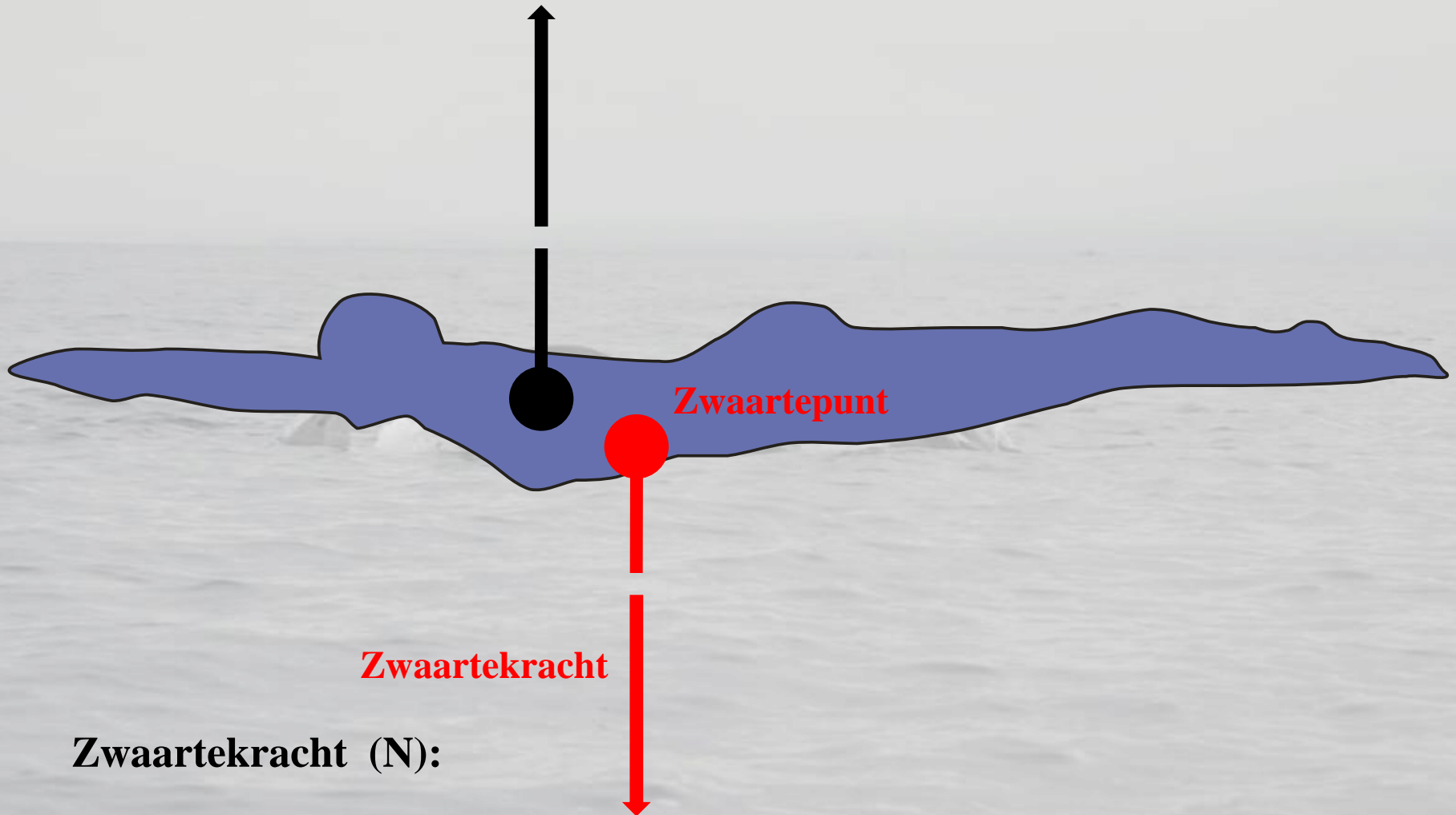
Grijpt aan op alle lichaamsdelen

Samengesteld komen de krachten samen in het opdrijfpunt

Positie opdrijfpunt hangt af van de volumeverdeling over het lichaam

Zwaartekrachtversnelling =  $9,82 \text{ m s}^{-2}$

# Onder water!



**Zwaartekracht**

**Zwaartekracht (N):**

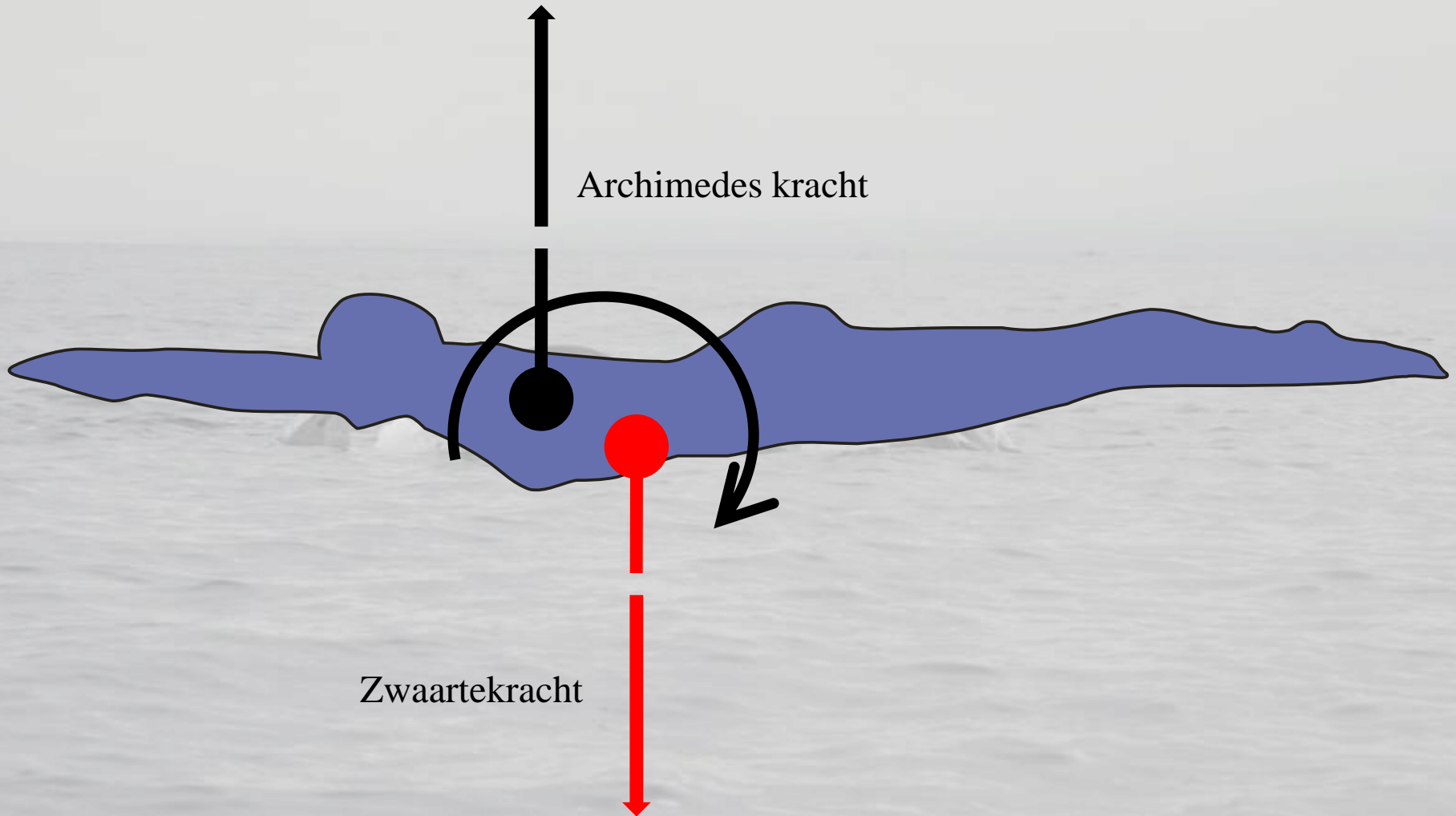
