



Arbejdsrapport publiceret på [www.teknologihistorie.dk](http://www.teknologihistorie.dk) 19. marts 2010  
*Teknologihistorier. ISSN 1904-3066*

## Halvledermaterialer fra reaktorer – en innovationshistorie

*Af Henrik Knudsen*

I en branche, hvor udviklingen ellers er totalt domineret af multinationale giganter, lykkedes det i 1974 den lille danske halvledervirksomhed Topsil at blive de første til at bringe neutrontoteret silicium på verdensmarkedet.<sup>1</sup> Det er et bemærkelsesværdigt faktum alene af den grund, at Danmark ikke ellers har nogen halvlederindustri. Men historien om neutrontoteret silicium er også i andre henseender en unik innovationshistorie. Den udviklede sig nemlig fra første færd i et tæt samspil mellem en privat virksomhed og et offentligt forskningsmiljø. Op gennem 1990'erne blev 1/3 af den globale produktion af neutrontoteret silicium bestrålet i reaktoren DR 3 på Forskningscenter Risø. Neutrontotering af silicium er dermed en af de få nukleare teknologier, hvor danske forskere har formået at spille en ledende rolle på verdensplan. Jeg vil i dette arbejdsrapport fortælle historien om neutrontoteringsteknologiens fremkomst og benytte den til at pege på nogle af de institutionelle rammebetingelser, som formede fremvækstmulighederne for et offentligt-privat teknologipartnerskab i 1970'erne. Jeg vil i fremstillingen koncentrere mig om at beskrive dynamikken mellem det lokale miljø og det globale innovationslandskab for til sidst at fremsætte nogle mere generelle innovationsteoretiske betragtninger.

### *Neutrontoteret silicium*

NTD-silicium er en forkortelse af den engelske betegnelse *neutron transmutation doped silicon*. På dansk kaldes produktet neutrontoteret silicium. Dette kræver imidlertid en forklaring, der her er

---

<sup>1</sup> Ud over den i noterne angivne litteratur baserer den følgende historie sig på interviews og samtaler med tidligere Risø-medarbejdere. Det drejer sig om civilingeniørerne Kirsten Andresen (22/9 2006) og Heinz Floto (13/3 2007) og Kaj Heydorn (15/1 2007 og 4/3 2010) samt ingeniør Nils Hegaard. Interviewet med Heinz Floto og et af interviewene med Kaj Heydorn er udskrevet i H. Knudsen (2007), *Maskinerne i haven*, som er tilgængelig på [http://130.226.56.153/rispubl/art/2007\\_256.pdf](http://130.226.56.153/rispubl/art/2007_256.pdf). Interviewet med Kirsten Andresen er delvist udskrevet i H. Knudsen (2006) *Risøs reaktorer*, som er tilgængelig på [http://130.226.56.153/rispubl/art/2007\\_11.pdf](http://130.226.56.153/rispubl/art/2007_11.pdf). Desuden bygger fremstillingen på interviews med udviklingschef (senere administrerende direktør) Hans Janus (16/2 2010) og civilingeniør Olof Malmros (8/2 2010), der begge i den omhandlede periode var ansat i Topsils udviklingsafdeling. Endelig kan jeg henvise til dokumentar- og reklamefilmen *NTD-Silicium: Fra forsøg til produktion* (manuskript: Peter Clausen/Kaj Heydorn), Forskningscenter Risø/Isotoplaboratoriet (1994).

gjort meget kort. Transistorer, integrerede kredse, dioder, thyristorer og andre elektroniske komponenter består af halvledermaterialer. Det kan fx være silicium (Si), som er gjort halvledende ved til-sætning (dotering) af små mængder fremmede stoffer som fosfor eller bor. Lige siden man i 1950'erne blev i stand til at lave transistorer og andre halvlederkomponenter, har man benyttet en konventionel fysisk-kemisk teknik til at dotere silicium. Midt i 1970'erne fremkom en ny alternativ doteringsproces baseret på reaktorneutroner, der med hensyn til kvalitet var en langt mere fordelagtig måde at dotere silicium på. Forskere og ingeniører fra den danske virksomhed Topsil og Forskningscenter Risø spillede en afgørende rolle i kommercialiseringen af denne proces.

