

Hoe staat het met Fusie ?

Enkele aspecten in minder dan een uur !

Nico van der Kleij

Waarom Fusie ?

Wereld energieverbruik over 20 jr
45% meer

Wereld voor 80% afh. van fossiel

Duurzaam kan het gat niet opvullen

Duurzaam + splijting + fusie



Iedere seconde zet de zon 600 miljoen ton waterstof om 596 miljoen ton helium.

19-04-2016

KIVI Nrd Scharwoude

Deuterium



3,5 MeV

Hélium



Fusion



Energy

14,1 MeV



Neutron

Tritium

Hoeveel energie komt er vrij?

Kolencentrale van 1000 MW verbruikt
2,3 miljoen ton kolen per jaar

Een fusiecentrale van 1000 MW
verbruikt 250 kg D-T mengsel per jaar

Fuseren van atoomkernen gaat niet vanzelf

- Coulomb kracht (afstotend) $1/r^2$
- Kernkracht (aantrekkend) $1/r^7$

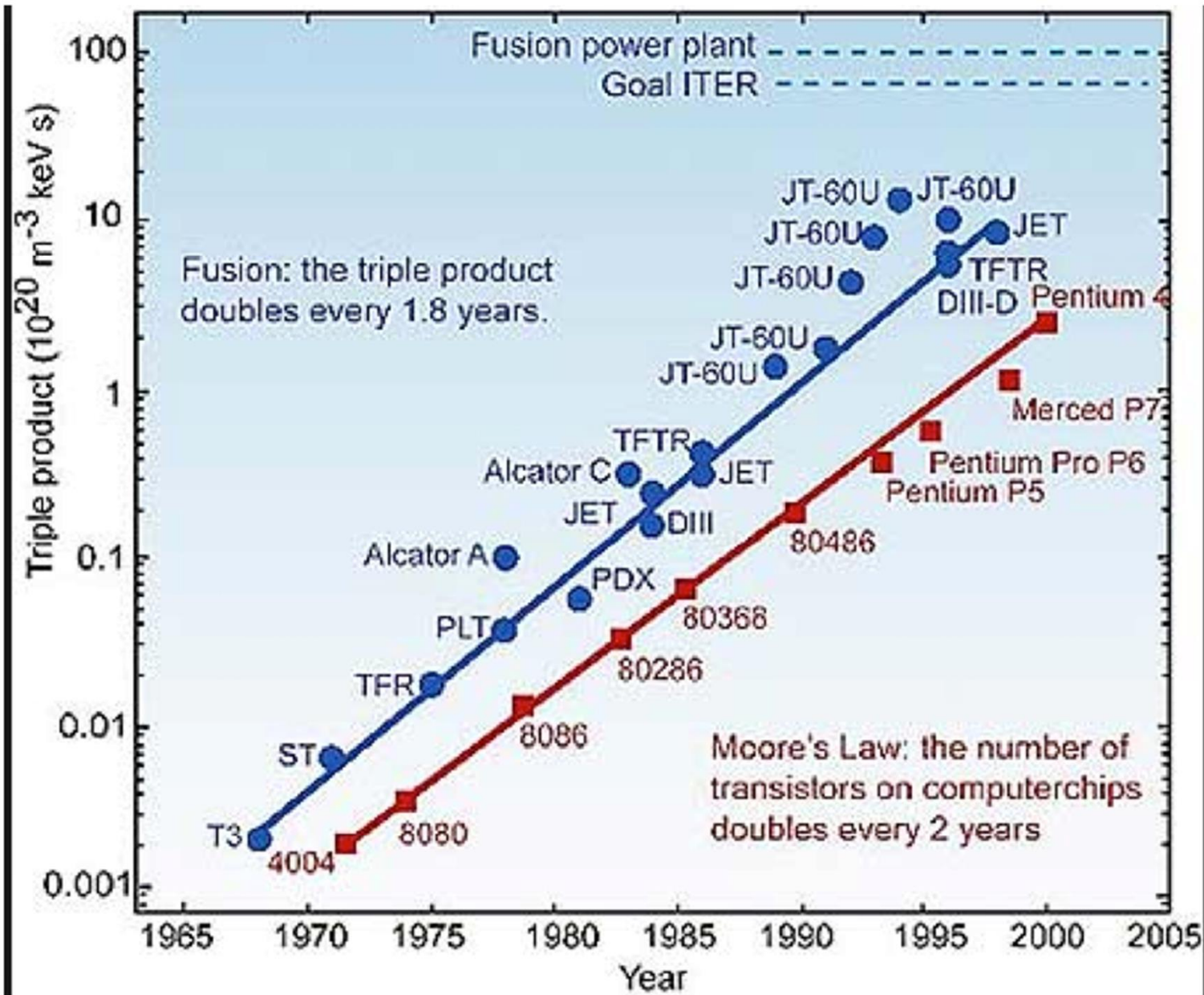
Voor fusie moet botsingsenergie hoog zijn
d.w.z. Hoge Temperatuur (> 100 miljoen
graden) ---> plasma

Hoe ver zijn we nog verwijderd van ons doel?

Lawson Criterium:

(Temperatuur) x (opsluittijd) x (dichtheid) is nu nog te laag voor een werkende fusiecentrale

Nu: Tripel Product een factor 6 tot 10 te laag



For commercial reactor the triple product has to be $n \cdot \tau \cdot T > 5,0 \cdot 10^{21} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}$

Grootste hindernis voor fusie is de enorm hoge temperatuur. 150 miljoen graden Celsius!

Dus

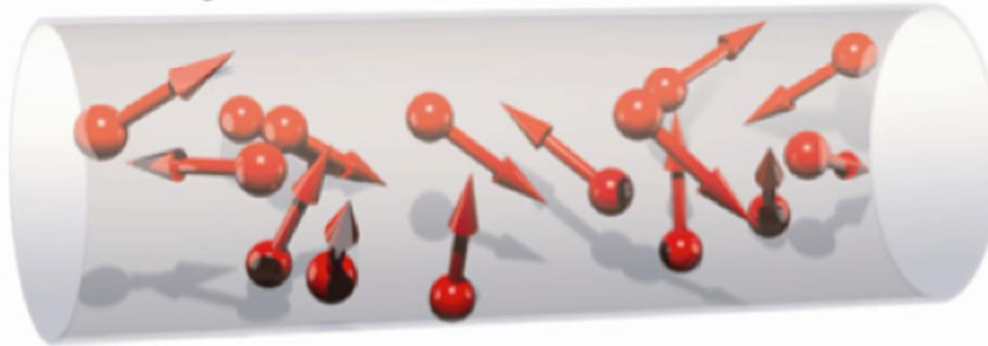
- warmteoverdracht van het hete plasma naar wand

beperken.

