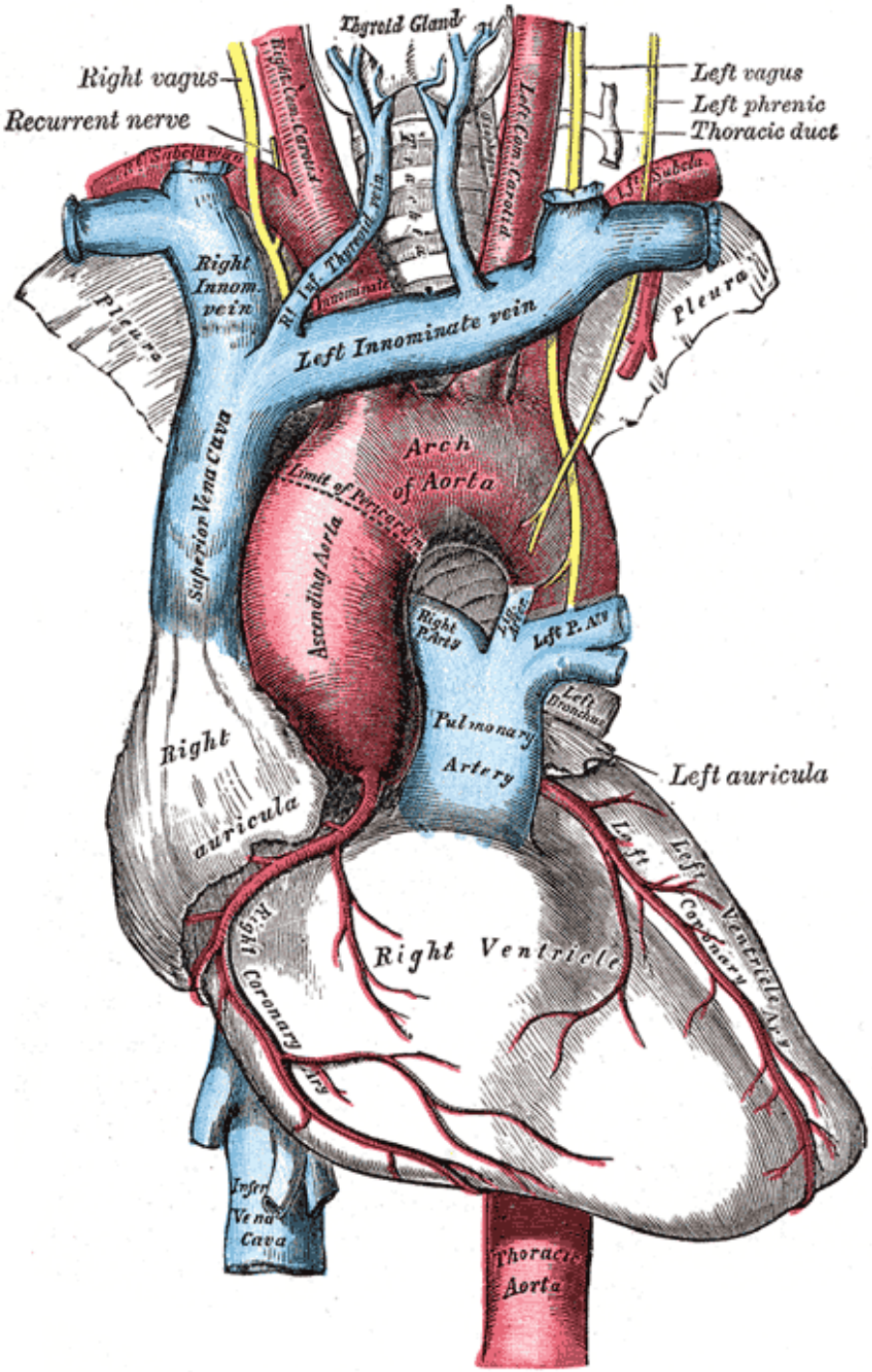
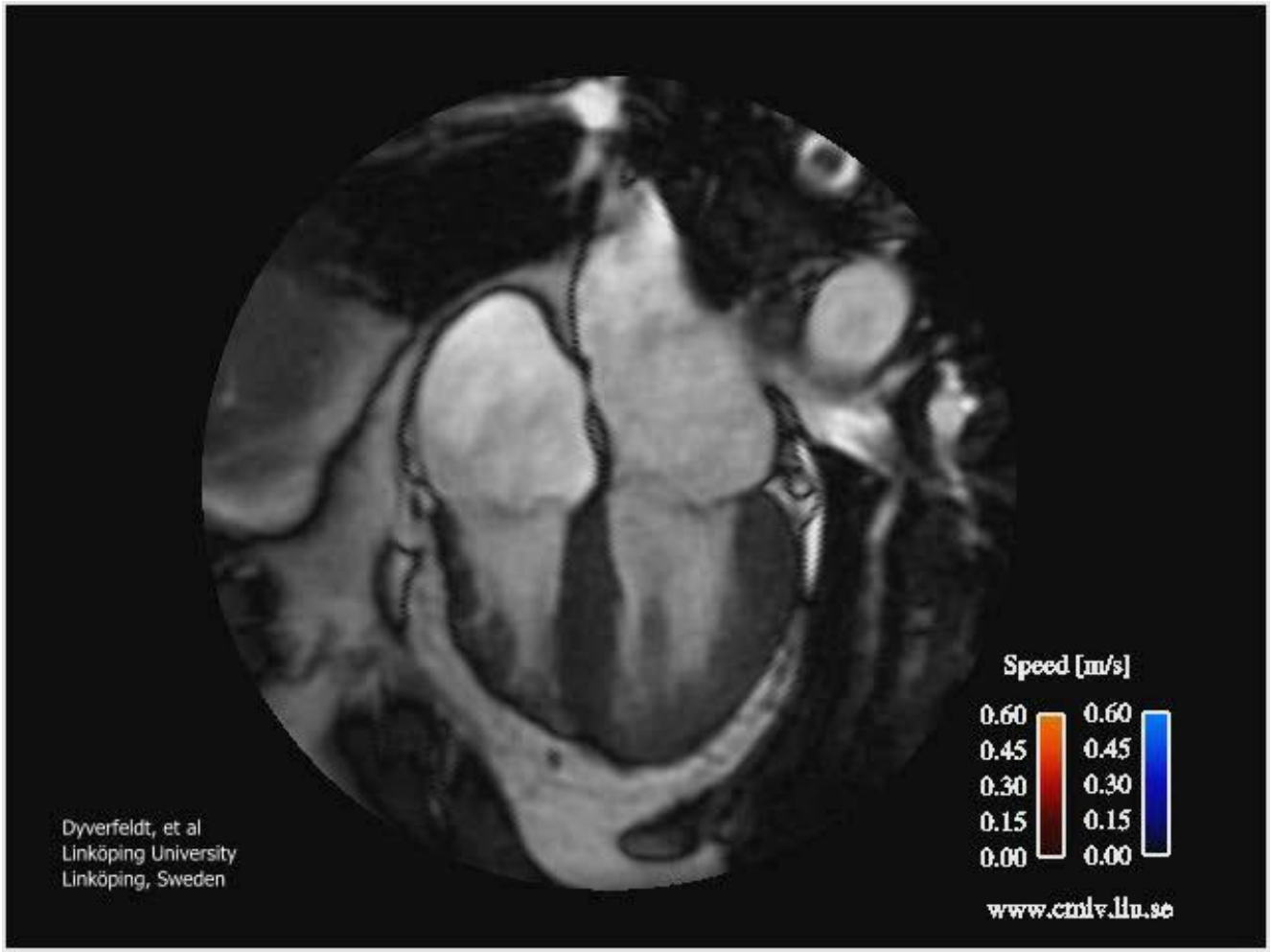
Hierarchical modeling of cardiovascular biomechanics – macro, meso and micro and beyond

Matts Karlsson
Applied Thermodynamics and Fluid Mechanics &
Biomedical Modelling and Simulation
Linköping University

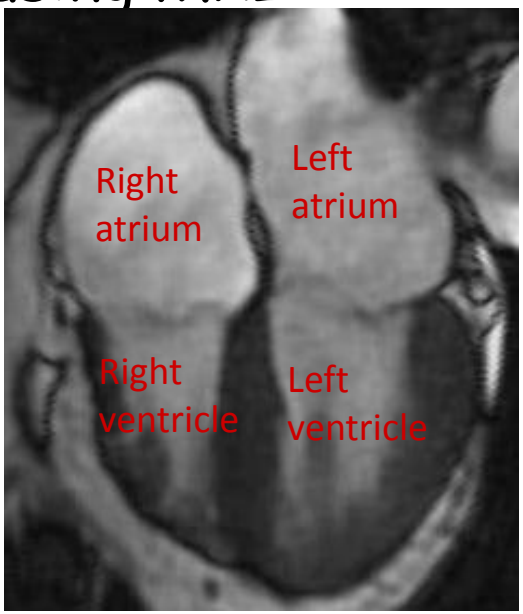

Thyroid Gland
Right vagus
Recurrent nerve
Left vagus
Left phrenic
Thoracic duct
Right Innom. vein
Left Innominate vein
Pleura
Arch of Aorta
Superior Vena Cava
Ascending Aorta
Right P. Arty
Left P. Arty
Pulmonary Artery
Right auricula
Left auricula
Right Ventricle
Thoracic Aorta