Gewicht van het lichaam (massa lichaam in kg x zwaartekrachtversnelling in  $m s^{-2}$ )

Grijpt aan op alle lichaamsdelen

Samengesteld komen de krachten samen in het zwaartepunt

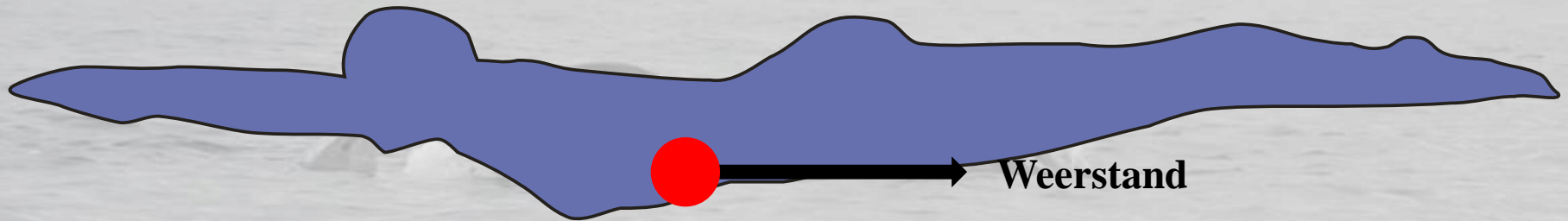
Positie zwaartepunt hangt af van de massaverdeling over het lichaam

Onder water!