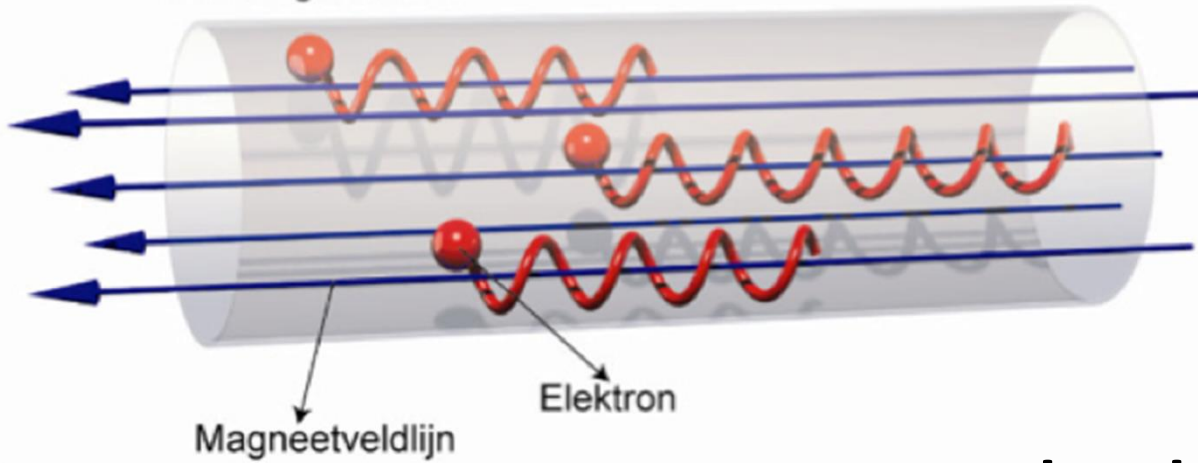
- Plasma op temperatuur houden

Dit kan door magnetische opsluiting van het plasma

Zonder magneetveld

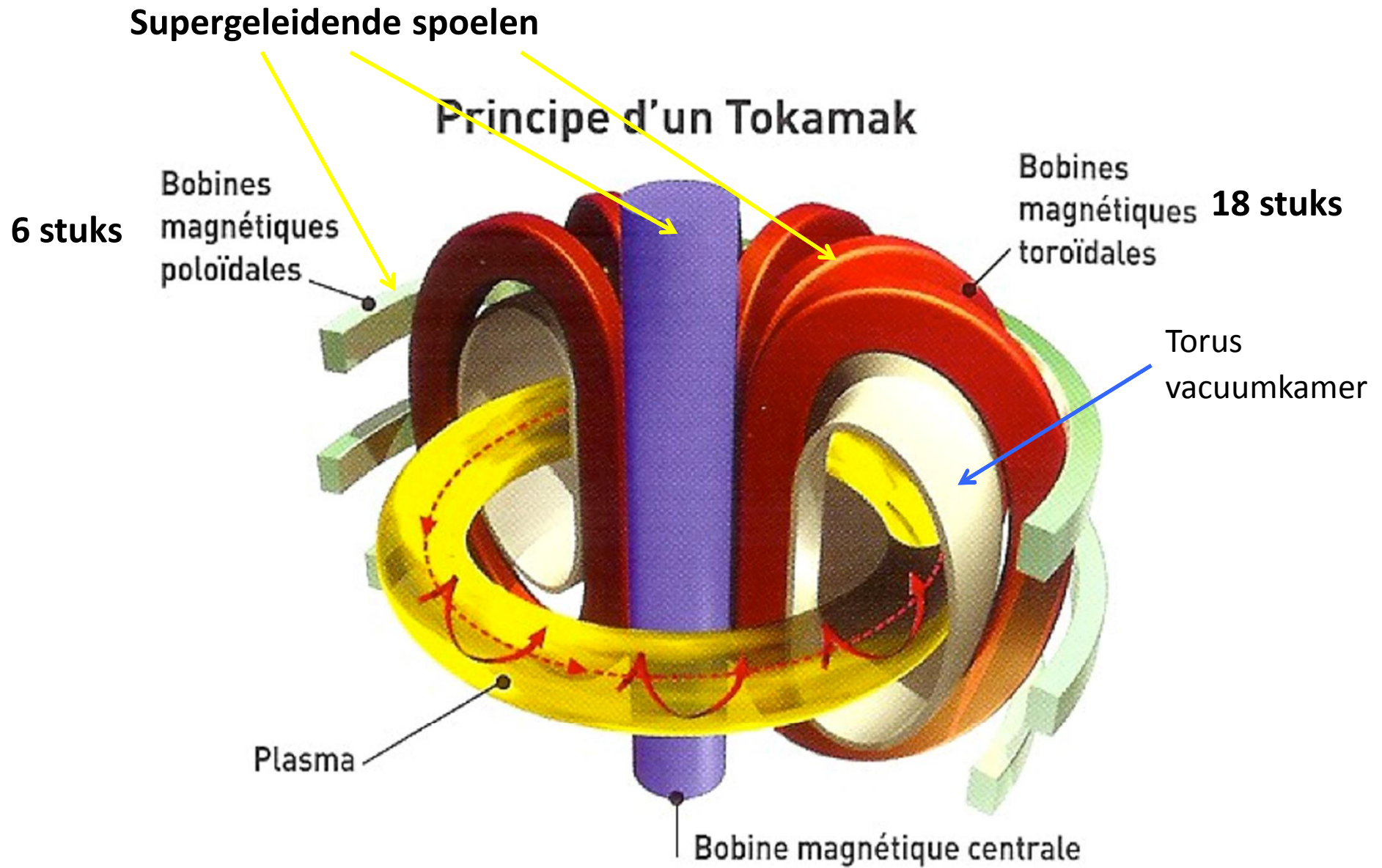


Met magneetveld



Lorentzkracht $F = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$

Magnetische opsluiting



Hoe wordt het plasma verhit tot 150 miljoen graden?

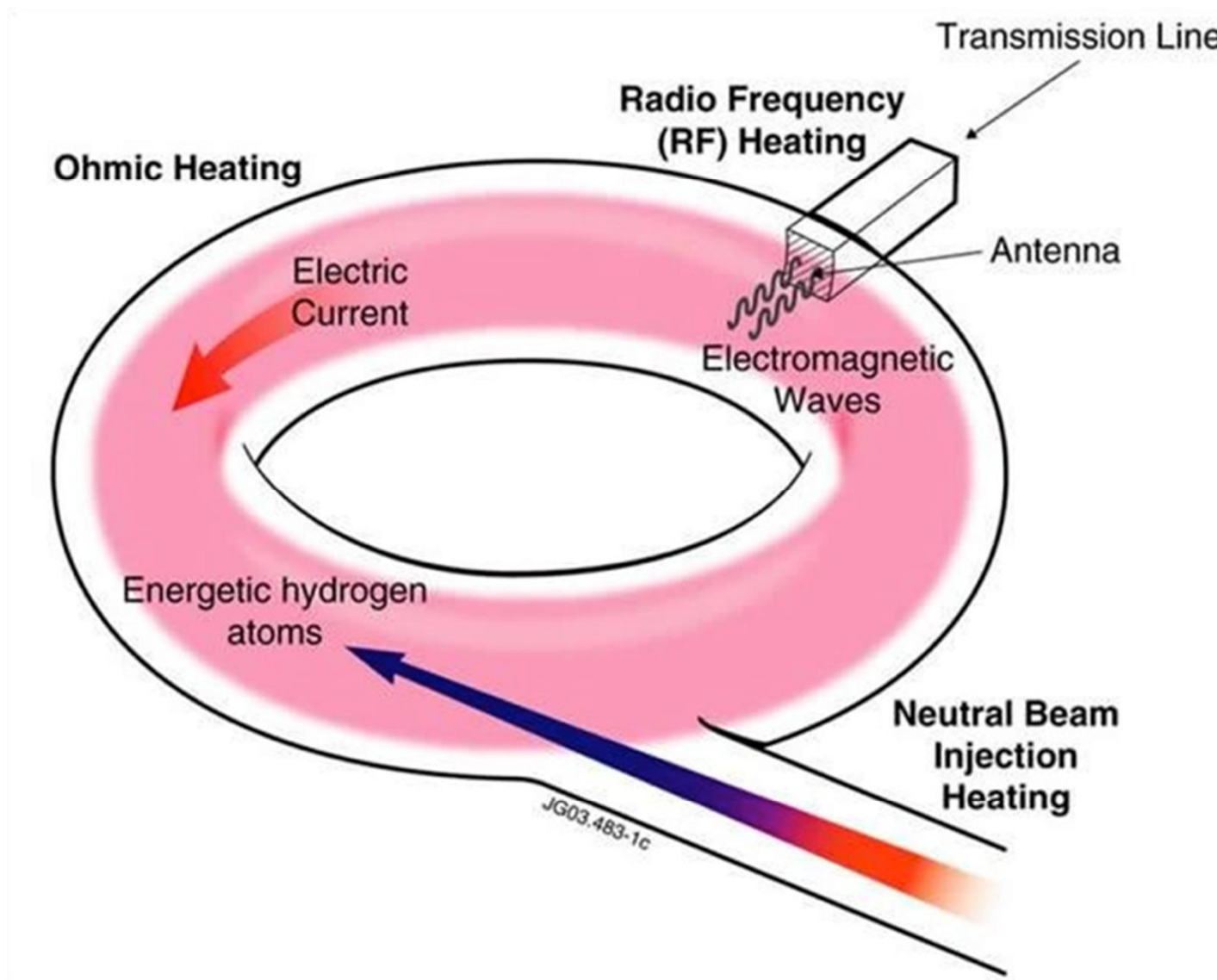
**1. elektrische stroom door het plasma
(ohmse verwarming)**