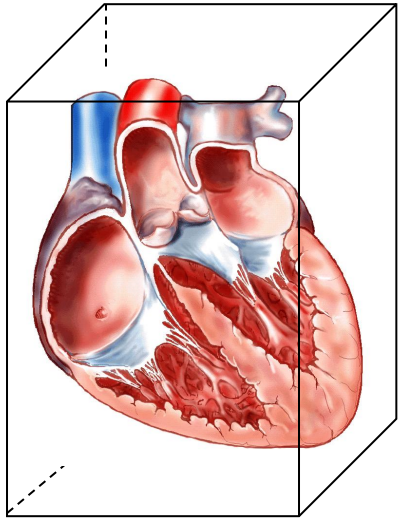

LIFE
SCIENCE
– ett livsviktigt val
4 juli 2006
kl 15-17
Kårhuset Rindi
Visby
Flytta fram positionerna inom Life Science.
Sverige ska vara bland de bästa.
Life Science har potential att vara en av Sveriges främsta branscher även fortsättningsvis. Men den internationella konkurrensen ökar och det krävs därför en medveten satsning på Life Science i Sverige. Det finns flera saker som påverkar branschens utveckling. Vi ser kraftigt ökande kostnader för FoU, ökade krav från allmänheten på nya och effektiva behandlingar och hårdare global konkurrens mellan företagen samt mellan olika länder om företagsetableringar. Sverige är bra men inte bäst på forskningsinvesteringar.
Idag satsar svenska staten 0,79 procent av BNP på civil forskning. Att jämföra med Finland som satsar 1,03 procent. Flera av de konkurrerande länderna, till exempel Irland, Frankrike och Norge, satsar mer än Sverige. Konkurrensen handlar först och främst om innovationerna. Det är av stor betydelse att inno-
Några åtgärder är nödvändiga att införa genast. För att Sverige ska hänga med övriga länder i EU måste regeringen snarast satsa 1 procent av BNP på civil forskning. För att dessutom kunna behålla en tätposition internationellt behöver forskningssatsningarna öka till en högre andel av BNP. Forskande företag behöver fördelaktiga villkor i form av skatteincitament. Forskarnas villkor måste förbättras med tydliga karriärvägar, bättre anställningstrygghet och bättre löneutveckling.
Sverige har ett bra utgångsläge i form av ledande forskare och duktiga företag. Men det är avgörande för Sveriges framtid att det politiska systemet skapar förutsättningar för Life Science utveckling och expansion.
Vid CMIV – Centrum för medicinsk bildbehandling och visualisering och på NSC – Nationellt Superdator Centrum, vid Linköpings universitet, håller en forskargrupp på med att skapa individspecifika modeller som kan användas för diagnos, interventionsplanering och uppföljning av åderförkalkning. Detta är möjligt genom att man med hjälp av magnetkameran kan göra noggranna bilder av kärlets form och utseende och därefter återskapa det i en dator som en geometrisk modell. Denna geometri ligger sedan till grund för en datorsimulering av hur blodet strömmar inne i kärlet. På så vis kan man studera i detalj hur kärlväggen påverkas av strömningen. Genom denna metod kan man hitta riskområden i kärlen på ett mycket tidigt stadium.
Nationell hälsa eller kan Sverige hälsa hem?
Life Science – ett livsviktigt val
Programmet i sin helhet.
Life Science – a strategic choice for improving national health and increasing national wealth in the UK
Sally Davies, professor, Director of Research & Development, Department of Health, UK
The British example – lessons and implications for Sweden
Ingemar Kihlström, finansanalytiker Life Science, Lars Wämgård, avdelningschef Vinnova
Politik för nationell hälsa och välstånd
Per Bill (m), Conny Öhman (s)
Diskussion om den svenska politiken ur ett internationellt perspektiv
Moderator: Anders Milton
Delar av seminariet kommer att hållas på engelska

Time-resolved 3D Flow Assessment using MRI



Particle trace visualization of blood flow in the left (red) and right (blue) side of the heart





Cardiovascular MR group: T. Ebbers, P. Dyverfeldt, et al. www.liu.se/cmr

$$Q = b_1 E_{FF}^2 + b_2 (E_{CC}^2 + E_{RR}^2 + E_{CR}^2 + E_{RC}^2) + b_3 (E_{FC}^2 + E_{CF}^2 + E_{FR}^2 + E_{RF}^2)$$

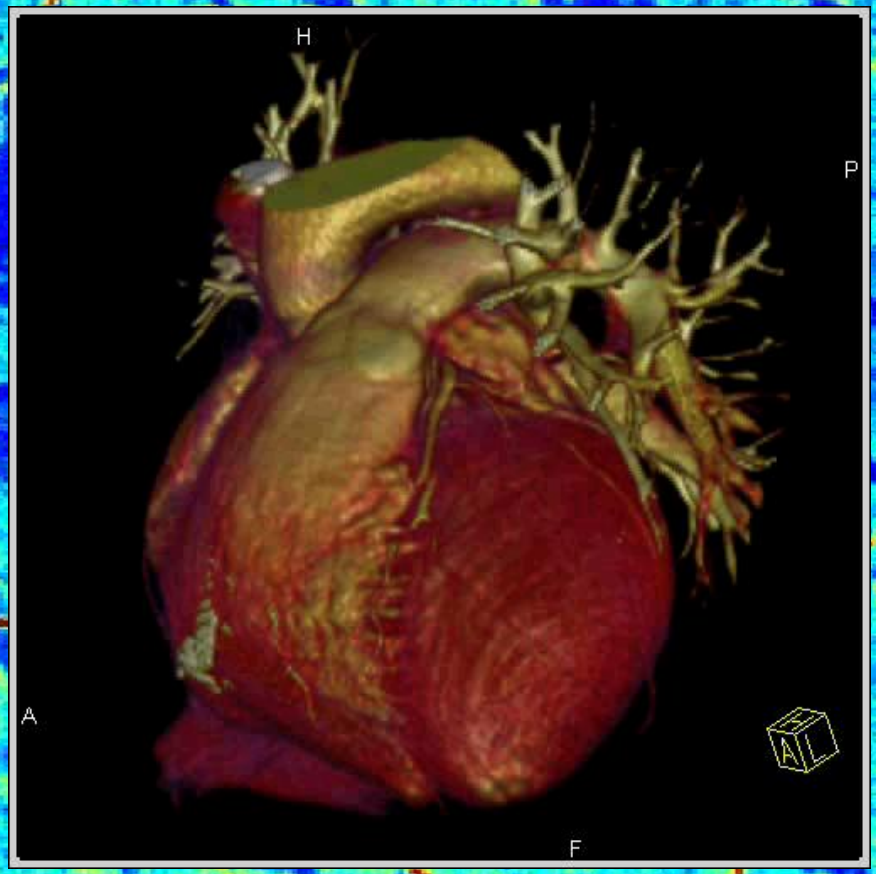
Kinematics

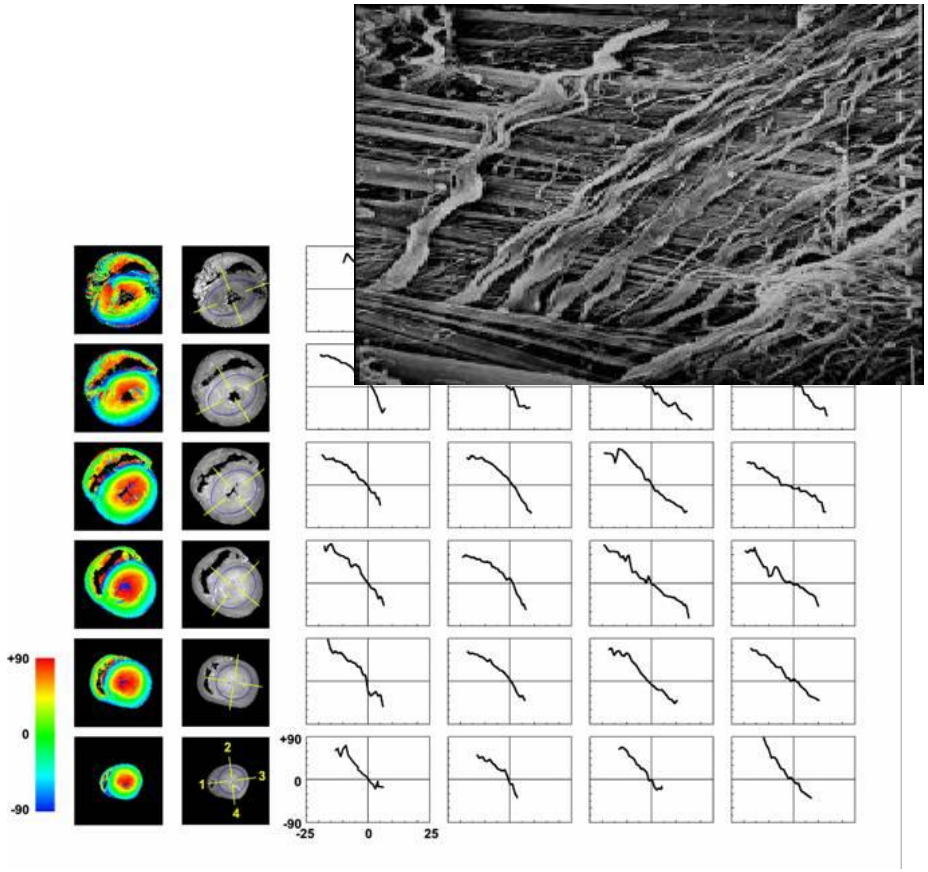
Constitutive equation

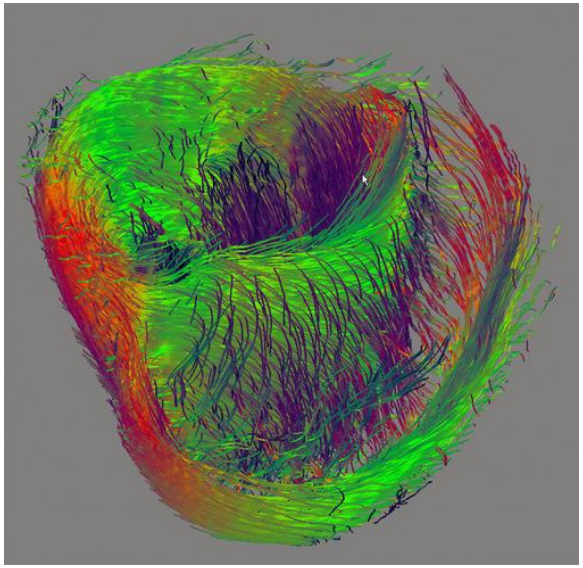
$$W = \frac{C}{2}(e^Q - 1) - \frac{1}{2} p(I_3 - 1)$$

$$P_{RS} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial W}{\partial E_{RS}} + \frac{\partial W}{\partial E_{SR}}\right)$$