Opdrijfpunt en zwaartepunt vallen niet samen : **draaimoment**

# Onder water!



Bewegen in water wekt weerstand op:

**Oorzaken:**

Wrijving tussen waterdeeltjes met verschillende snelheden

Traagheid van in beweging gebrachte watermassa's

**Soorten weerstand:**

Wrijvingsweerstand

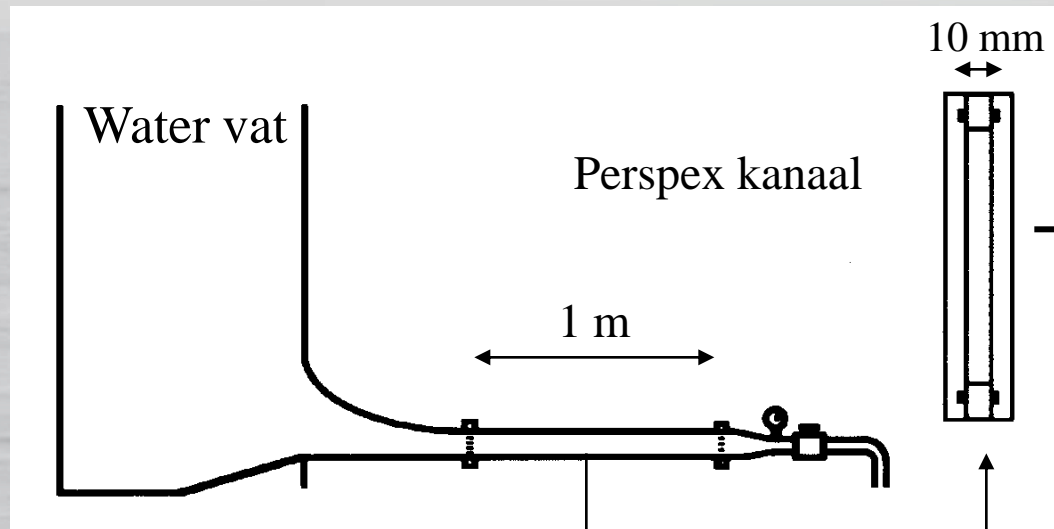
Vorm of drukweerstand

Geïnduceerde weerstand

# Onder water!

## Wrijvingsweerstand

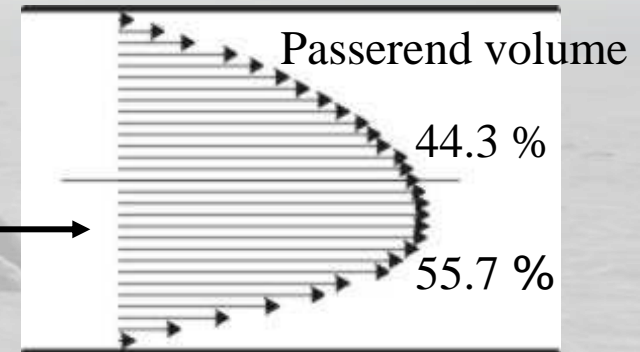
Een directe vergelijking tussen een ruwe (0.1 mm) en een gladde wand



### Stromingsprofiel

Maximum snelheid  $\pm 0.5 \text{ ms}^{-1}$

Gladde wand



Ruwe wand

Wrijvingsweerstand

$$\tau_{\text{ruw}} = 170 \% \tau_{\text{glad}}$$

De laag waarin de snelheid toeneemt (de grenslaag) is dikker aan de gladde kant, maar aan die kant passeert minder water.

Vertaald naar een zwemmer:

Een zwemmer met een dikke grenslaag sleept meer water mee,  
Ongunstig bij versnellen, maar de wrijvingskrachten zijn kleiner.



# Onder water!

## Wrijvingsweerstand

**De dikte van de grenslaag hangt af van:**

de stroomsnelheid: hoog dun, laag dik

de dichtheid van het water: laag dik, hoog dun

de viscositeit van het water : laag dun, hoog dik

de structuur van de wand: ruw of superglad en waterafstotend, dun

de manier waarop het water stroomt: laminair dik, turbulent dun

**Bij de zwemmende mens is de grenslaag turbulent!**

# Onder water!

## Vorm of drukweerstand

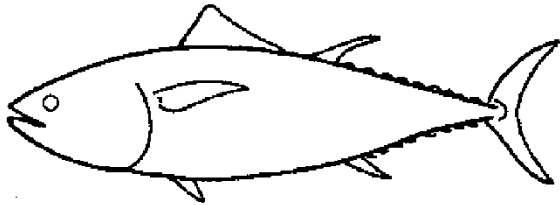
Oorzaak: water wordt weggedrukt

Een naald geeft de minste weerstand maar heeft een kleine inhoud

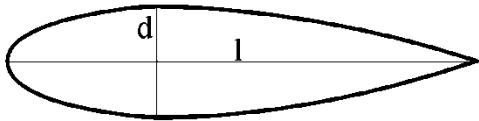
Een bol de grootste inhoud en hoogste vormweerstand

Een gestroomlijnd lichaam is een kruising tussen naald en bol

Gestroomlijnd lichaam



Gestroomlijnd lichaam: grootste dikte  $d$  op  $0.3 l$



Grootste inhoud met minste weerstand:  $d/l = 0.24$

$d/l$  waarden bij dieren:

Pinguïn 0.26

Tonijn 0.28

Witte haai 0.26

Tuimelaar 0.25

Paling 0.05

Kabeljauw 0.16



# Onder water!

## Vorm of drukweerstand

Oorzaak: water wordt weggedrukt

Evenredig met:

De dichtheid van het water ( $\rho$ )

De snelheid in het kwadraat ( $V^2$ )

Het natte oppervlak ( $A_n$ )