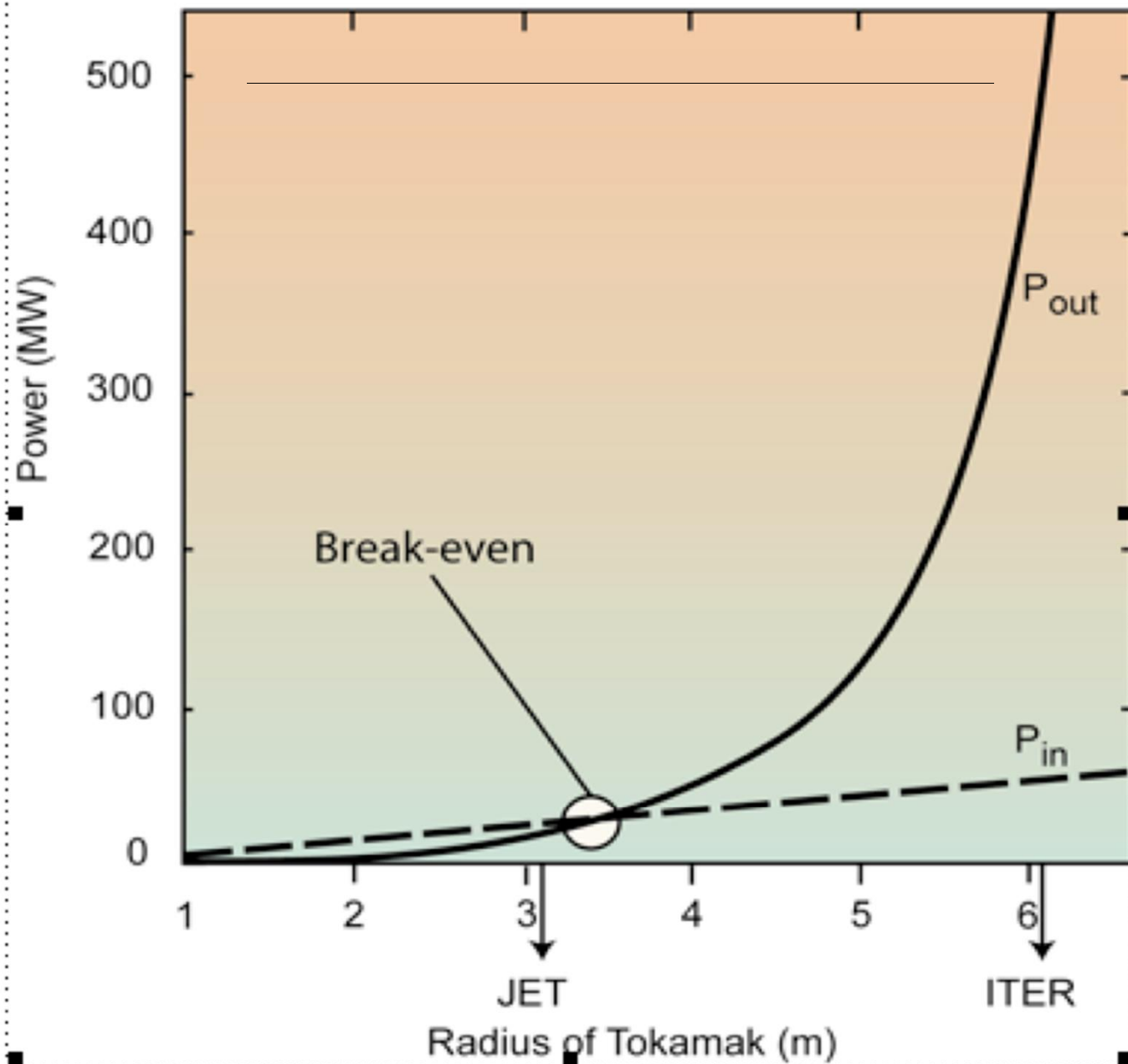
trafo

2. micro-golfstraling

magnetron

3. neutrale bundel injectie





- Stroom door het plasma via inductie.
- Inductie is afh. van $d\phi/dt \rightarrow$ niet continu

De Tokamak is dus in principe een gepulste machine.

Maar

Stroom door het plasma wordt in stand gehouden door een door het plasma zelf gegenereerde stroom “bootstrap current”

en

neutrale bundelinjectie.

Bootstrap Current (BC)

Een dichtheids(druk) gradiënt in radiële ri drijft een stroom aan in toroïdale richting.

BC ontstaat spontaan als gevolg van botsing tussen opgesloten deeltjes en passerende deeltjes

Experimenten hebben aangetoond dat een BC van 80 % haalbaar is.

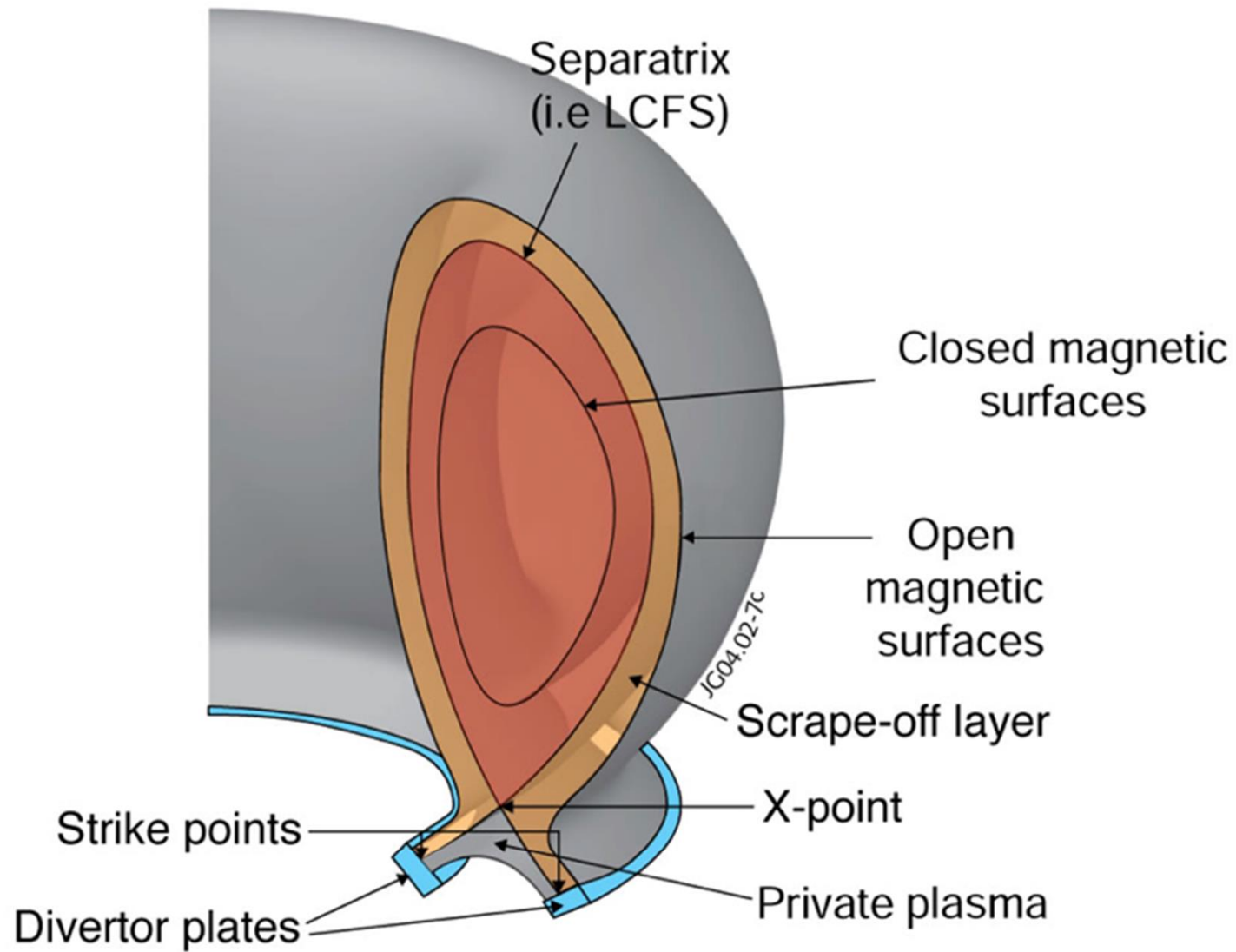
Overige 20% op andere niet-inductieve wijze

Scrape Off Layer

M.b.v. magneetvelden wordt het plasma zodanig gemodelleerd dat er aan de buitenzijde van het opgesloten plasma een Scrape Off Layer gevormd wordt.