Stress







past → future

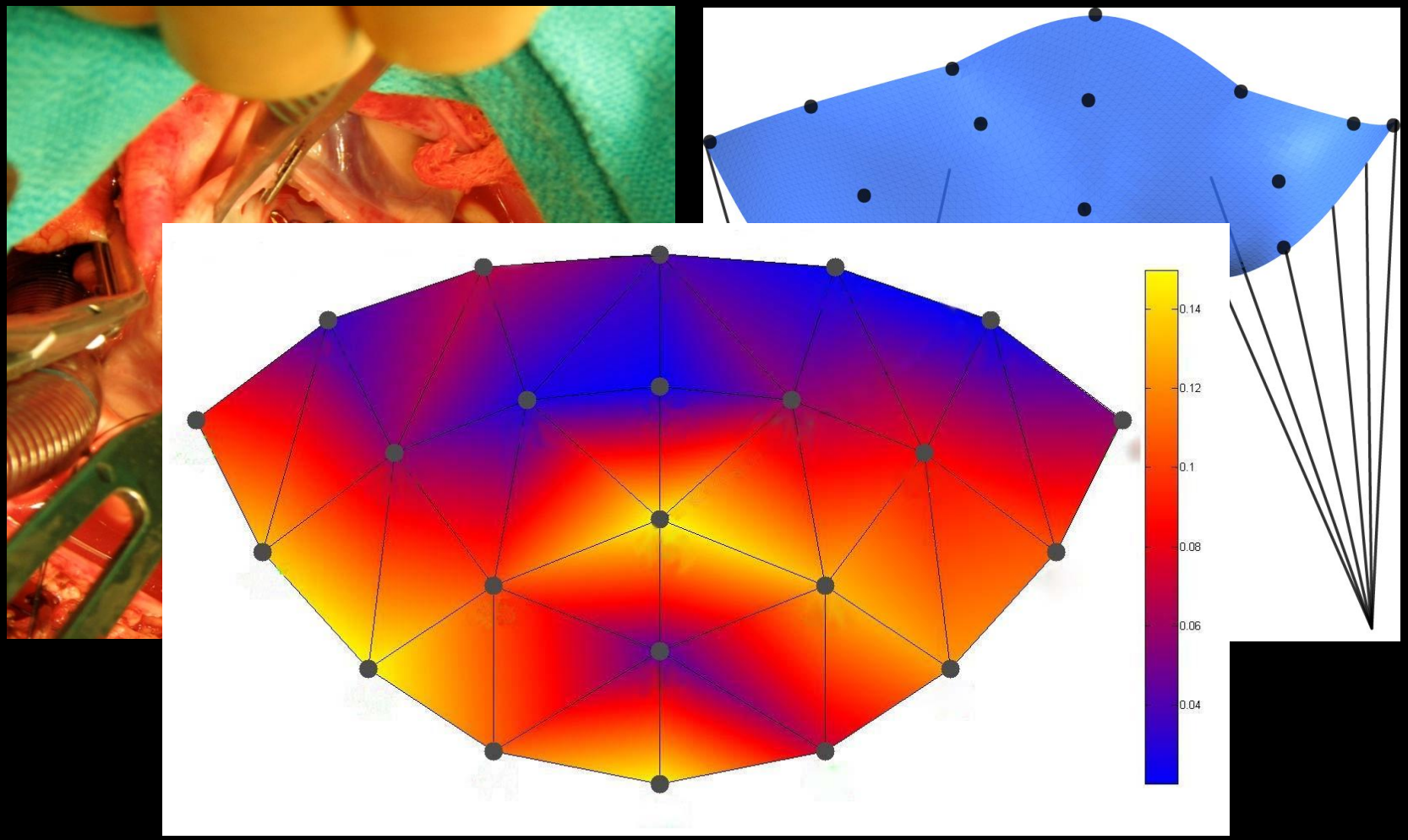
Biomechanics

*Stress = **f**(structure, load)*

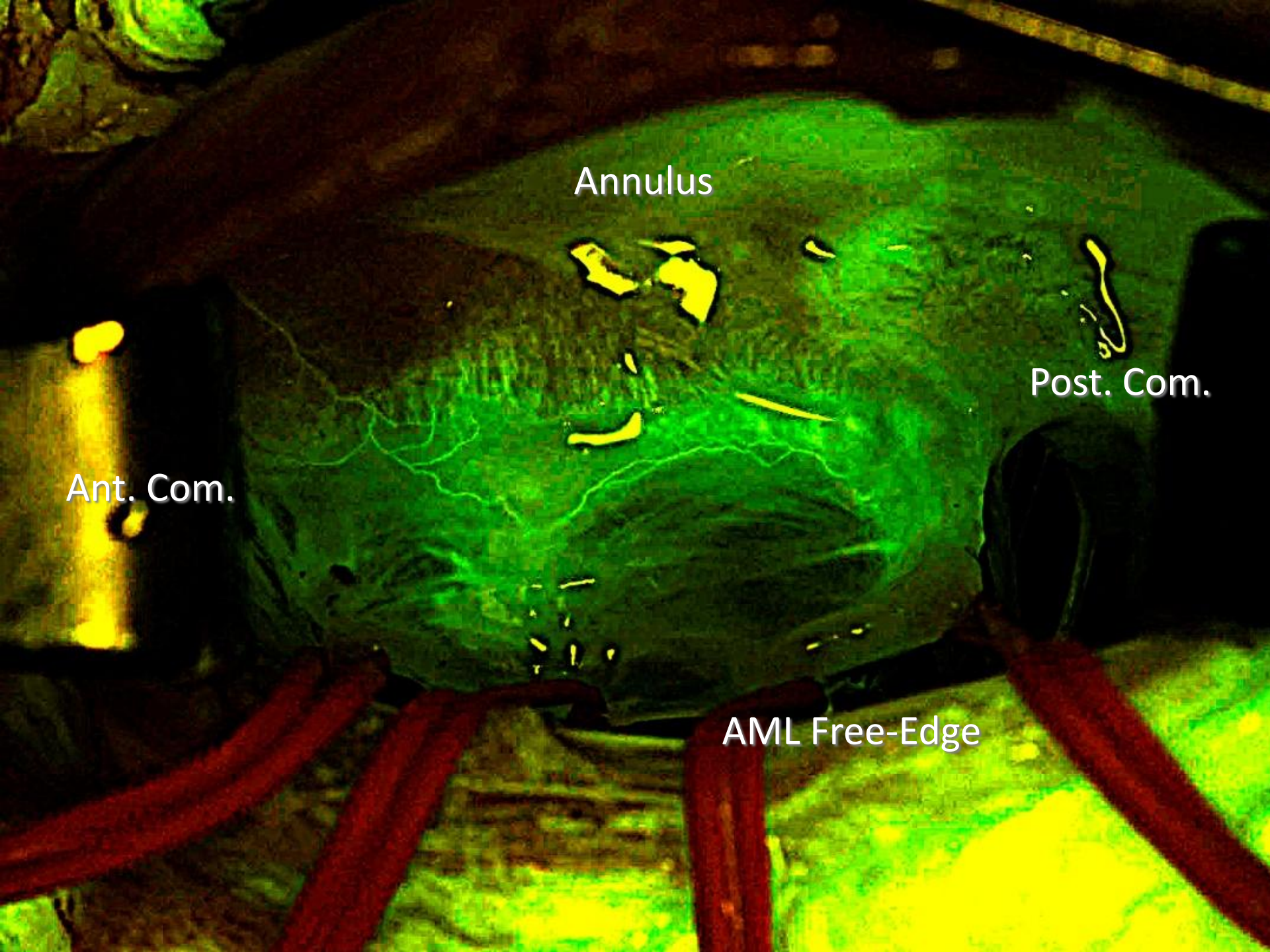
Mechanobiology

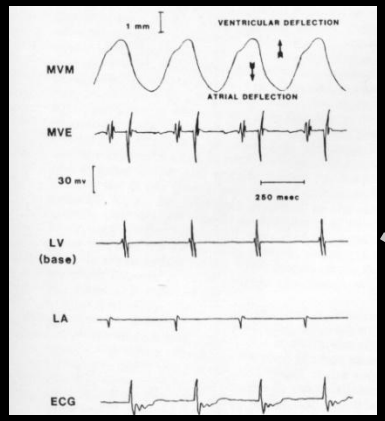
*Structure = **g**(stress)*

Surgery and engineering in symbiosis…



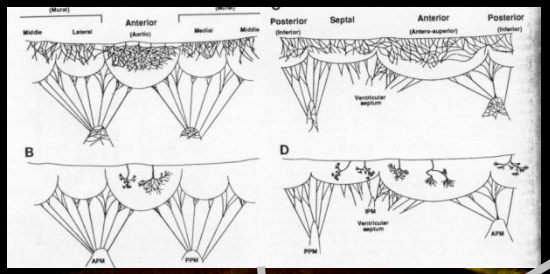
…markers meet finite elements

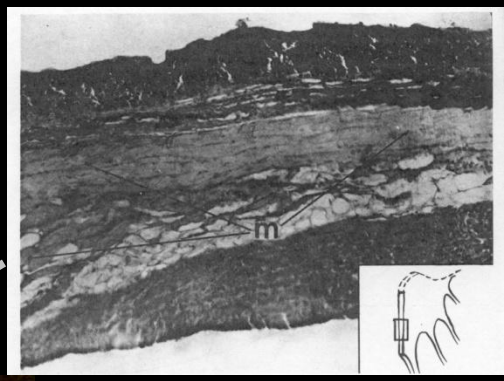

Annulus
Post. Com.
Ant. Com.
AML Free-Edge



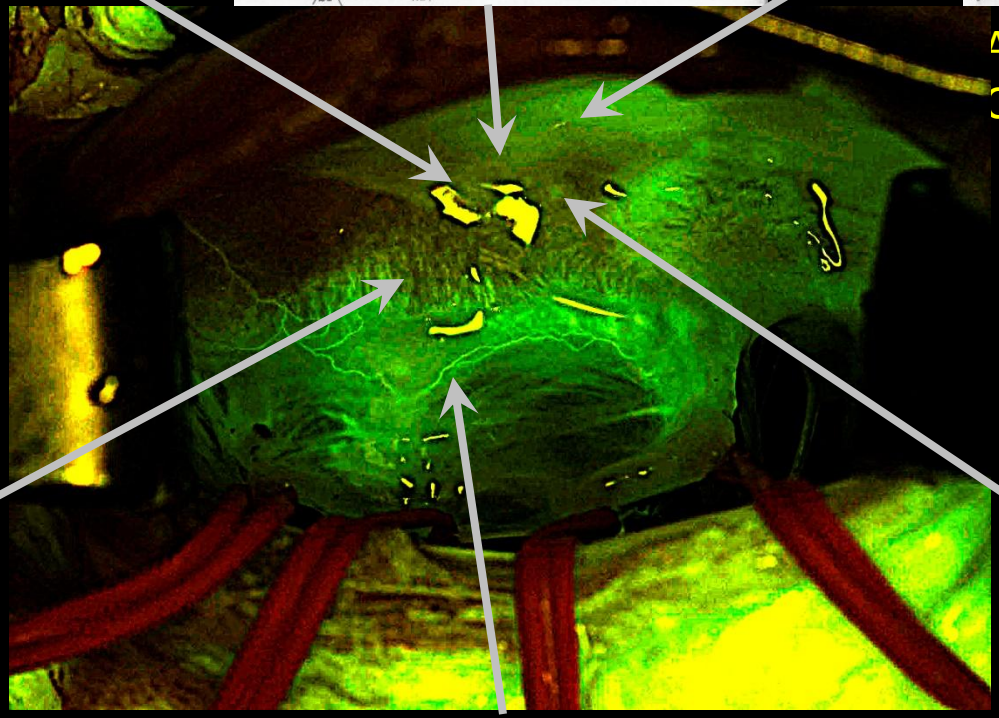
Atrial Excitation
Curtis & Priola, 1992

Sensory and Motor Nerves