Een coëfficiënt die de verhouding aangeeft met een frontaal aangestroomde vlakke plaat ( $C_w$ )

$$\frac{1}{2} \rho V^2 A_n C_w$$

Merk op:  $\frac{1}{2} \rho V^2$  is de kinetische energie ( $\frac{1}{2} m V^2$ ) per eenheid volume ( $m$  is massa)

Rekenvoorbeeld:

2 m lange zwemmer ( $2 \text{ m}^2$  nat oppervlak) drijft uit bij  $2 \text{ m s}^{-1}$

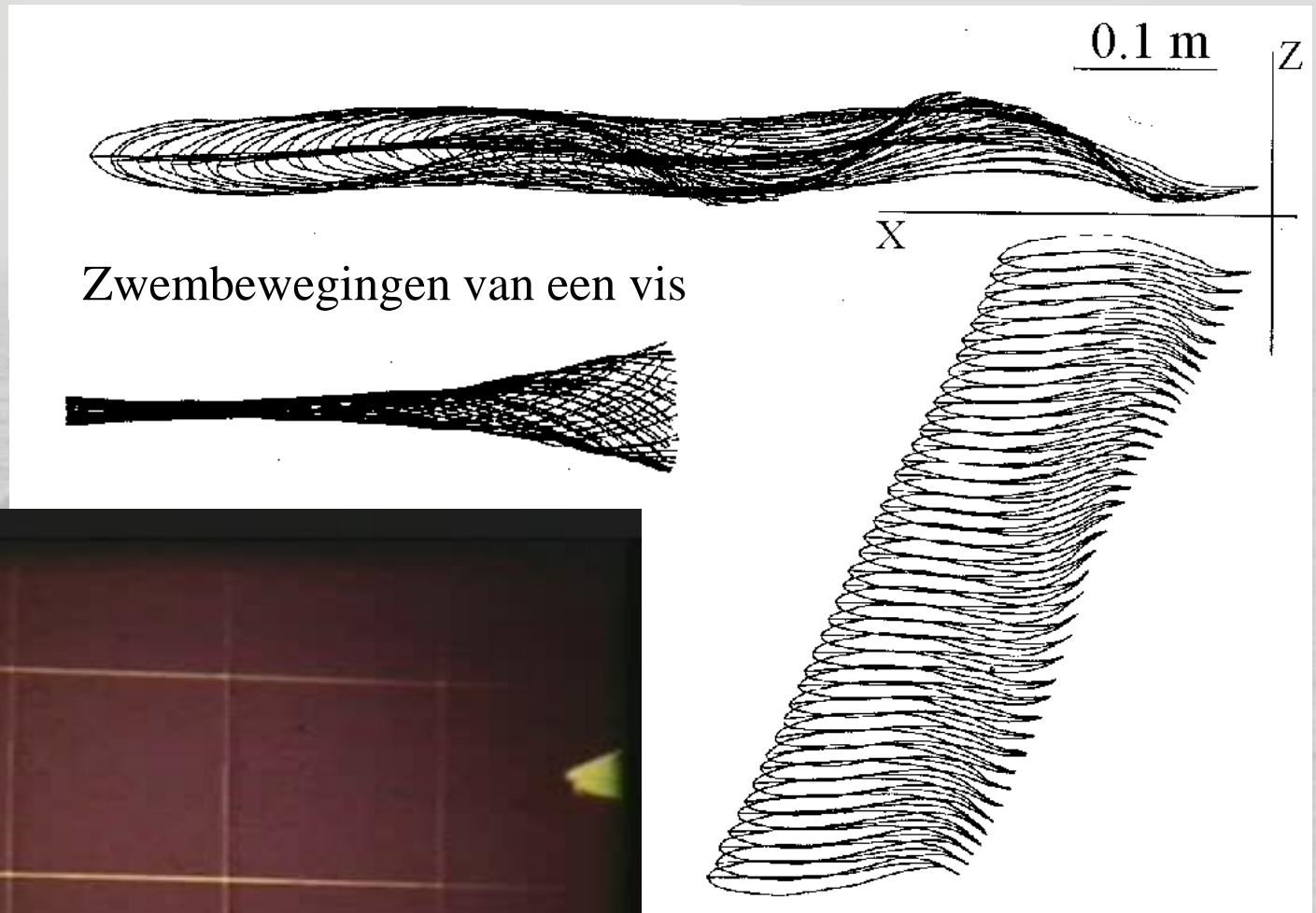
Zijn weerstand is dan  $4000 C_w$  (N).

De coëfficiënt  $C_w$  zit ergens tussen 0.01 en 0.005 en de weerstand tussen 40 en 20 N

# Geïnduceerde weerstand

Oorzaak: water wordt versneld door bewegingen van de zwemmer

Weerstand  
zwemmende vis is  
**3-4** maal zo groot  
als die van een  
uitdrijvende vis

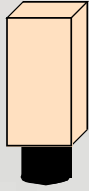


Probleem:

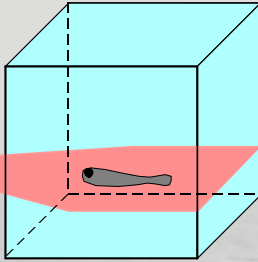
Hoe kwantificeer je de stroming?