Deze eindigt op de Divertor.

Toevoer brandstof betekent ook afvoer van de
“as”



Divertor

Gewicht 8,3 ton
Aantal: 54 stuks

3,60 m

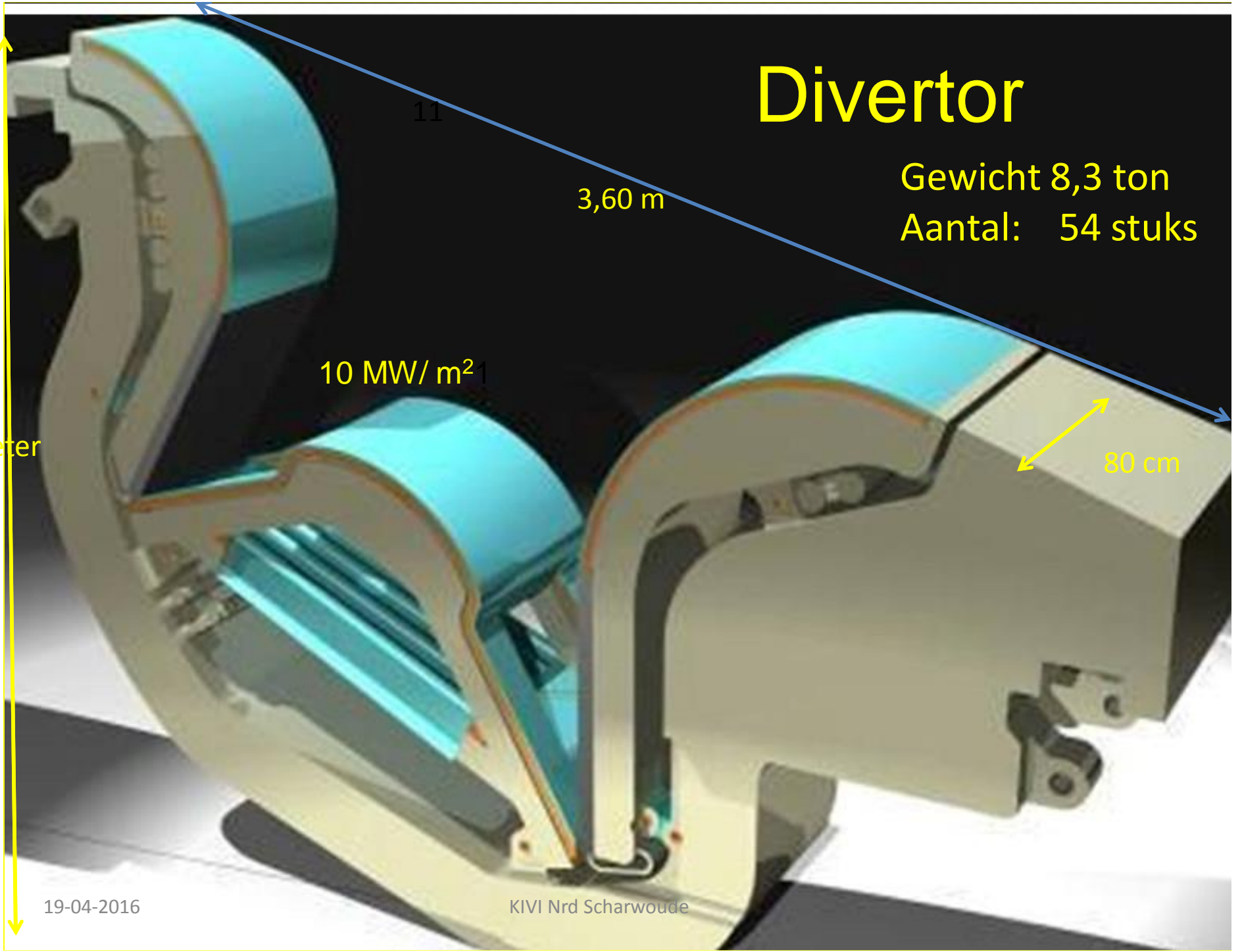
10 MW/m²

80 cm

meter

19-04-2016

KIVI Nrd Scharwoude



Regeling

T, I en magneetveld zijn sterk gekoppeld.

Als vermogen omhoog → dan stroom omhoog
→ invloed op de opsluiteigenschappen.

Dus: metingen terugkoppelen voor een continue bijregeling van het plasma.

Brandstof

Deuterium in overvloed (150 miljard jaar)

Tritium halfwaardetijd 12 jr

wordt geproduceerd uit:



Lithium in overvloed

Tritium recirculatie

Een fusiereactor met een vermogen van 1 GWe met een rendement van 40% verbruikt ongeveer 0,4 kg tritium per dag.

De burn-up fractie is echter circa 3%.

Dat betekent dat er 14 kg tritium moet worden gecirculeerd om de 1 GWe op te wekken.

De fusiereactor zal zelf haar tritium kweken.

Wat kost een kWh?

Studies naar de economische aspecten hadden als resultaat dat de kosten van elektriciteit uit kernfusie vergelijkbaar zijn met die uit duurzame energiebronnen.