Marron *et al.*, 1996



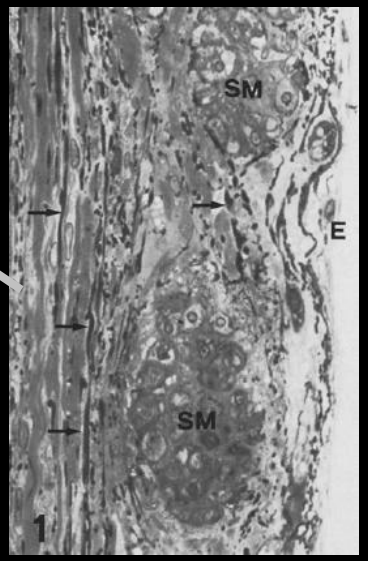


Atrial Muscle
Cooper *et al.*, 1966



Blood Vessels
Swanson *et al.*, 2008

Interstitial Cells
Taylor *et al.*, 2003

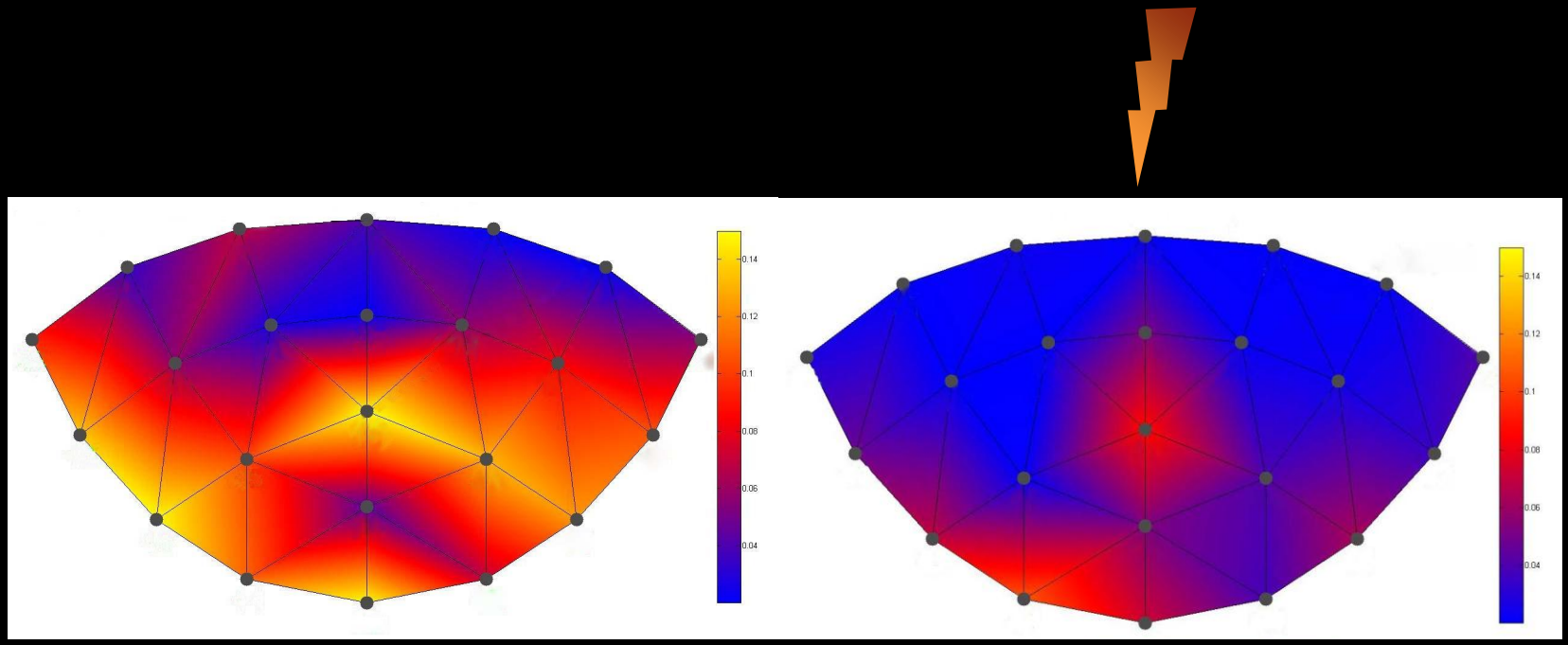


Smooth Muscle
De Biasi *et al.*, 1984

MITRAL VALVE ANTERIOR LEAFLET

Miller/Ingels et al Stanford, AJP 2008

Control vs. Electrical Stimulation: half the strain, double the stiffness

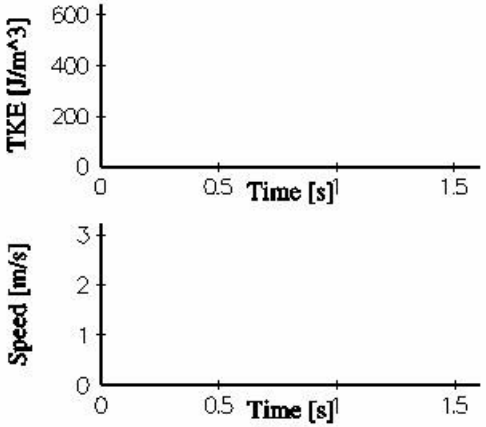


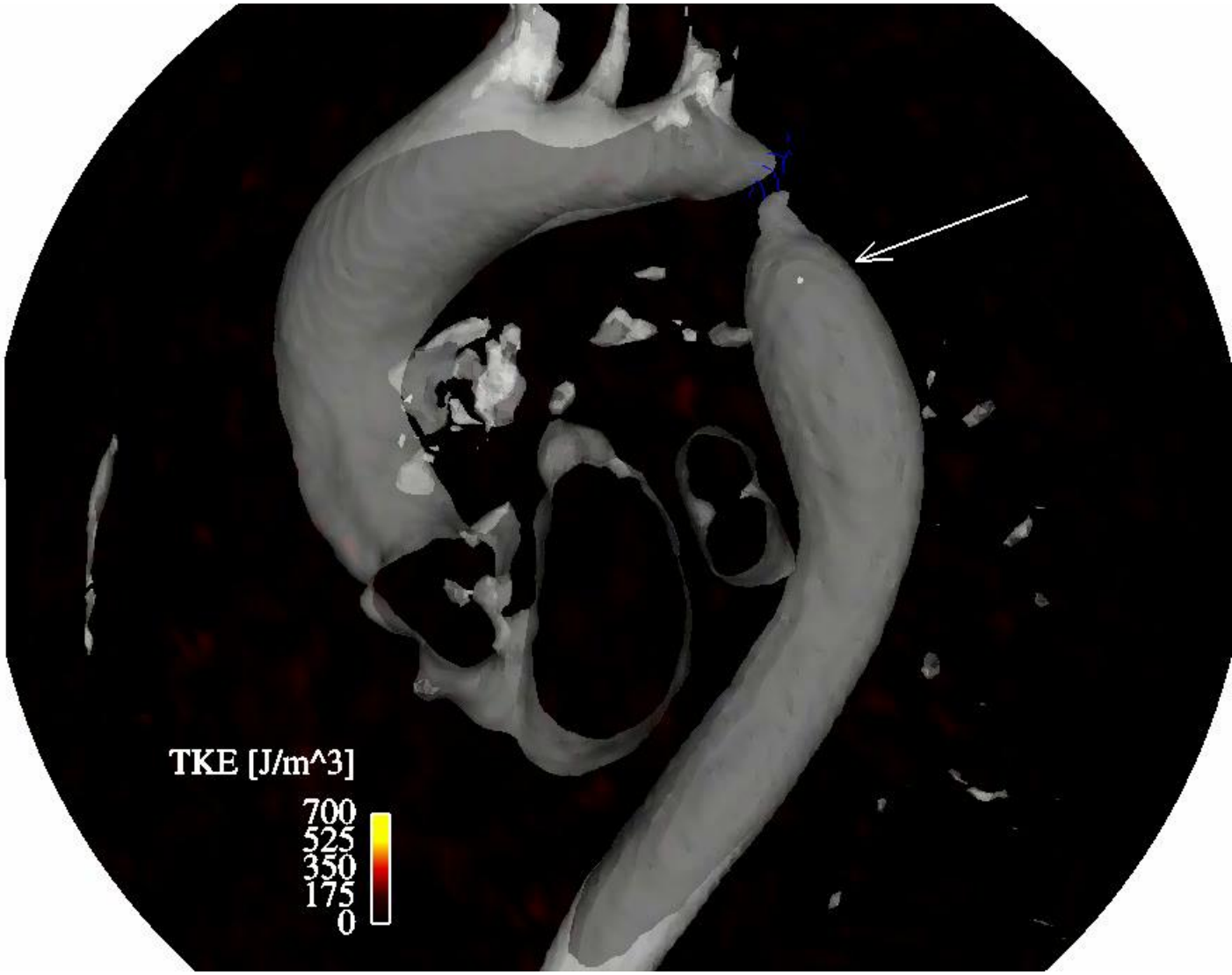
Control

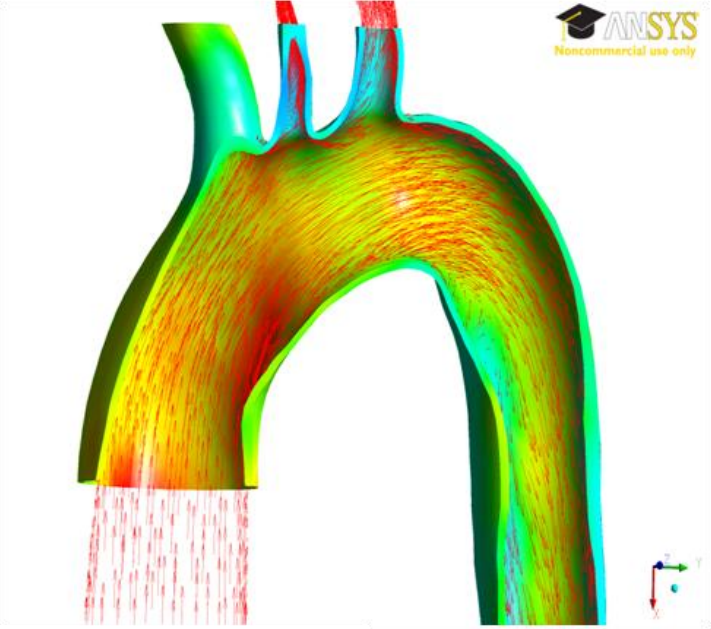
Electrical Stimulation