Naturligt silicium indeholder tre stabile isotoper, hvoraf omkring 3 % er isotopen  $^{30}\text{Si}$ . Denne siliciumisotop omdannes ved indfangning af en langsom neutron til den ustabile  $^{31}\text{Si}$ , som ved udsending af en betapartikel henfalder til den stabile fosforisotop  $^{31}\text{P}$ . Halveringstiden er ca. 2,6 timer. De to øvrige siliciumisotoper indfanger faktisk også langsomme neutroner, men det hører til naturens små lykkelige tilfældigheder, at de derved dannede siliciumisotoper er stabile. Ved at bestråle siliciumkrystaller med langsomme neutroner kan man altså på denne måde erstatte en kontrolleret mængde silicium med fosfor. Det er små mængder vi taler om: kun omkring en til ti ud af hver milliard siliciumatomer erstattes med fosforatomer. I forhold til silicium har fosfor en ekstra valenselektron, hvilket betyder at materialets ledningsevne stiger med antallet af fosforatomer. Fordelen ved neutrondotering er, at fordelingen af fosforatomer bliver meget jævn samt at doteringsprocessen kan kontrolleres mere præcist. Den konventionelle kemiske diffusionsteknik var ikke i stand til at give en ensartet fordeling af fosforatomerne.

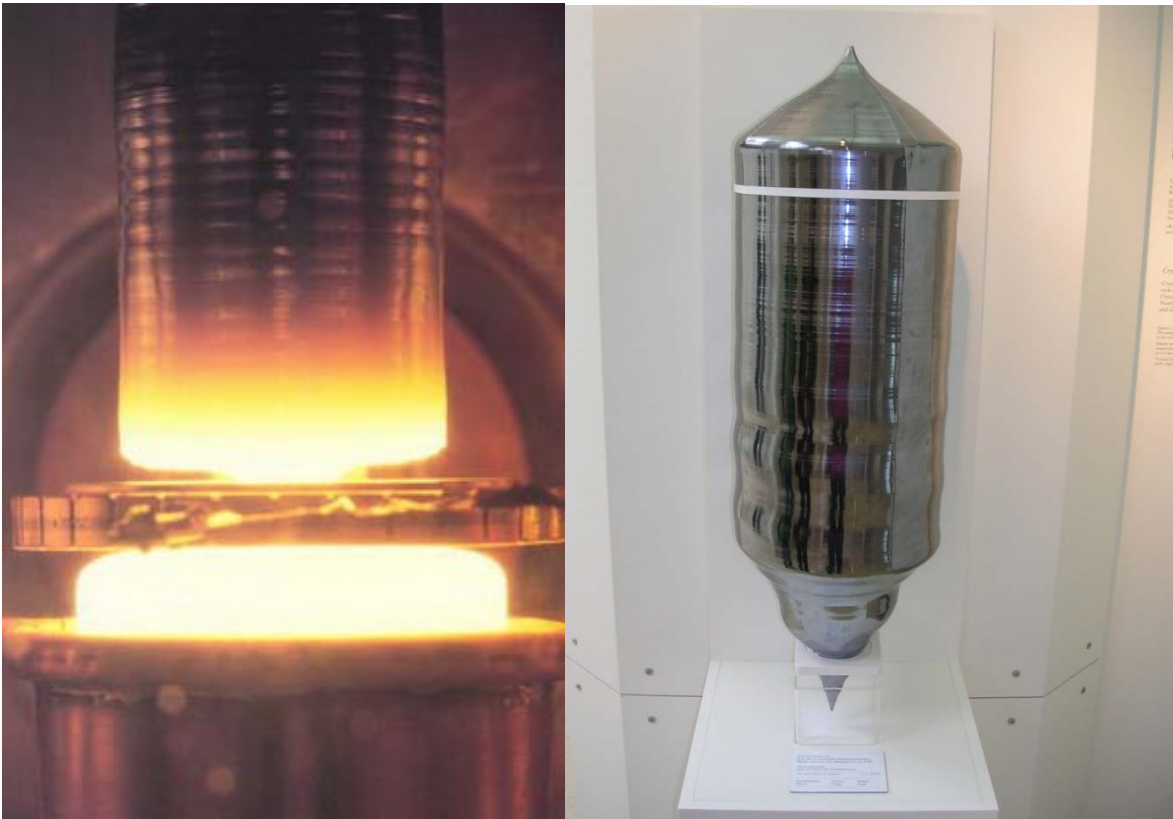
Neutrondoteringsprocessen er dog i virkeligheden mere kompleks end her angivet, bl.a. fordi  $^{31}\text{P}$  ved indfangning af en neutron omdannes til  $^{32}\text{P}$ , som henfalder til svovlisotopen  $^{32}\text{S}$  under udsendelse af en betapartikel. Minimering af denne sidereaktion er vigtig, da den ændrer halvlederens ledningsegenskaber. Hurtige (dvs. energirige) neutroner i reaktoren skaber desuden deformationer i krystalgitret. Det er derfor mest fordelagtigt at anvende en reaktortype, som har en høj flux af langsomme neutroner og en lav flux af hurtige neutroner. Sagen er dog den, at deformationerne i vid udstrækning kan repareres gennem en såkaldt annealingproces, der består i en opvarmning af krystallen til 650-900 °C, hvorved krystalgitret genoprettes.<sup>2</sup> Uden at gå dybere ned i de tekniske detaljer er annealingprocessen med til at afgøre krystallens halvlederegenskaber, hvorved producenter, der råder over en effektiv annealingproces, har en afgørende konkurrencefordel. De præcise detaljer omkring annealingprocessen er derfor en af siliciumbranchens bedst bevarede fabriks hemmeligheder.<sup>3</sup>