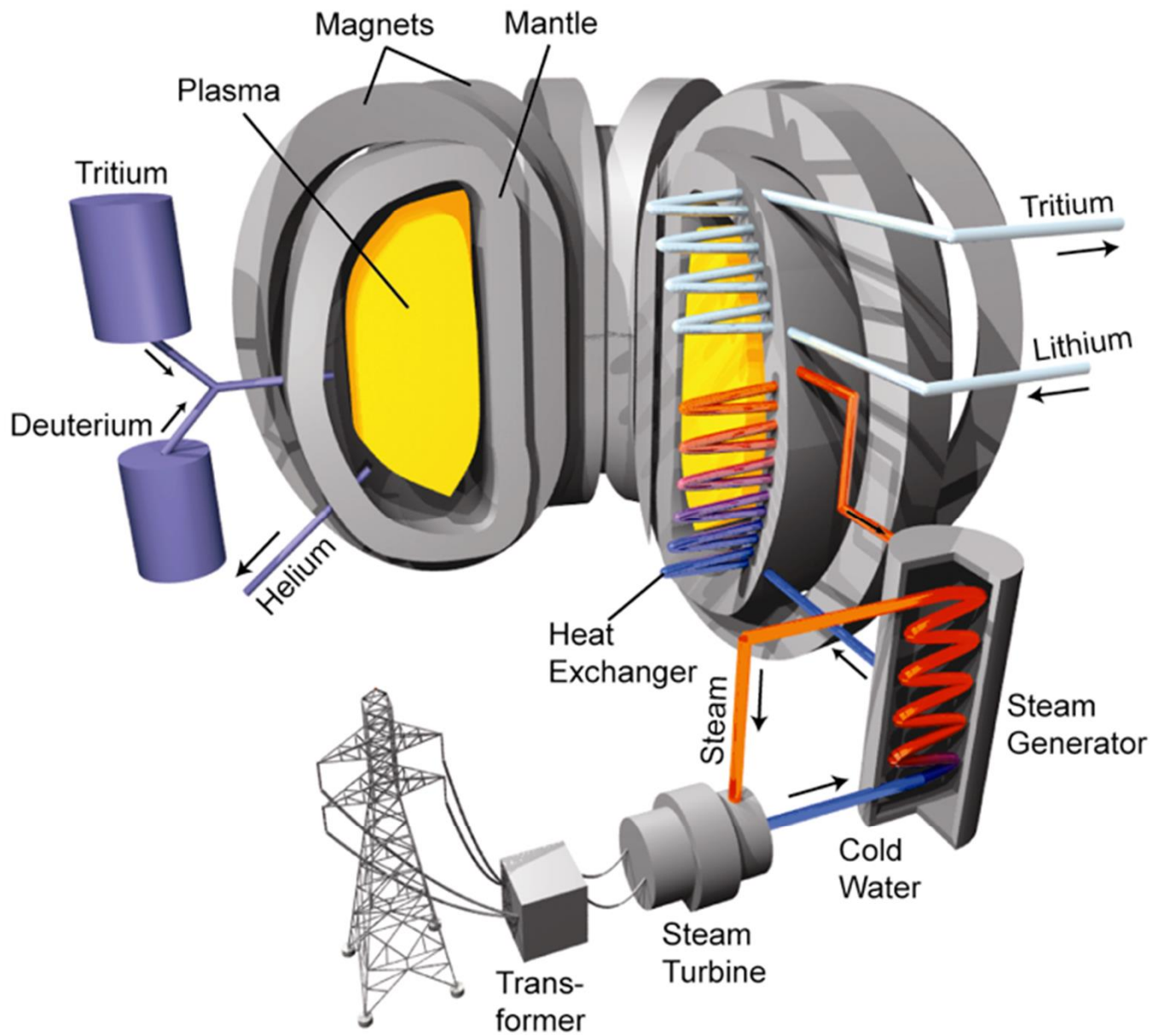
Het resultaat van diverse studies laat zien dat de prijs van fusie-elektriciteit tussen de 0,07 en 0,12 € per kWh gaat kosten. Met als meestwaarschijnlijke uitkomst een kWh prijs van 0,09 €

Hoe ziet het tijdschema er uit?

- 2015 Start opbouw Tokamak
- 2020 Einde assemblage +
commissioning
- 2021 Eerste plasma (eerst H₂ daarna D)
- 2028 Start D-T bedrijf
- 2035 Eerste DEMO reactor
- 2065 Eerste commerciële reactor

Op welke wijze komt de productie van elektriciteit tot stand?

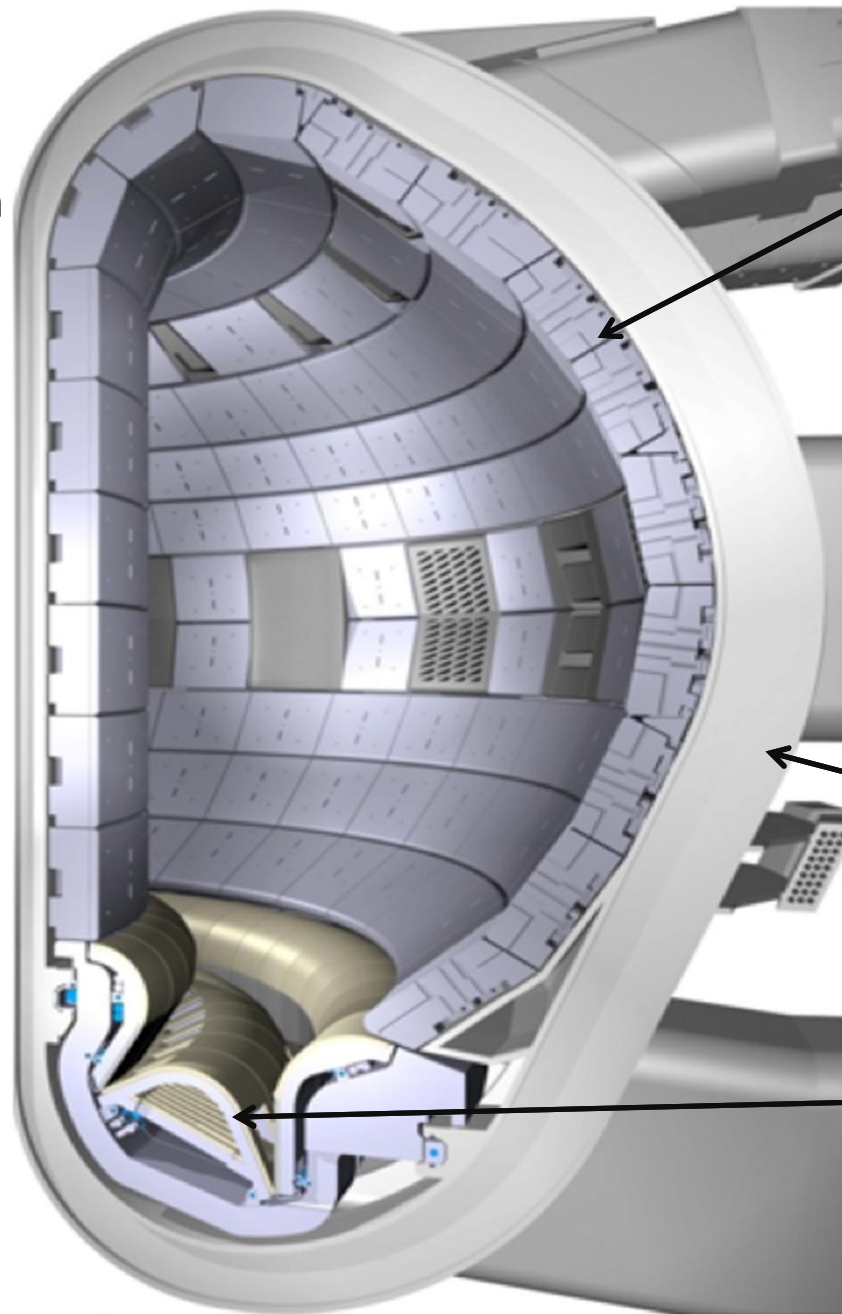
Hoe ziet een fusiecentrale er uit?



De hoog energetische neutronen (14,1 MeV) worden opgevangen in een mantel aan de binnenzijde van de vacuümkamer

1. kinetische energie neutronen wordt omgezet in warmte → stoom → elektriciteit
2. In de mantel Li waaruit T wordt gevormd volgens :
$$\text{Litium} + \text{neutron} \rightarrow \text{Helium} + \text{Tritium} + 4.8 \text{ MeV}$$

Binnen diameter 6 m
Grootste diameter 19,4 m
Hoogte 11,3 m
Dubbelwandig
Koeling d.m.v. water
Binnenzijde bekleed met
"blanket"
Gewicht 8000 ton



Blanket

440 segmenten
1 x 1,5 m
Gewicht per
segment 4,6 ton
Water gekoeld

**Dubbelwandige
Vacuumkamer**

Divertor

54 cassettes
Gewicht elk 8,3 t

Wat zijn de ontwikkelingen ná ITER ?

Na ITER komt de DEMO en dan de foak

- Demo moet continu 4 x hogere thermische output leveren. Zelfvoorzienend v.w.b. Tritium
- Afmetingen DEMO 5% groter dan ITER door een toename dichtheid met 30% + hogere veldsterkte
- Uitdaging ligt in het vervangen van onderdelen, tritium breeding, systemen voor refuelling, divertor krijgt hogere warmte belasting
 - Economische studies tonen aan dat de eerste commerciële reactor $\frac{1}{4}$ kost van de DEMO

International Thermonuclear Experimental Reactor

ITER

Gezamenlijke inspanning van:

EU (45,4%) en

China, Japan, VS, Z-Korea, Rusland,
India (ieder 9,1%)

Wat zijn de te bereiken doelen met ITER ?