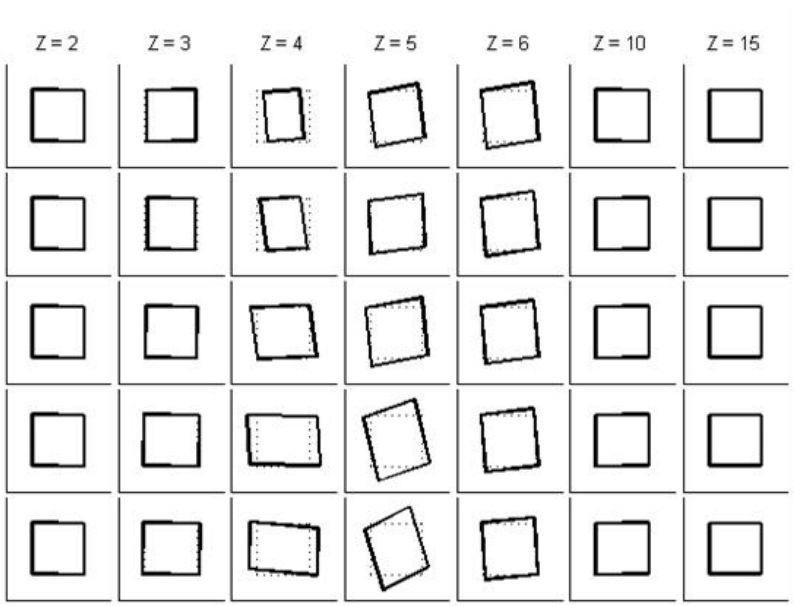
Miller/Ingels et al Stanford, AJP 2008

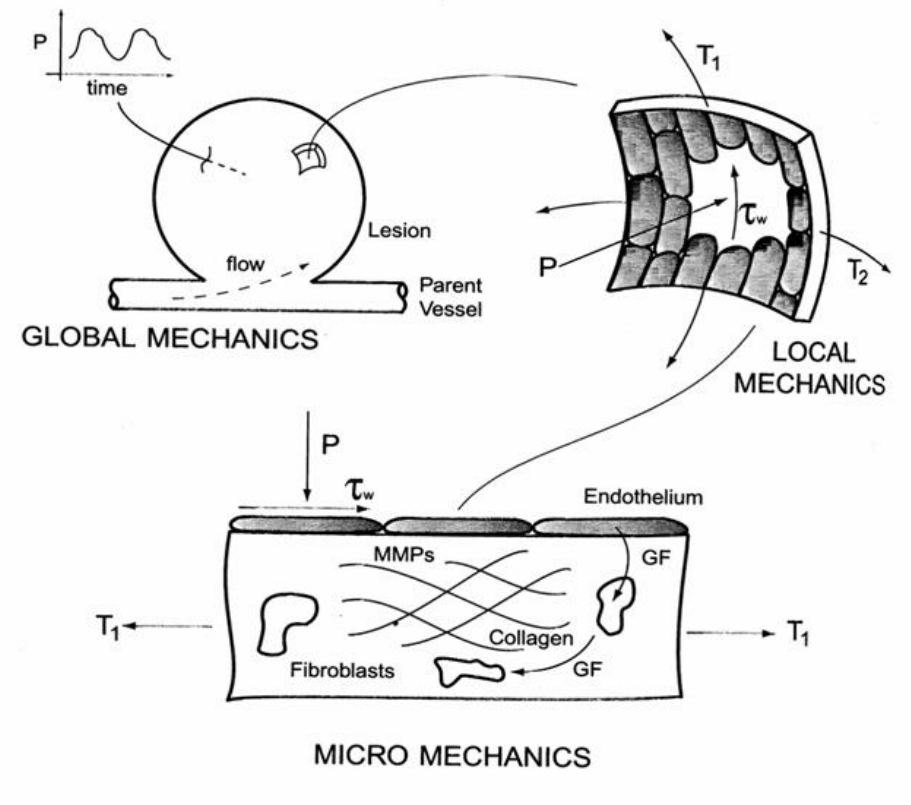
$t_{ECG} = 0.000$


TKE [J/m^3]
600
400
200
0
0
0.5
Time [s]
1
1.5
Speed [m/s]
3
2
1
0
0
0.5
Time [s]
1
1.5


TKE [J/m^3]
700
525
350
175
0


ANSYS
Noncommercial use only

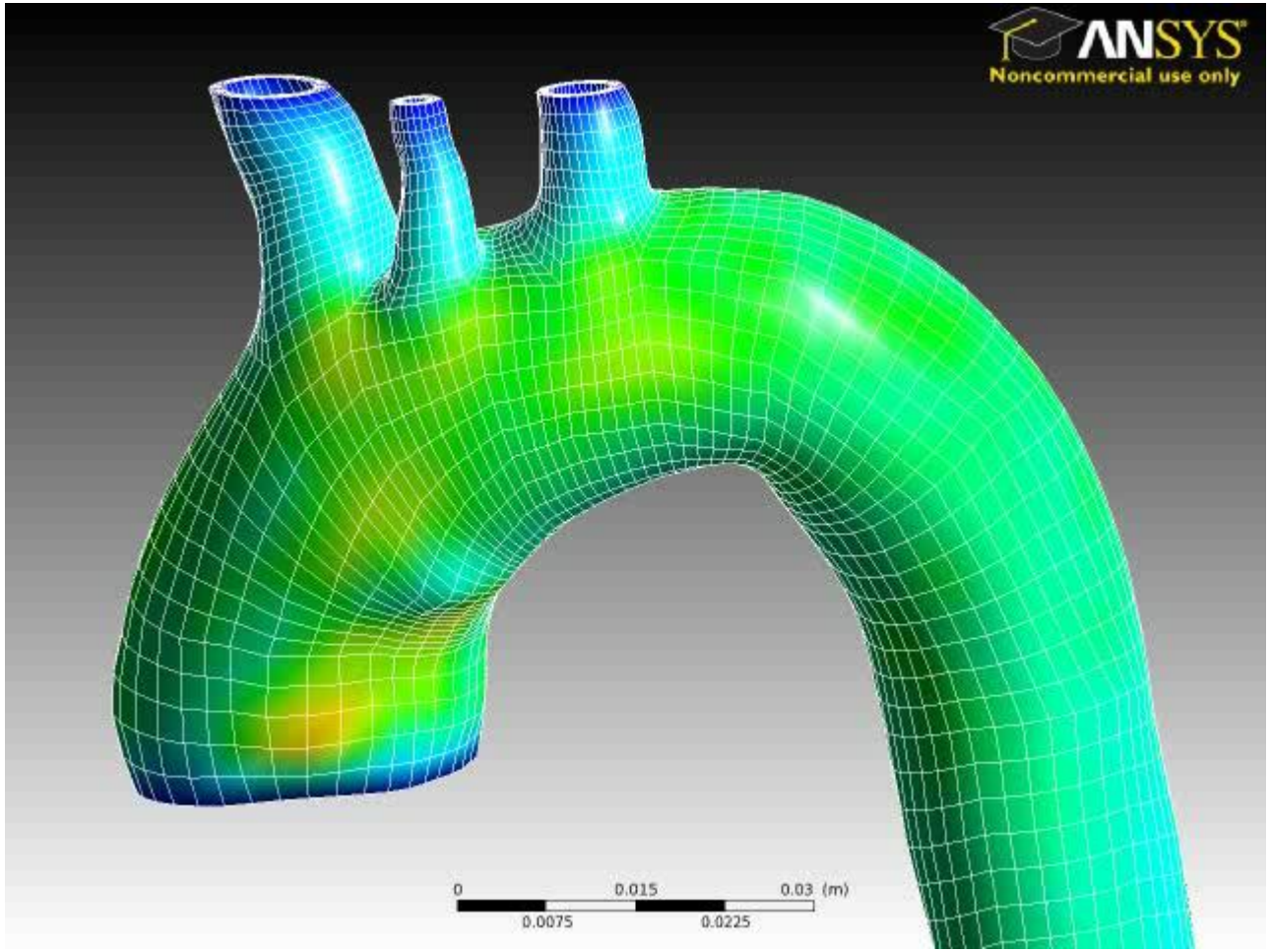

Z = 2
Z = 3
Z = 4
Z = 5
Z = 6
Z = 10
Z = 15

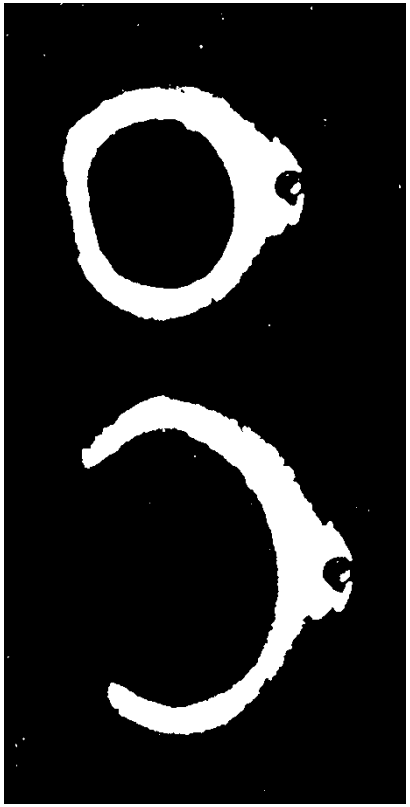

P
time
Lesion
flow
Parent
Vessel
GLOBAL MECHANICS
T1
τw
P
T2
LOCAL
MECHANICS
P
τw
Endothelium
MMPs
GF
T1
Collagen
T1
Fibroblasts
GF
MICRO MECHANICS