# Particle Image Velocimetry (PIV)

High speed camera



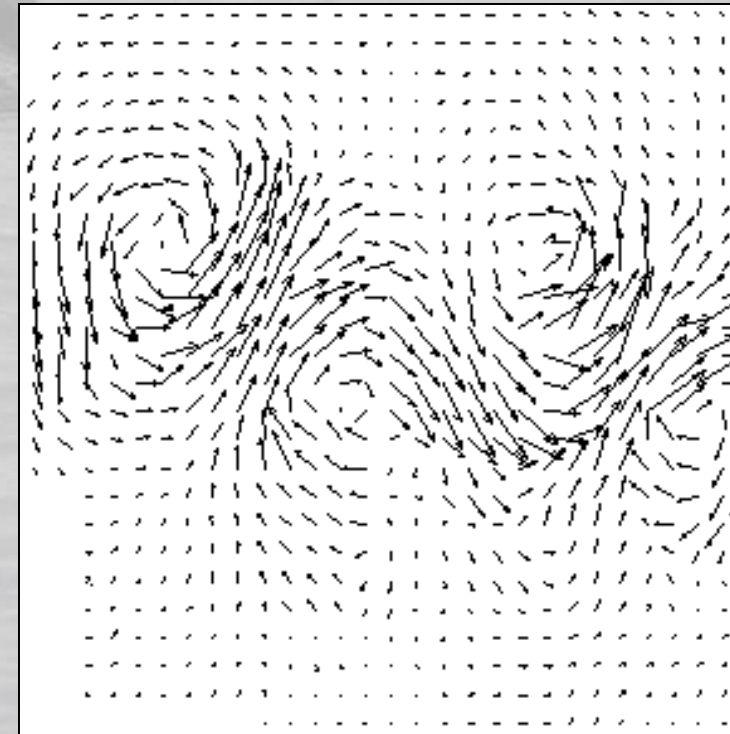
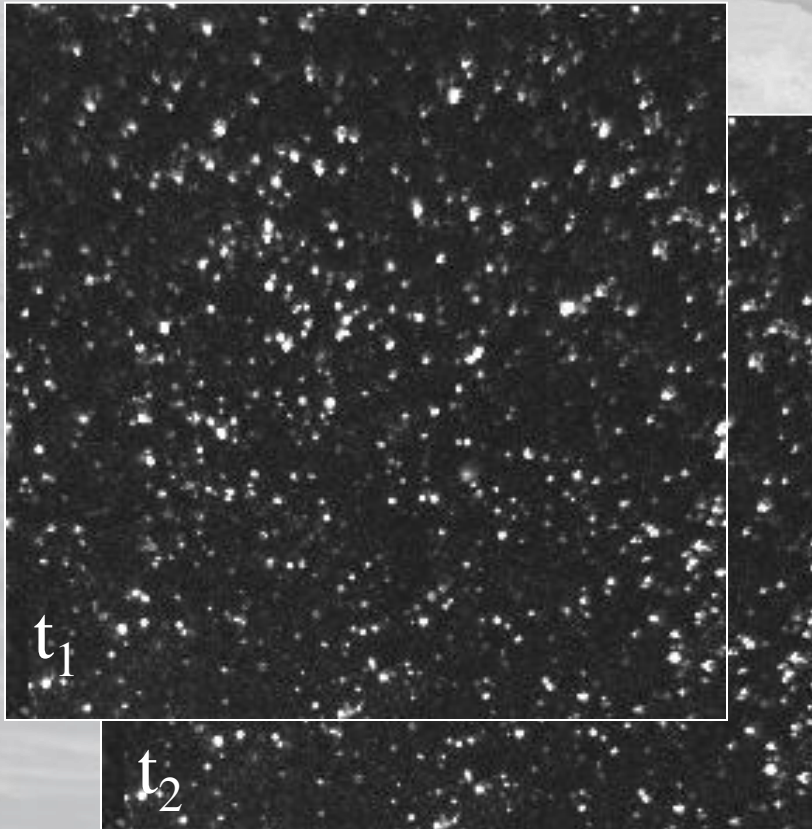
Laser