- Productie van $500 \text{ MW}_{\text{th}}$ bij $Q=10$
- Demonstratie van geïntegreerde technologieën
- Bereiken van een “brandend” D-T plasma
- Test om tritium te kunnen kweken



19-04-2016

KIVI Nrd Scharwoude



19-04-2016

KIVI Nrd Scharwoude



19-04-2016

KIVI Nrd Scharwoude



19-04-2016

KIVI Nrd Scharwoude



19-04-2016

KIVI Nrd Scharwoude

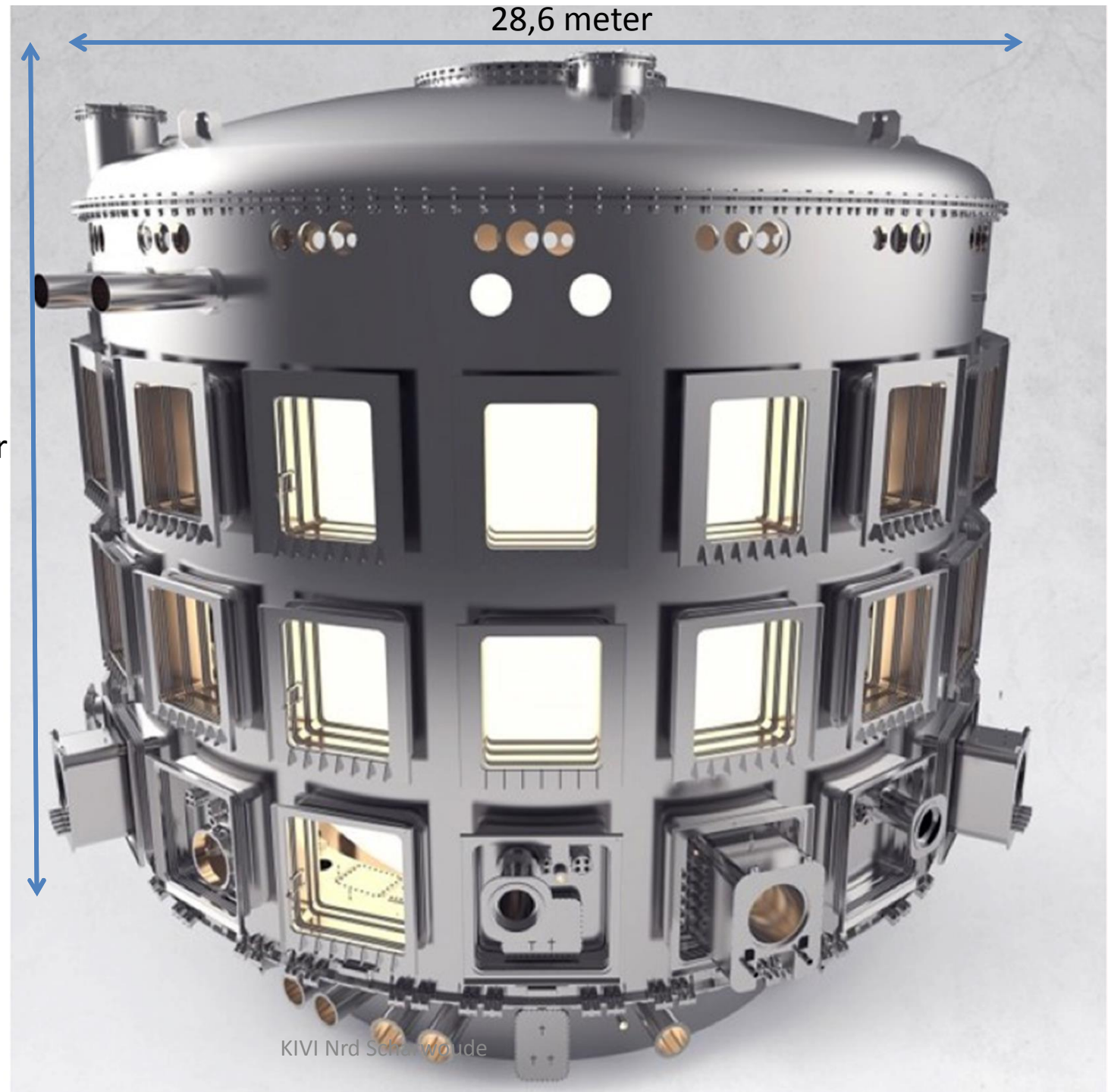
CRYOSTAAT