Individual variability: subject specific aorta

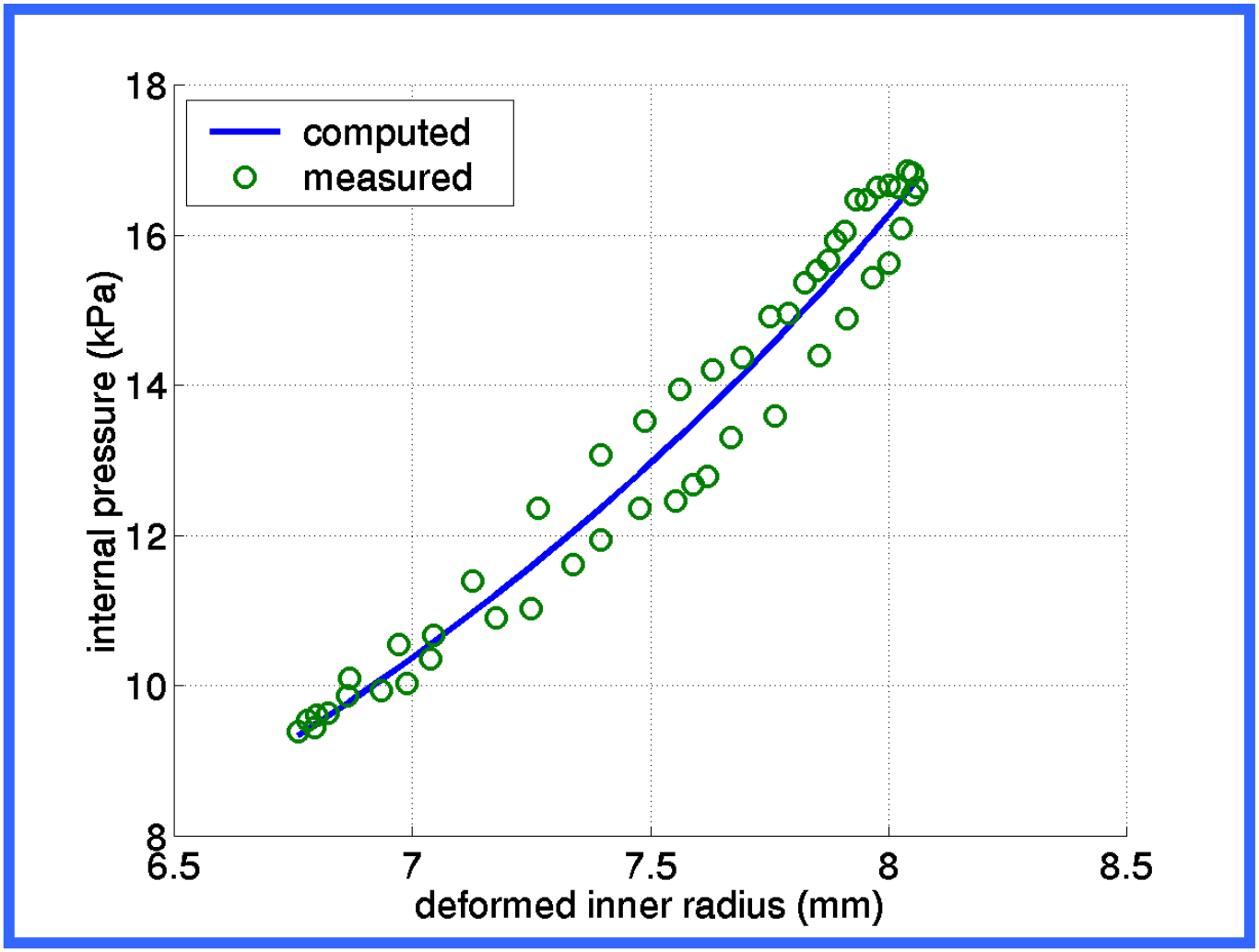
Renner et al, LiU

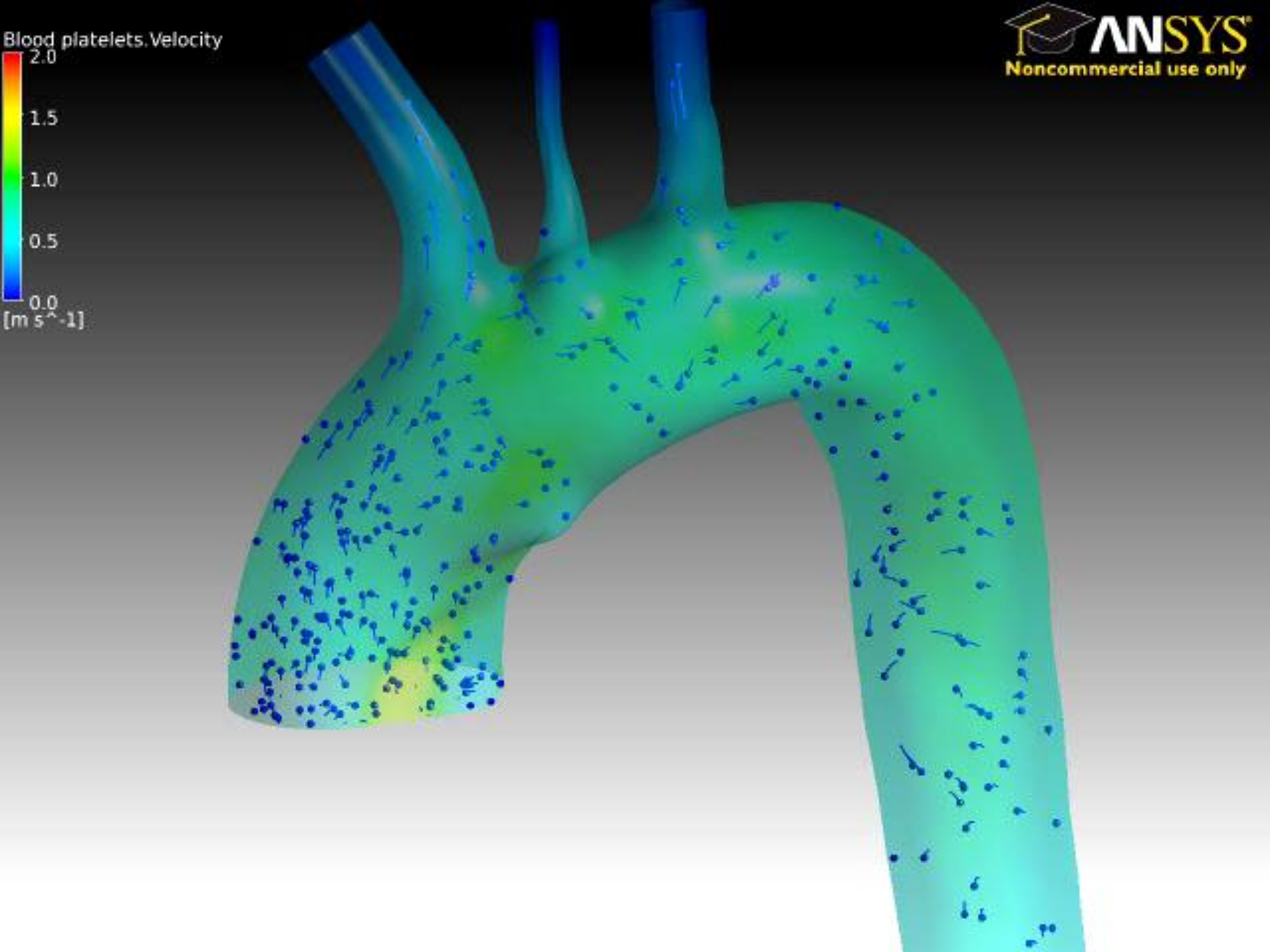
Cardio-Vascular CFD: FSI



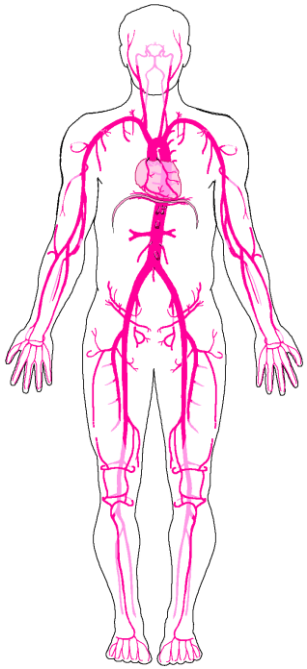


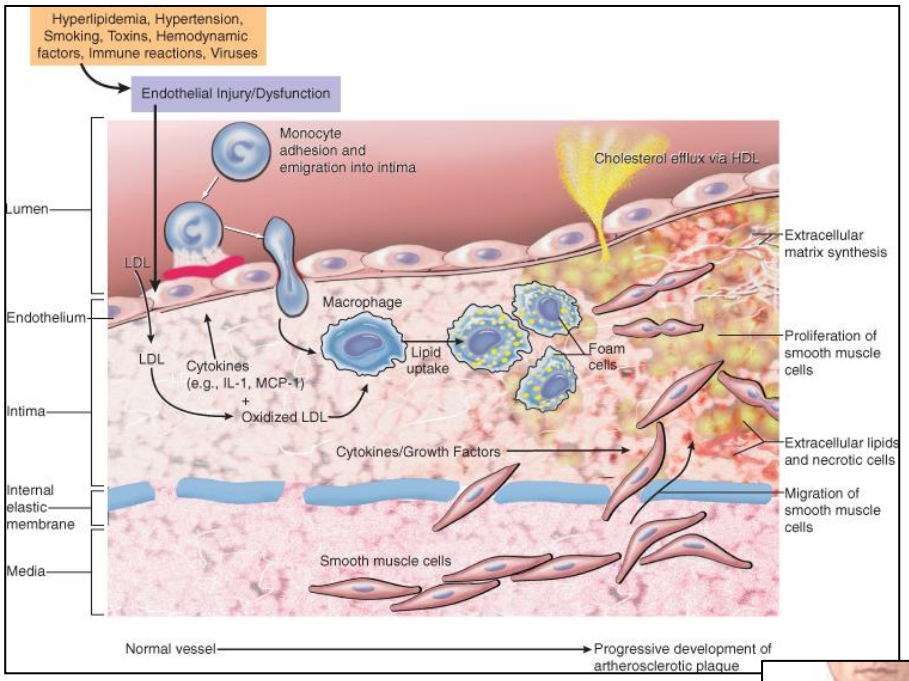
FSI – influence from the wall



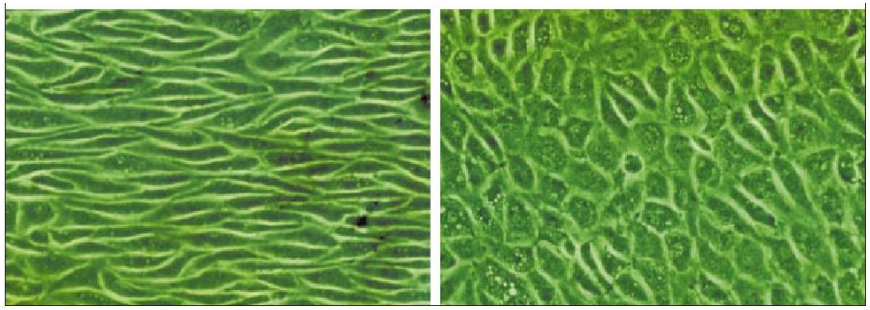

Blood platelets.Velocity
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
[m s^-1]
ANSYS
Noncommercial use only