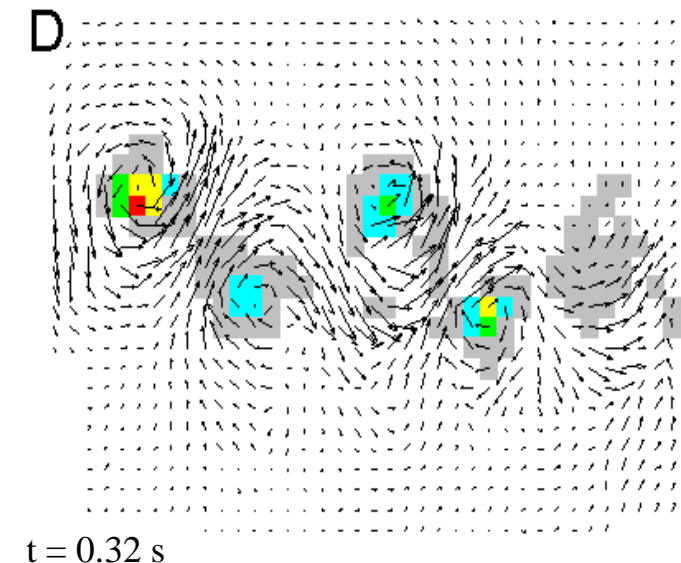
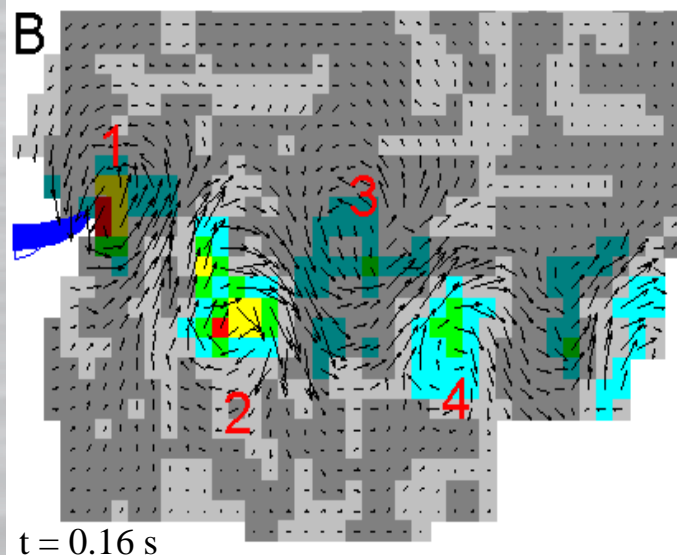
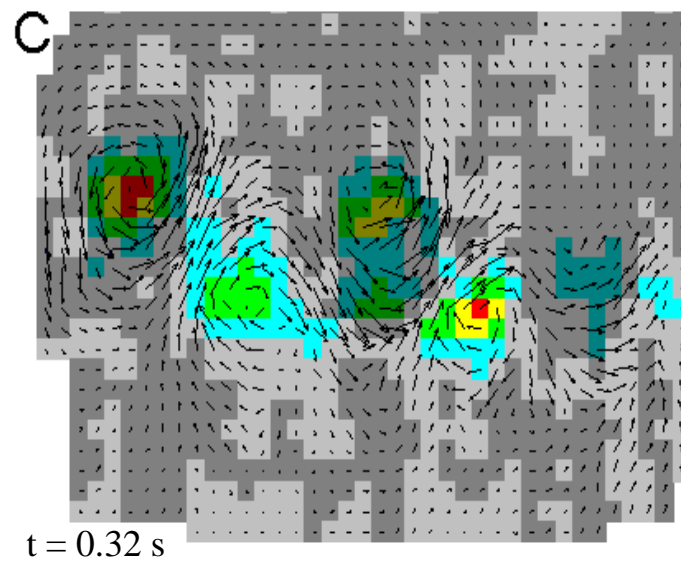
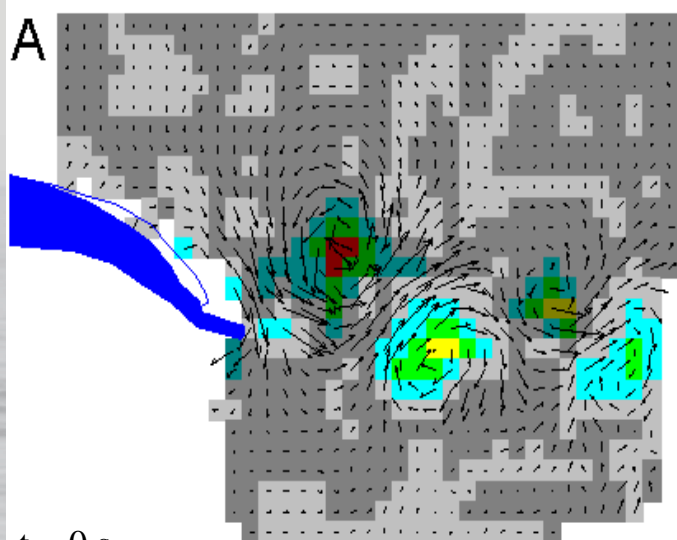
Dunne  
plaat  
licht

Deeltjes in het water laten de beweging zien  
Deeltjespatroon op foto  $t_2$  is verschoven ten opzichte van  $t_1$   
Hieruit worden in het voorbeeld 28 x 28 lokale vectoren berekend  
Elke vector geeft de richting en de snelheid ter plaatse