29,3 meter

Tijdens bedrijf is
de druk 1×10^{-6}
mbar

Volume 16.000 m³
Gewicht 3900 ton

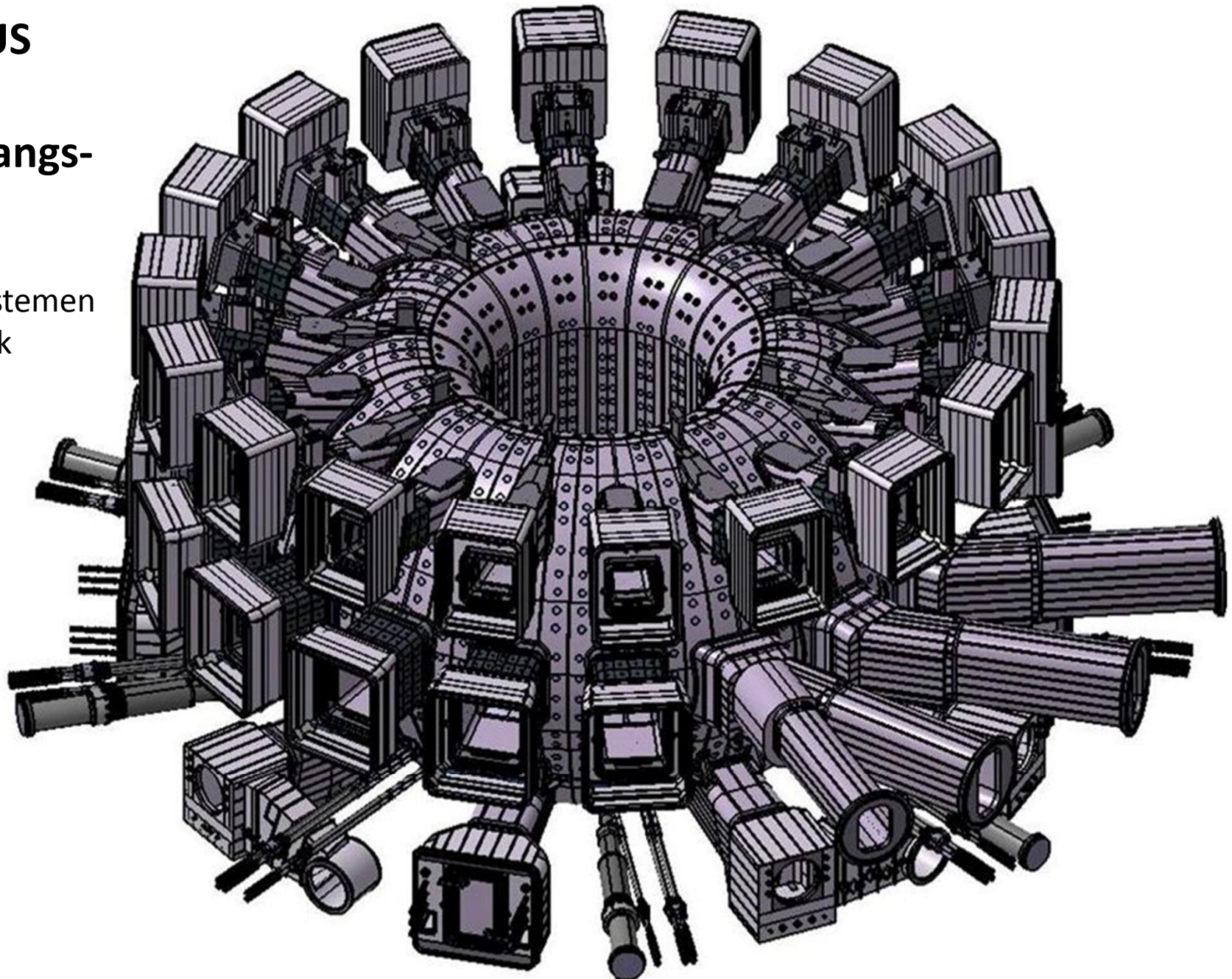
19-04-2016



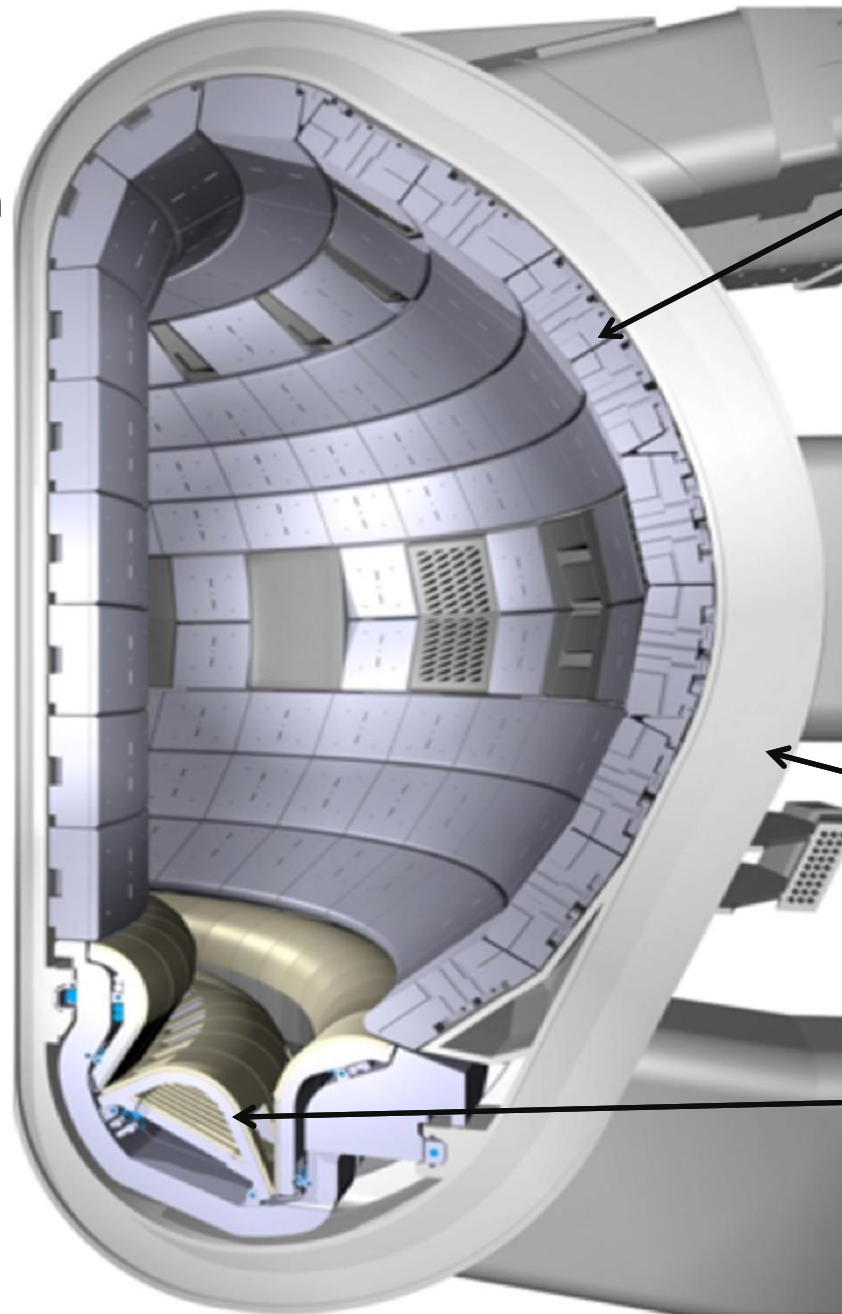
TORUS

44 toegangs- Poorten

t.b.v.
Vacuumsystemen
Diagnostiek
Koeling



Binnen diameter 6 m
Grootste diameter 19,4 m
Hoogte 11,3 m
Dubbelwandig
Koeling d.m.v. water
Binnenzijde bekleed met
"blanket"
Gewicht 8000 ton