Rationale: Atherosclerosis



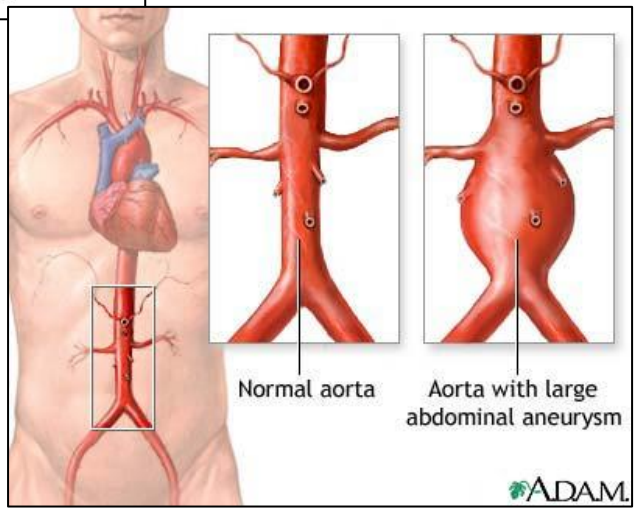


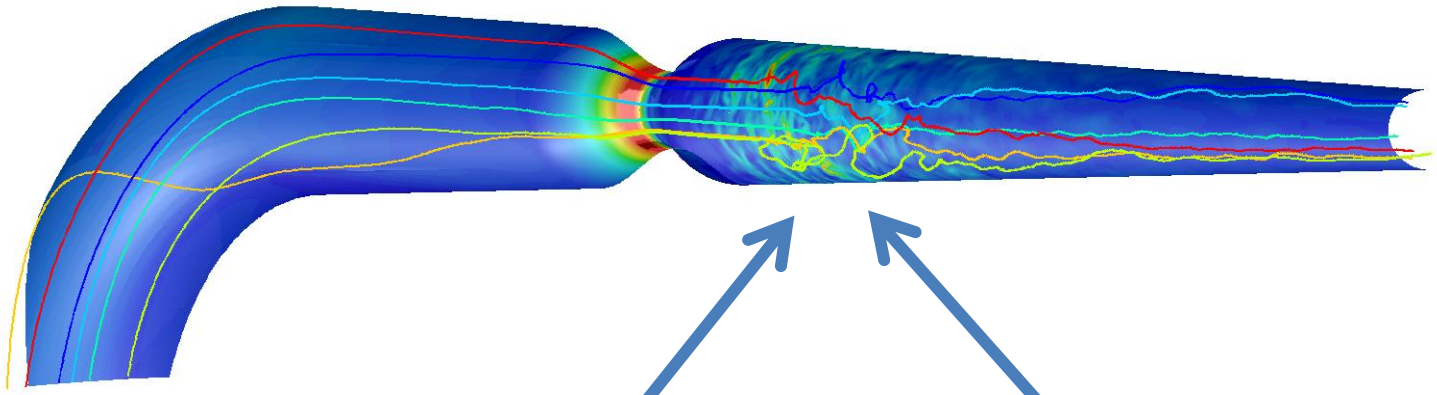
Endothelial Cells

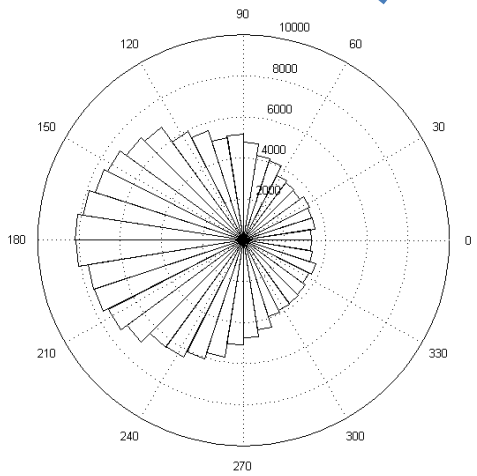


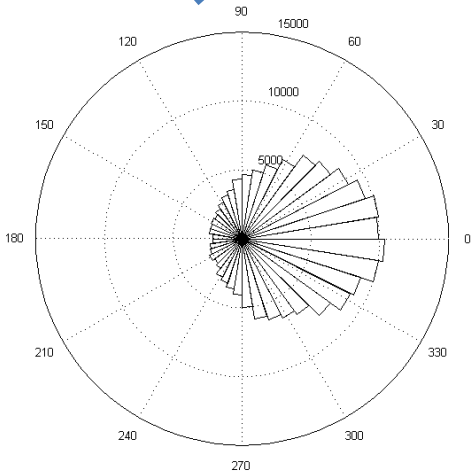
Constant WSS

Oscillating WSS






90
10000
60
120
8000
6000
150
30
4000
2000
180
0
210
330
240
300
270


90
15000
60
120
10000
150
30
5000
180
0
210
330
240
300
270

Z=3D

Z=4D

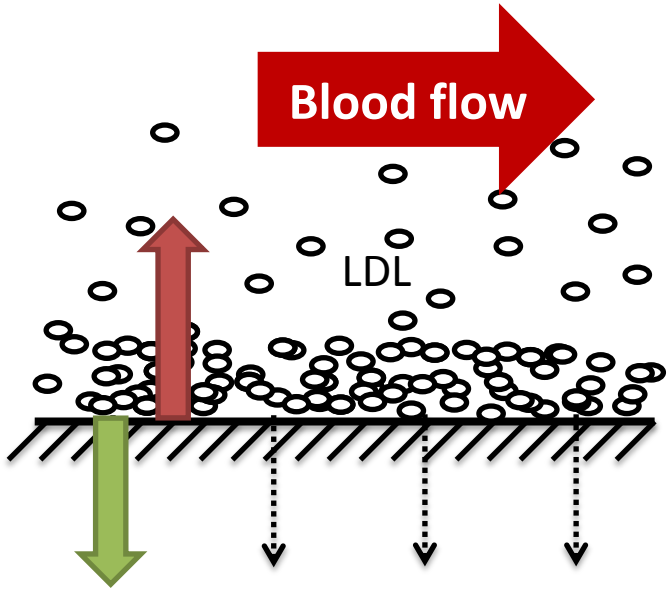
LDL (Colesterol) Modeling

Passive scalar transport equation, C = LDL

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}C) = \nabla \cdot \left(\left(D + \frac{\nu_\tau}{Sc_t} \right) \nabla C \right)$$

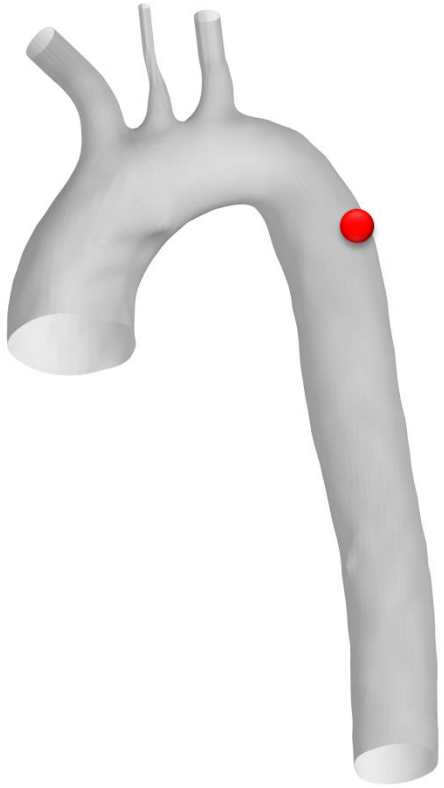
with the BC*:

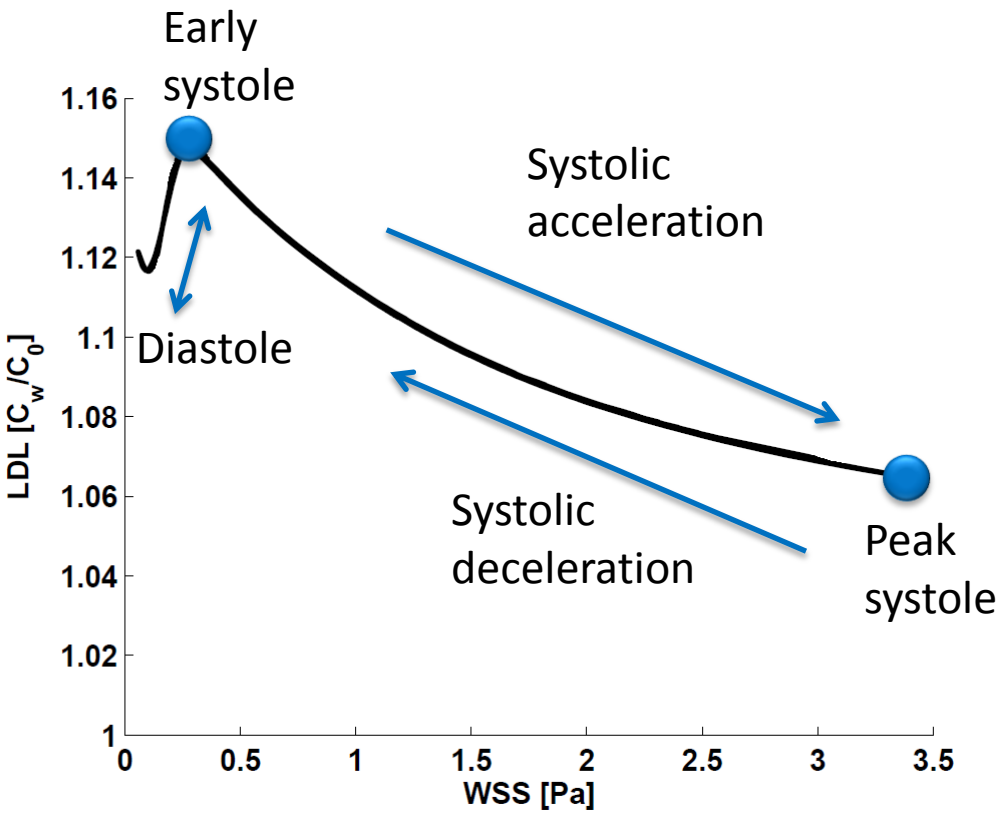
$$C_w V_w - \boxed{D \frac{\partial C}{\partial n}\Big|_w} = K_w C_w$$