Resultaat: wervelpatroon



# Waternverstoring door een zwemmende harder in een horizontaal vlak door de snuit:



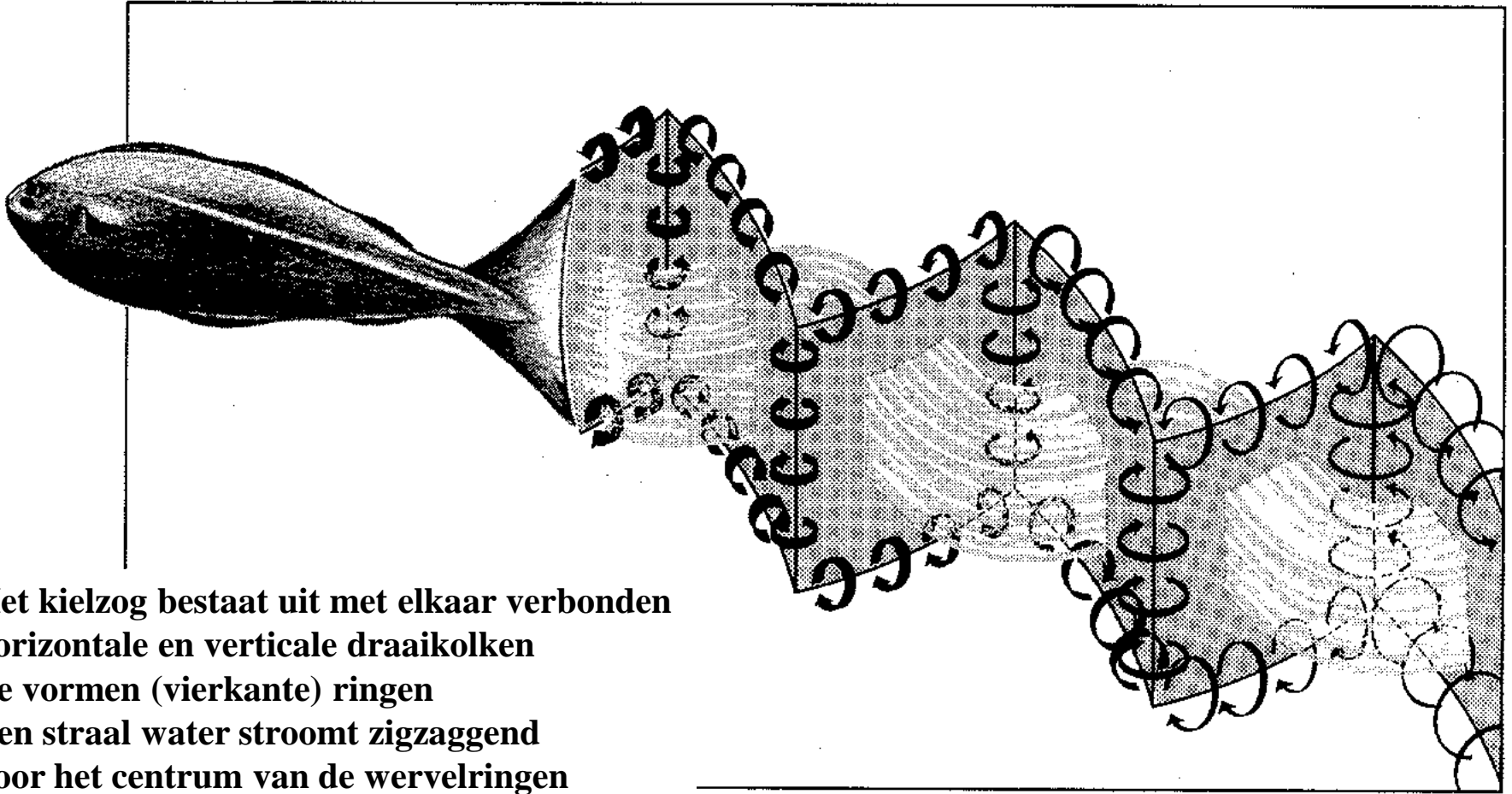
Lengte vis = 126 mm  
Snelheid  $175 \text{ mm s}^{-1}$