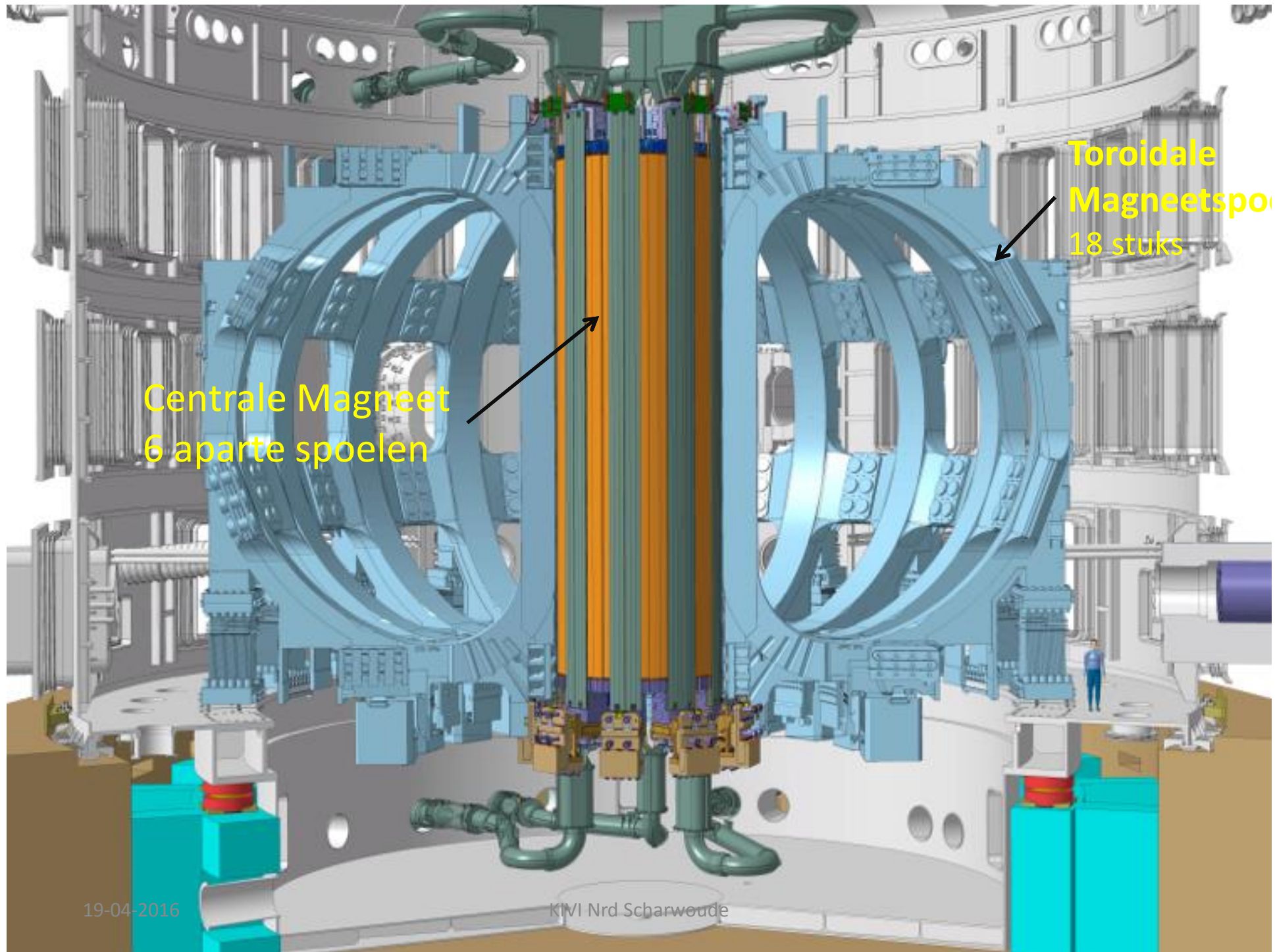
Blanket

440 segmenten
1 x 1,5 m
Gewicht per
segment 4,6 ton
Water gekoeld

**Dubbelwandige
Vacuumkamer**

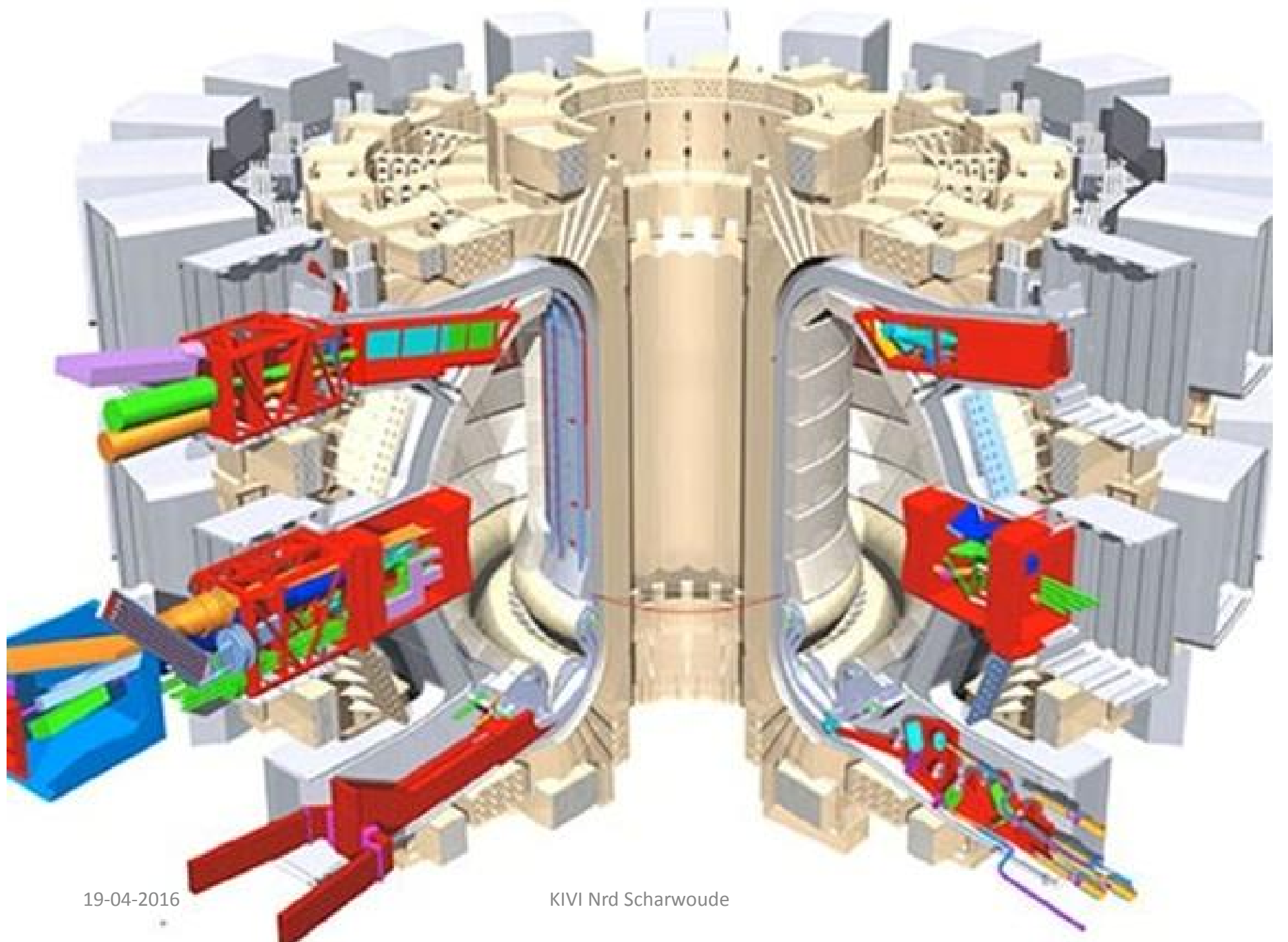
Divertor

54 cassettes
Gewicht elk 8,3 t



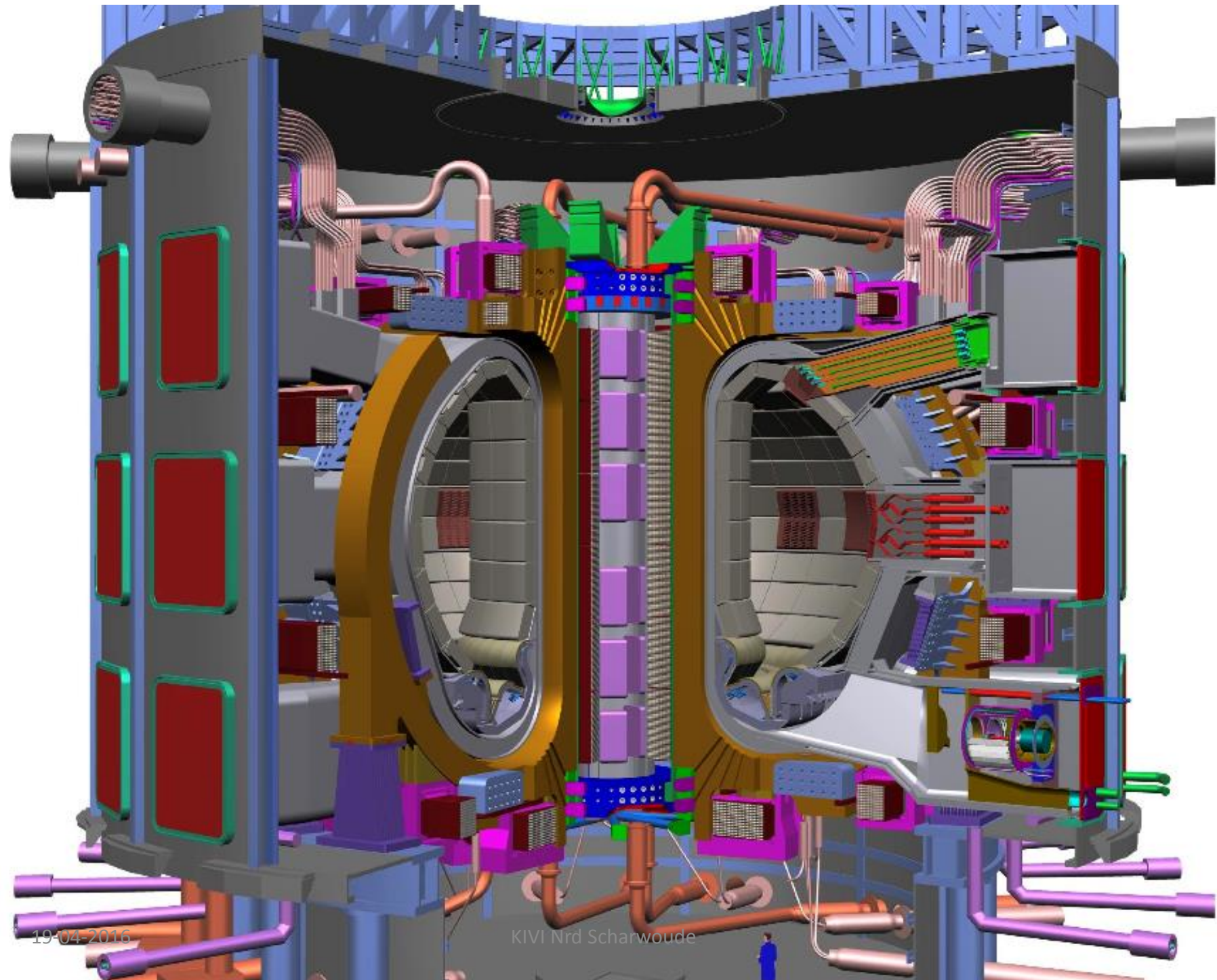
Centrale Magneet
6 aparte spoelen

Toroidale
Magneetspoelen
18 stuks



19-04-2016

KIVI Nrd Scharwoude



19-04-2016

KIVI Nrd Scharwoude

Vragen ?