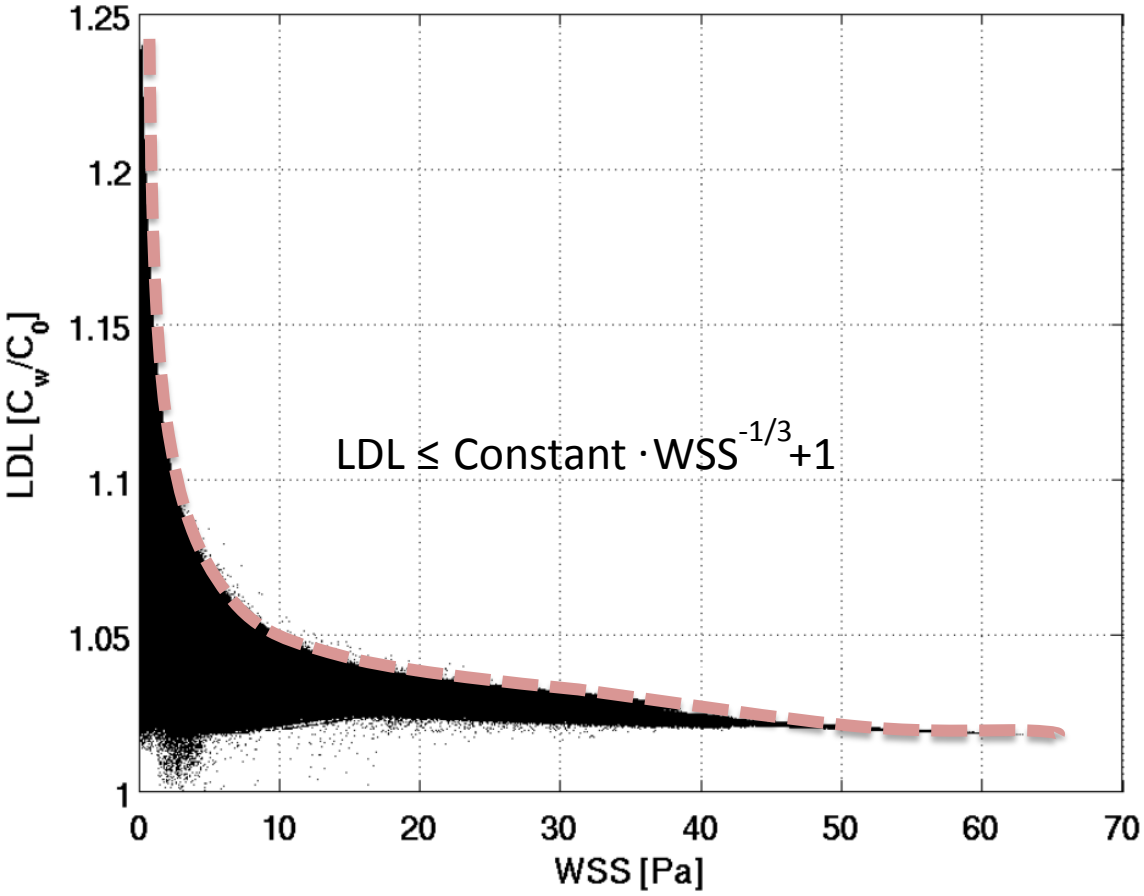
* Wada and Karino, *Biorheology 39, 1999*

WSS and LDL

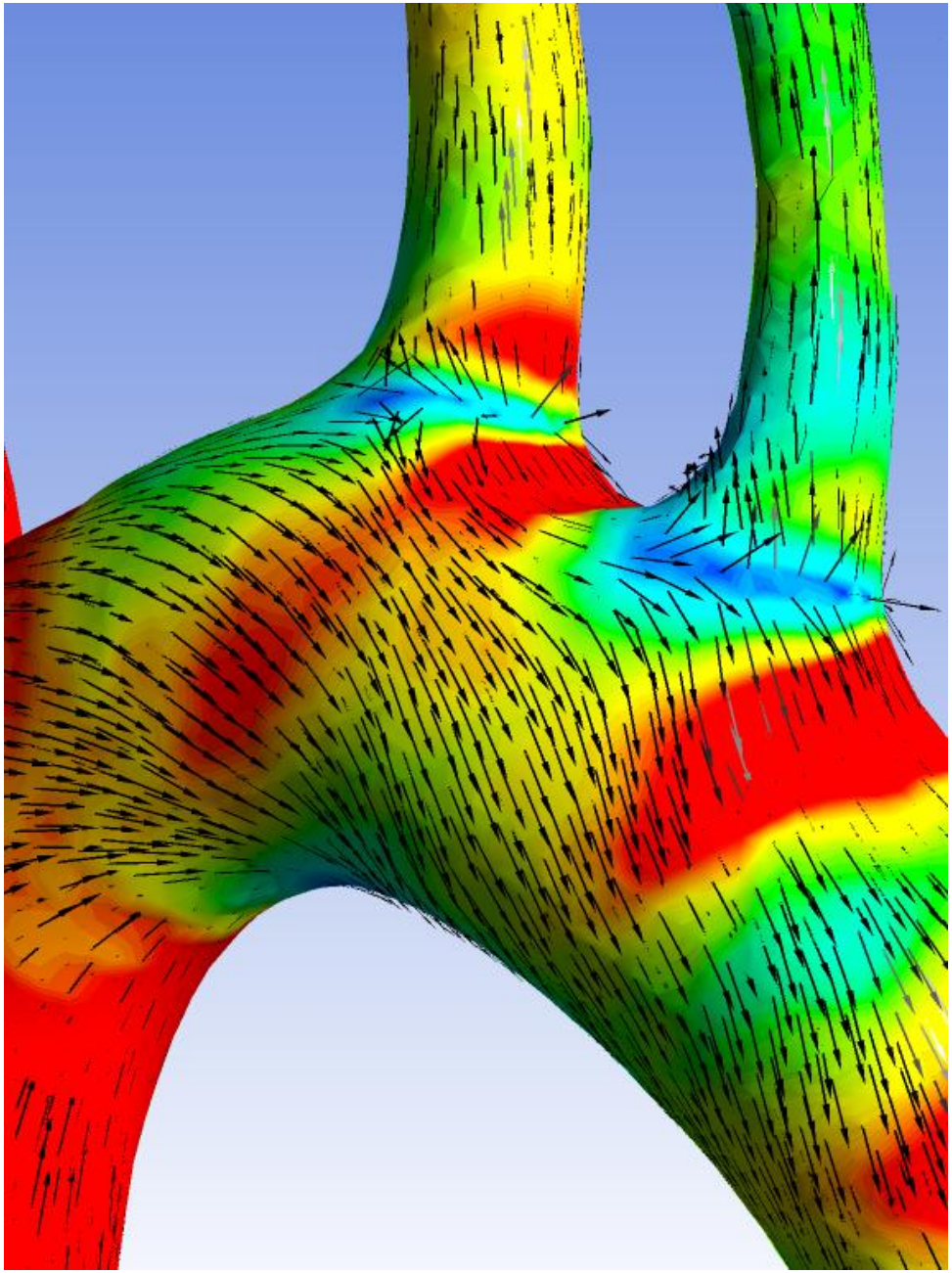



Early systole
Systolic acceleration
Diastole
Systolic deceleration
Peak systole
LDL [C_w/C_0]
1.16
1.14
1.12
1.1
1.08
1.06
1.04
1.02
1
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
WSS [Pa]

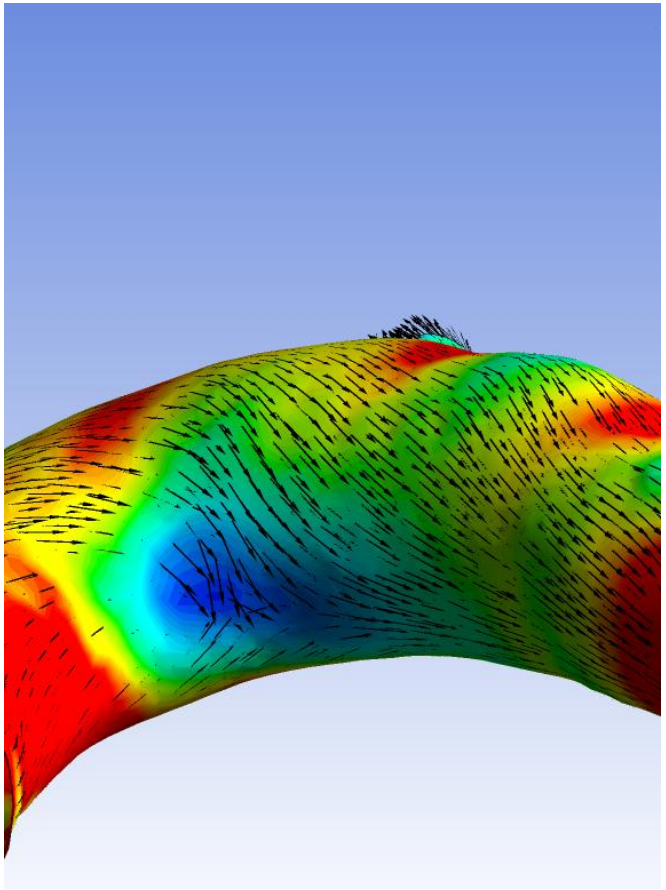
WSS and LDL



50 cardiac cycles, approx. 2.5 Billion points



WSS (rat)



Länne: Atherosclerosis tomorrow!