Kleuren

A-C = wervelingen

D = wervelcentra

## In drie dimensies:



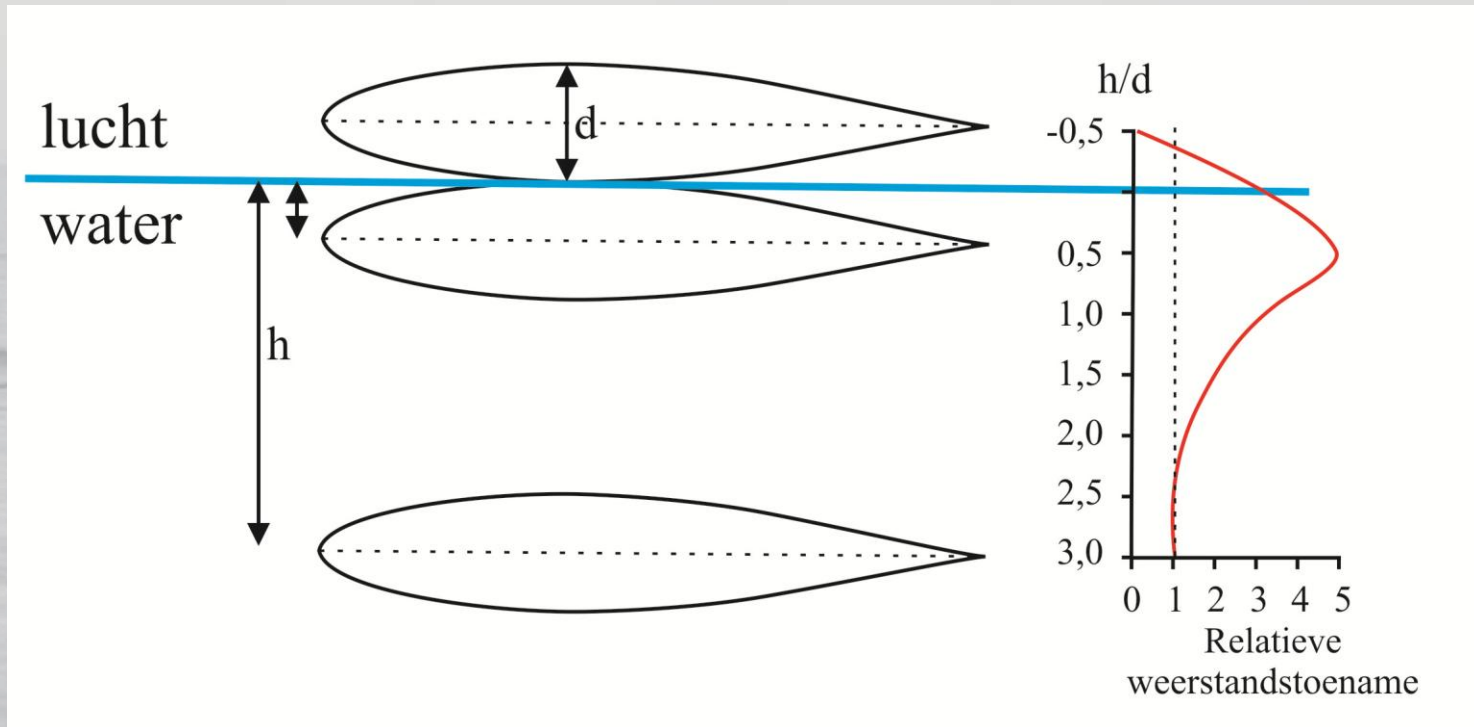
**Het kielzog bestaat uit met elkaar verbonden  
horizontale en verticale draaikolken  
Ze vormen (vierkante) ringen  
Een straal water stroomt zigzaggend  
door het centrum van de wervelringen**

Zwemmers moeten ook water zoveel mogelijk naar achteren en niet opzij stuwten  
Om te weten hoe dat moet is het noodzakelijk de stroming zichtbaar te maken met PIV

# Aan het oppervlak!

## Golfweerstand

Oorzaak: water wordt opgetild



De weerstand vlak onder de waterspiegel is 5 maal zo hoog als op een diepte van 3 x de diameter (Hertel, 1966)



# Aan het oppervlak!

Weinig dieren zwemmen daar!

## Rompsnelheid

$$V_r = 0,45 \sqrt{g L_w}$$

$V_r$  = de rompsnelheid ( $\text{m s}^{-1}$ )

$g$  = versnelling van de zwaartekracht ( $9.82 \text{ m s}^{-2}$ )

$L_w$  = lengte op de waterlijn (m)

0,45 = het maximale dimensieloze Froude getal

Rekenvoorbeeld:

$$L_w = 2 \text{ m}$$

$$\text{Rompsnelheid} = 2 \text{ m s}^{-1}$$

$$100 \text{ m in } 50 \text{ s}$$

$$L_w = 1,75 \text{ m}$$

$$\text{Rompsnelheid} = 1,86 \text{ m s}^{-1}$$

$$100 \text{ m in } 54 \text{ s}$$



Gevangen tussen boeggolf en hekgolf



# Aan het oppervlak!

## Spatweerstand

Oorzaak: water wordt omhoog gegoid

Bewegende extremiteiten slaan liters water de lucht in. Elke liter is 1 kg, en vertegenwoordigt een kracht van 10 N.

Een ronde boeg is prima onder water maar spat meer aan het oppervlak  
Een scherpe boeg spat minder.



### **Biologische oplossingen om wrijvingsweerstand te verminderen:**

Slijm met eiwitten die lange moleculaire ketens afgeven (stayers onder de vissen)

Olieachtige substantie die wordt afgescheiden door zwaardvissen

Ruw oppervlak voor dunnere grenslaag bij versnellende vissen

Schubben met groefjes in de lengterichting bij haaien

Verwarming van de grenslaag (viscositeit neemt af)

### **Biologische oplossingen om vormweerstand te verminderen:**

Gestroomlijnd lichaam

Viskeuze drukopvang in het huidoppervlak, onderhuidse ruimte met gaten

Dynamische drukopvang door vervormen van de huid

Versnelling van de grenslaag door inspuiten van water

### **Biologische oplossingen om golf- en spatweerstand te verminderen:**

Scherpe boegstructuur

Planeren

### **Biologische oplossingen om geïnduceerde weerstand te verminderen:**

Optimaliseren van voortstuwende vlakken, subtiel vervormbare vinnen.

Zwemmen in formaties

De rode mogelijkheden zijn niet of slecht onderzocht!

# Wat kunnen zwemmers van de natuur leren?

Niet spatten

Zo lang mogelijk onder water zwemmen

Op minimaal drie maal de rompdiameter diepte

Waterbeweging rond zwemmer moet achterwaarts gericht zijn

Een effectieve methode:

