

# Neutronflöde i en reaktor

I detta projekt kommer ni att modellera neutronflödet i en kärnkraftsreaktor. Data är tagna ifrån Ringhals-4, vilket är en tryckvattenreaktor som levererar en nettoeffekt på 915 MW.

I reaktorn kommer neutroner att klyva uranisotopen  $^{235}\text{U}$ . Klyvningen ger strålning och olika restprodukter tillsammans med några fria neutroner. Neutronerna som bildas sprids vidare och ger upphov till nya klyvningar. Det är denna kedjereaktion som eftersträvas. Dock behöver kedjereaktionen vara kontrollerad vilket medför att endast en neutron från varje klyvning bör ge upphov till en ny klyvning. För att reglera detta införs absorberare som skall fånga in de extra neutronerna. En del neutroner läcker dessutom ut och fångas i ett yttre skikt kring reaktorn.

De neutroner som bildas vid kärnklyvningen har olika hastigheter. Sannolikheten för att en neutron skall träffa och klyva en kärna minskar med ökad hastighet och därför är det främst de långsamma neutronerna som ger kärnklyvningar.

Reaktorhärden är ca 4 m hög och nästan cylindrisk med en innerdiameter på ca 4 m. I härden finns en blandning av bränslestavar (med uran) och absorptionsstavar (av något annat material), allt omringat av vatten som är effektivt för att bromsa de snabba neutronerna.

Låt oss först anta att alla neutroner har samma hastighet. Neutronflödet påverkas av tre termer: diffusion, fission och absorption. Detta kan vi beskriva i ekvationen för neutronflödestätheten  $\phi$  ( $\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ).

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t}(x, t) = \nabla \cdot (D(x) \nabla \phi(x, t)) + (\nu \Sigma_f(x, t) - \Sigma_a(x, t)) \phi(x, t) \quad (1)$$

där  $v$  är neutronens medelhastighet,  $D$  diffusionskoefficienten,  $\Sigma_f$  är tvärsnittet för fission och  $\Sigma_a$  är tvärsnittet för absorption. (Tvärsnittet kan betraktas som en sannolikhet med areaenhet),  $\nu$  är ett medeltal för antalet bildade neutroner vid fission.

Er uppgift:

- Börja med att variationsformulera ekvation (1). Randvillkoren är att neutronflödestätheten är noll (egentligen skall den vara noll lite utanför, men det behöver vi inte ta hänsyn till).
- Gör sedan ett matlabprogram för att räkna ut neutronflödestätheten med finita elementmetoden. Låt området vara en cirkelskiva som skall motsvara ett tvärsnitt av reaktorn. Data (konstanter) för Ringhals-4 finns tillgängliga i en bifogad mat-fil.

Extra:

Om det finns en risk att det produceras för många neutroner, placeras styrstavar i kärnan. De absorberar, dvs  $\Sigma_a$  ökar. Försök modellera detta genom att ändra  $\Sigma_a$  för en del av området.

För att utvidga modellen något kan vi betrakta två grupper av neutroner (två hastigheter); snabba och långsamma. Vi får då två kopplade differentialekvationer. Låt oss även ta hänsyn till att alla neutroner inte frigörs direkt vid fission. En del frigörs efter  $10^{-12}$  sekunder, medan andra dröjer  $10^{-3}$  sekunder. Fördröjningen  $C$  styrs av en tredje differentialekvation.

$$\frac{1}{v_1} \frac{\partial \phi_1}{\partial t}(x, t) = \nabla \cdot (D_1(x) \nabla \phi_1(x, t)) + \nu \Sigma_{f,2}(x, t)(1 - \beta) \phi_2(x, t) + \lambda C(x, t) \quad (2)$$
$$[\nu \Sigma_{f,1}(x, t)(1 - \beta) - \Sigma_{a,1}(x, t) - \Sigma_{rem}(x, t)] \phi_1(x, t)$$

$$\frac{1}{v_2} \frac{\partial \phi_2}{\partial t} = \nabla \cdot (D_2(x) \nabla \phi_2(x, t)) - \Sigma_{a,2}(x, t) \phi_2(x, t) + \Sigma_{rem}(x, t) \phi_1(x, t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}(x, t) = \beta [\nu \Sigma_{f,1}(x, t) \phi_1(x, t) + \nu \Sigma_{f,2}(x, t) \phi_2(x, t)] - \lambda C(x, t) \quad (4)$$

Index 1 är för snabba neutroner, och 2 för långsamma.  $\beta$  är andel fördröjda neutroner,  $\lambda$  sönderfallshastighet, och  $\Sigma_{rem}$  är tvärsnittet för snabba neutroner till långsamma.

Om du tycker det verkar intressant med reaktorfysik och neutronfysik kan jag tipsa om de kurser som finns på Reaktorfysik. Kolla på hemsidan <http://www.nephy.chalmers.se/courses/courses.html>