Den teoretiske mulighed for at dotere silicium og gallium (et andet halvledermetal) med reaktorneutroner blev påpeget i 1950-51 af faststoffysikeren Karl Lark-Horowitz fra Purdue University. I 1960'erne blev siliciumdotering med reaktorneutroner udforsket nærmere bl.a. af Morris Tanenbaum og A.D. Mills fra Bell Laboratories. De fremstillede halvlederkrystaller, som de testede i prototypekomponenter. Tanenbaum var en af tidens absolut førende halvlederforskere. I 1954 opfandt han siliciumtransistoren, der er selve det materielle fundament for den digitale computer. Men af en eller anden grund blev neutrondotering af silicium dog ikke på dette tidspunkt forbundet med konkrete anvendelsesmuligheder inden for elektroindustrien. Neutroners indvirkning på sili-

<sup>2</sup> For flere detaljer, se E.W. Haas og M.S. Schnöller, (1976) "Phosphorus Doping of Silicon by means of Neutron Irradiation", *IEEE Transactions on Electronic Devices*, ED-23(8), 803-805.

<sup>3</sup> B.D. Stone (1981) "Large Scale Production of NTD Silicon in the United States", J. Guldberg (red.) *Neutron-Transmutation-Doped Silicon*, (New York: Plenum Press), 19-33, 32. Se i øvrigt også P.B. Yde (1984) "Danske Chips", *Ny Elektronik*, 9(3), 25-27, 26.

cium fangede derimod i 1960'erne interessen hos folk, der øjnede et potentiale til at forbedre metoderne til strålingsdetektion og dosimetri.<sup>4</sup> Fra 1973 arbejdede kemikeren Manfred Schnöller hos elektronikvirksomheden Siemens og Ernst Haass ved Kraftwerk Unions forskningslaboratorium med at forbedre neutrontoteringsprocessen og med at fremstille højspændingskomponenter af NTD-silicium.<sup>5</sup> På basis af Haas og Schnöllers arbejde ansøgte Siemens allerede i 1975 om patent på neutrontoteringsprocessen i Tyskland og senere i en række andre store lande.<sup>6</sup> Man kunne på dette tidspunkt endnu ikke udtage patent på et stof eller et materiale, men kun på selve den proces, hvormed det frembringes.



Billede 1. Til venstre: produktion af silicium enkeltkrystal ved FZ-teknikken. Til højre: færdig enkeltkrystal af silicium.

For at NTD-processen kan gennemføres, er man nødt til at have et meget rent produkt, da urenheder selv i meget små mængder vil skabe radioaktive stoffer, som gør produktet uanvendeligt. I begyndelsen af 1970'erne var producenterne af siliciumkrystaller blevet så dygtige, at de var i stand til at producere silicium med en renhedsgrad, der oversteg alle andre industrielle produkter. Teknikken dertil hedder zonesmeltning (*float zone*) og de rene siliciumkrystaller, der kommer ud af processen, kaldes FZ-silicium. Første del af processen består i at fremstille stænger af polysilicium (dvs.

<sup>4</sup> H. Herzer (1981) "Neutron-doped silicon – a marked review", J. Guldborg (red.) *Neutron-Transmutation-Doped Silicon*, (New York: Plenum Press), 1-17, 1.

<sup>5</sup> Den historiske baggrund er kort opridset i W.E. Haas og M.S. Schnöller (1975) "Silicon Doping by Nuclear Transmutation", *Journal of Electronic Materials*, 5(1) 57-68. Se også Stone, *Large Scale Production of NTD Silicon in the United States*, 20ff.

<sup>6</sup> Deutsches Patentamt, Offentlegungsschrift 23 56 376, 15/5 1975.

polykrystalinsk eller amorft silicium) ud fra enten siliciumtetraklorid ( $\text{SiCl}_4$ ), silan ( $\text{SiH}_4$ ) eller lignende forbindelser. Disse stænger af polysilicium renses ved at bevæge dem langsomt gennem et ringformet varmelegeme. Herved produceres en zone af smeltet materiale tværs gennem siliciumstangen, på hvis forside silicium og urenheder smelter. Når smelten afkøler og genkrystalliserer fås et renere produkt, fordi urenhederne ophobes i smeltezonen. Processen kan gentages med successivt stigende renhedsgrad til følge. Til slut gentages processen, men nu lader man den flydende siliciummasse krystallisere på et krystalkim, der langsomt trækkes væk fra smeltezonen. Herved afsættes den størknende silicium som en lang enkeltkrystal, der i princippet kan dyrkes i enhver ønskelig diameter og længde. FZ-processen benyttes således både til at rense silicium for urenheder og til at producere enkeltkrystaller ud fra polysilicium. De siliciumkrystaller der er vist på billede 1 og 2 er produceret på denne måde. Silicium har et højt smeltepunkt – 1414 °C. FZ-processen er med andre ord meget energikrævende!

FZ-silicium er et nicheprodukt. Over 90 % af alt silicium på verdensmarkedet er produceret ved en alternativ metode, der kaldes Czochralski-metoden. Ved denne betydeligt billigere proces foregår krystalliseringen i en porcelænsdigel. Produktet indeholder ret store mængder ilt og anvendes primært i computerindustrien.

#### *Silicium og HVDC*

Umiddelbart forbindes halvledere af silicium nok mest med mikroelektronik og computerchips. Prisen på neutrondoteret silicium er omkring 50 % højere end konventionelt doteret silicium.<sup>7</sup> Hvad det indebærer i kroner og øre illustreres måske bedst af, at Risø i 1997 i gennemsnit fik godt 6500 kr. per udført bestråling, hvilket svarer til ca. 0,78 kr. per gram silicium! Det betyder, at produktet hovedsageligt benyttes i elektriske komponenter, hvor der kræves særlig stor ensartethed, præcision og pålidelighed, som fx thyristorer til højspændingsrettere, der benyttes i højhastighedstog, kraftværker og elektricitetstransmission. Når store mængder elektricitet skal transporteres over lang distance foretrækkes højspændingsjævnstrøm (High Voltage Direct Current, HVDC), da både anlægskostninger og strømtab er mindre end ved transmission af en tilsvarende mængde vekselstrøm. Omdannelsen af vekselstrøm til højspændingsjævnstrøm sker i store højspændingsrettere, der indeholder tusindvis af thyristorer. HVDC-forbindelser er i dag en af hjørnestenene i det trans-europæiske elektricitetsnetværk. Teknologien blev udviklet af ASEA i Sverige fra 1930'erne og frem til 1950'erne med henblik på at kunne transportere store mængder elektricitet fra vandkraftværkerne i nord ned til industricentrene i det sydlige Sverige.<sup>8</sup> Den første HVDC forbindelse fra Gotland til den svenske fastland blev taget i brug i 1954. Frem til omkring 1970 var HVDC teknologien baseret på de højspændings kviksølvrettere som ASEA udviklede i mellemkrigstiden. Fra dette tidspunkt begyndte man at gå over til højspændingsthyristorer baseret på fosfordoteret silicium.

Den konventionelle kemiske dotering foregår ved at tilsætte en kontrolleret mængde fosfor til den smeltede silicium, når man til slut udtrækker selve krystallen. Problemet var imidlertid, at denne proces ikke er i stand til at give en jævn fordeling af fosforatomer gennem krystallen, idet tætheden både varierer fra centrum og ud mod kanten af krystallen samtidig med, at der også optræder mikroskopiske tæthedsvariationer. Disse forhold medfører, at modstanden varierer hen over den færdige siliciumskive. Højspændingsindustrien krævede imidlertid en meget jævn fordeling af fosfor, da

<sup>7</sup> *Utilization Related Design Features of Research Reactors: A Compendium*, s. 151, Technical Reports Series No 455, International Atomic Energy Agency, Vienna (2007).

<sup>8</sup> Se Mats Fridlund (1999), *Den gemensamma utvecklingen: Staten, storföretaget och samarbetet kring den svenska elkrafttekniken*, (Stockholm: Symposium), især kap. 6.

områder med lav modstand potentielt kan udvikle sig til hot spots – en velkendt og frygtet defekt, der indimellem medførte ødelæggelse ikke bare af den enkelte thyristor men af et helt højspændingsaggregat.<sup>9</sup>

Problemet med at opnå en jævn fordeling af fosforatomer i doteret silicium var dermed et kritisk flaskehalsproblem for leverandører af højspændingsrettere og HVDC forbindelser, ja for hele elektricitetssystemet. Vi har med andre ord her et helt klassisk eksempel på det den amerikanske teknologihistoriker Thomas Hughes kalder en ”reverse salient”, hvorved han forstår et kritisk teknisk-økonomisk problem, som bremser udviklingen af et større teknisk system. Selve metaforen er hentet fra militærverdenen og betegner et afgrænset segment af en front, der er kommet bagud i forhold til hovedfronten. Identifikationen og løsningen af ”reverse salients” er for Hughes helt afgørende for et teknisk systems markedsmæssige succes.<sup>10</sup> Af samme grund blev neutrondoteret silicium i løbet af meget kort tid accepteret af alle markedsaktører. Hermed også være sagt, at NTD-silicium var en væsentlig komponent i elektricitetstransmissionssystemets udvikling.



Billede 2. I montren ses en enkeltkrystal af FZ-silicium. Til højre herfor ses tynde polerede skiver af NTD-silicium – såkaldte ”wafere” – der er udgangspunktet for produktion af halvlederkomponenter. Forfatterens foto.

### *Topsil*

Den danske ingeniørvirksomhed Haldor Topsøe udviklede i slutningen af 1950'erne maskiner til zonesmeltning af silicium og påbegyndte i 1958 produktionen af FZ-silicium. I 1960 opførtes til dette formål et topmoderne fabriksanlæg i Frederikssund, der fik navnet Topsil (i dag Topsil Semi-

<sup>9</sup> Herzer, *Neutron-doped silicon – a marked review*, 3.

<sup>10</sup> T.P. Hughes (1987) ”The Evolution of Large Technological Systems”, i W.E. Bijker m.f. red.) *The Social Construction of Technological Systems*, (Boston: The MIT Press), 51-82.

conductor Materials A/S). Hos Topsil var udgangsmaterialet siliciumtetraclorid, som blev omdannet til amorft silicium i en reaktion med hydrogen. Ved yderligere oprensning og krystallisering ved hjælp af FZ-teknologien omdannedes dette materiale til doterede siliciumenkeltkrystaller af ekstrem høj renhed. Topsils speciale var et produkt, som blev kaldt "hyper pure silicon" (HPS), der blev fremstillet ved gentagen zonesmelting. Kvalitetsmæssigt og teknologisk var man i Frederikssund førende på sit felt, men samtidig var virksomheden i en økonomisk svag position på grund af sin beskedne størrelse. I forhold til de langt større multinationale konkurrenter – primært tyske Wacker-Chemitronic – var volumen for lille og produktionsomkostningerne i Frederikssund for høje.

I begyndelsen af 1970'erne fik Haldor Topsøe økonomiske problemer og siliciumproduktionen blev solgt til den flamboyante forretningsmand og industrimatador Steen Danø (Thrige-Titan), der indsatte en helt ny og i FZ-sammenhæng uerfaren ledelse. Haldor Topsøe beholdt dog en del af virksomheden, der under navnet HT-Equipment producerede maskiner til fremstilling af FZ-silicium. Danø videresolgte i 1974 Topsil til den store amerikanske elektronikkoncern Motorola, der på dette tidspunkt havde desperat brug for ny siliciumkapacitet. Det hører med til historien, at Motorola her havde købt katten i sækken, da de primært havde brug for Czochralski-silicium!

Den lille Frederikssund-virksomhed havde som leverandør af kemisk doteret silicium et tæt samarbejde med to førende producenter af højspændingsanlæg BBC (Brown Boveri & Cie) og ASEA (de to virksomheder fusionerede i 1988 under navnet ABB). Topsils primære forretningsstrategi sigtede mod at blive en førende leverandør af silicium til højspændingsmarkedet. Men samtidig søgte virksomheden også at udnytte sine specialkompetencer inden for produktion af "hyper pure silicon" til specialkomponenter, hvor marginerne var større. Topsil leverede således HPS til den amerikanske våbenproducent Martin Marietta til brug i de varmesøgende Sidewinder-missilers infrarøde detektorer. I slutningen af 1970'erne havde virksomheden også en lukrativ udviklingskontrakt med US Air Force om udviklingen af indiumdoteret silicium til samme formål.<sup>11</sup>

Topsil, BBC og ASEA havde på dette tidspunkt en fælles arbejdsgruppe, der arbejdede med at forbedre FZ-silicium teknikken til produktion af silicium til højspændingskomponenter. På et møde i denne gruppe fik Topsils daværende udviklingschef Hans Janus i foråret 1974 fra BBC et tip om, at Siemens arbejdede med en ny doteringssteknik baseret på reaktorbestråling.<sup>12</sup> Janus kontaktede derfor Kaj Heydorn, der var leder af Risø Isotoplaboratorium, for at høre, om de ville medvirke til at lave en forsøgsbestråling af silicium. Isotoplaboratoriet var den del af Risø, der havde ansvaret for produktion og distribution af radioaktive isotoper og mærkede forbindelser.<sup>13</sup> På Risø var man i begyndelsen skeptiske, da de hidtidige erfaringer fortalte dem, at det bestrålede silicium ville være alt for radioaktivt til, at kunne benyttes. Man var dog villige til at lave et forsøg.<sup>14</sup> Den 22. april 1974 indsattes en lille siliciumkrystal på ca. 50 g i den termiske kolonne på DR 2. Efter 12 timer blev krystallen taget ud efter midtvejs at have været drejet en halv omgang. Stor var overraskelsen

<sup>11</sup> Samtale med Hans Janus 16/2 2010; "Topsil Manufacturing Strategies. Discussion Background", 13/3 1979, Hans Janus' private arkiv. Jf. også "Dansk-amerikaner bag køb af Topsil i Frederikssund", *Frederiksborg Amtsavis*, 30/8 1981.

<sup>12</sup> Samtale med Hans Janus, 20/1 2010.

<sup>13</sup> Isotoplaboratoriets historie er nærmere beskrevet i H. Knudsen (2009) "En kerneforretning. Produktion, distribution og anvendelse af radioaktive isotoper i Danmark 1959-2000", *Polhem Teknikhistorisk årsbok 2006-2007*, 75-110. For Risø's historie se H. Nielsen m.f. (1998) *Til samfundets tarv. Forskningscenter Risø's historie* (Roskilde: Risø).

<sup>14</sup> *NTD-Silicium: Fra forsøg til produktion.*

og glæden hos alle implicerede, da det viste sig at krystallen ikke var særlig radioaktiv! Fem dage senere kunne den returneres til Topsil.



Billede 3. Højspændingsthyristorer i en moderne transformatorstation for omdannelse af højspændt vekselstrøm til jævnstrøm. Kilde: [www.siemens.de](http://www.siemens.de).

Fra et socio-teknisk og organisatorisk synspunkt var neutrondoterings-teknologien langt mere kompleks end den konventionelle doteringsmetode. I den konventionelle doterings-teknologi var alle led i produktionen samlet hos FZ-producenten. For FZ-producenterne var neutrondotering ensbetydende med, at man for første gang måtte involvere andre parter i produktions- og innovationsprocessen.<sup>15</sup> Det drejer sig naturligvis primært om operatørerne af den forskningsreaktor, hvori doteringen finder sted. Men fordi der er tale om nuklear teknologi er de statslige helsemyndigheder også med på sidelinjen. I begge tilfælde er der for Europas vedkommende tale om offentlige institutioner. I det følgende vil jeg konkretisere nogle af de problemer, der opstod i spændingsfeltet mellem den private og den offentlige sektor.

#### *Risø og NTD*

Topsil var allerede på dette tidspunkt gennem et tysk firma ved at byde ind på leverancen af neutrondoteret silicium til højspændingsensretterne til et stort amerikansk kraftværk, der var under opførelse. Leverandørerne af højspændingsensretter var som tidligere anført fra begyndelsen af 1970'erne ved at gå fra kviksølvensretter til den nye teknologi baseret på thyristorer. Der var altså potentielt et stort lukrativt marked for NTD-silicium til thyristorer med høj kapacitet, hvilket var baggrunden for, at tyskernes forskning interesserede Topsil. Dette er en vigtig pointe, fordi man ellers let kan komme til at tro, at historien om NTD-silicium fra starten kun handlede om forskning og videnskab, hvilket bekræfter samlebåndsmodellen for innovation. Ret beset var det omvendt:

<sup>15</sup> Stone, *Large Scale Production of NTD Silicon in the United States*, 20.

forskningen i NTD-silicium blev først interessant som teknologi i det øjeblik, hvor siliciumproducenten Topsil og producenterne af kraftkomponenter så et marked for et produkt. Det var efter alt at dømme også derfor, at den kommercielle interesse for NTD-silicium var lav i 1960'erne. Markedet manglede.

DR 2 blev i de følgende måneder benyttet til at lave en mindre produktion, som skulle indgå i en leverance af prøvekomponenter, der skulle testes i USA. DR 2 var en forholdsvis simpel letvandsmodereret forsøgsreaktor af amerikansk konstruktion. Bestrålingen af silicium i denne facilitet var lidt omstændelig, da siliciumkrystallerne skulle drejes manuelt, hvilket kun kunne foregå når reaktoren var lukket ned.<sup>16</sup> Prøveleverancen blev dog fuldført. Men så opstod der pludselig et uventet problem: Risøs ledelse besluttede nemlig i løbet af 1974 at lukke DR 2 for bestandigt! Man havde dog ikke fået meddelt denne beslutning til Isotoplaboratoriet, som havde givet Topsil tilsagn om, at man var i stand til at bestråle firmaets silicium, hvis de gik hen og fik ordren til USA. Hvis Topsil fik sin ordre, ville Isotoplaboratoriet være i den pinagtige situation, at man ikke var i stand til at bestråle, hvorved begge parter ville miste deres professionelle og kommercielle troværdighed. Heydorn gik derfor til Risøs direktion og forlangte midler til at opbygge nye bestrålingsfaciliteter ved DR 3. Direktionen var da også indstillet på, at der hurtigst muligt blev opbygget nye bestrålingsfaciliteter i DR 3. Dog ikke til bestråling af silicium, som man i direktionen ikke havde nogen interesse i. Der var naturligvis heller ikke nogen der i 1974 kunne forudsige den betydning, som NTD-silicium ville få i fremtiden. Holdningen var rimeligvis den, at Risø som statsinstitution ikke kunne skyde penge beregnet til forskning ind i faciliteter til et privat firmas produktion. Året var 1975 og skillelinjen mellem offentlig og privat var trukket hårdt op. Topsil bevægede sig på fallitens rand, så de havde heller ikke selv penge til at finansiere en bestrålingsfacilitet.

I den situation valgte Heydorn at spille højt spil. Uden direktionens viden bestilte han ved Risøs konstruktionsafdeling sammen med de øvrige faciliteter også en siliciumbestrålingsfacilitet. Samtidig søgte Topsil den statslige fond *Fondet til Fremme af Teknisk og Industriel Udvikling* om et beløb, der kunne dække regningen for fremstillingsarbejdet i Risøs konstruktionsafdeling. Man bevægede sig her på kanten af de interne regler: Det var nemlig på dette tidspunkt ikke tilladt for forskerne på Risø at søge midler uden om direktionen. Samtidig arbejdede konstruktionsafdelingen under stort pres på at fremstille verdens første bestrålingsfacilitet til silicium. Der var tale om et fuldstændigt nyt område, hvor der ikke fandtes noget fortilfælde at modellere faciliteten over. Trods manglende bevilling, usikker finansiering, ingen forudgående erfaring og en uigenkaldelig kort deadline, lykkedes det konstruktionsafdelingen med civilingeniør Kai Hansen som projektleder at få installeret en funktionsdygtig bestrålingsfacilitet i DR3 per 1. november 1975, da DR2 lukkede ned for sidste gang. Til alt held klappede det hele i sidste ende, fordi Topsil både fik sin fondsbevilling og den første ordre på NTD-silicium. Trods den turbulente begyndelse blev Topsil med hjælp fra Risø det første firma i verden, der bragte NTD-silicium på verdensmarkedet.

Det patent som Siemens havde udtaget beskrev ret præcist den fremgangsmetode, som man også fulgte på Risø, hvilket vakte bekymring hos lederen af Isotoplaboratoriet. Men ved at holde lav profil lykkedes det at undgå at skabe opmærksomhed om sagen. Patentet blev udtaget i en række lande, men ikke i Danmark.<sup>17</sup> Som bekendt giver et patent kun beskyttelse i det land, hvor det er udtaget. Som en lille virksomhed var Topsils patentstrategi i mange tilfælde at lede efter huller i de store virksomheders patenter og omgå patenterne med små spidsfindige modifikationer af proces-

<sup>16</sup> Interview med Kaj Heydorn, op.cit note 1, 62.

<sup>17</sup> Brev fra Kaj Heydorn til forfatteren, 4/3 2010.



sen.<sup>18</sup> Da Siemens ikke selv gik ind i produktionen af neutrondoteret silicium, var patentproblemet i sidste ende til at overse.



Billede 4. Et kig ud over reaktortoppen på DR 3 – Risøs største forsøgsreaktor. Selve reaktoren befinder sig under den cirkelformede plade til højre i gulvet. Foto fra 2003, da reaktoren ikke mere var i drift, men hvor instrumenteringen stadig var intakt. DR 3 undergår i skrivende stund dekommissionering. Et udvalg af genstande blev indsamlet af forfatteren i 2006 og opbevares i dag på Steno Museet. Fotograf Lars Kruse, AU-foto.

Årene, hvor man holdt lav profil varede imidlertid ikke længe. I 1979 var Kaj Heydorn og Kai Hansen fra Risøs konstruktionsafdeling således medlemmer af en erhvervsdelegation fra Haldor Topsøe, som besøgte Kina med henblik på at tilbyde levering af udstyr til fremstilling af NTD-silicium. Risøs erfarne konstruktør skitserede under besøget for kineserne, hvorledes han ville indrette en Si-bestrålningsfacilitet i deres russisk-byggede reaktor. Der kom intet konkret ud af forhandlingerne med kineserne, men et besøg mange år senere indikerede, at kineserne nøje havde fulgt Kai Hansens oplæg ved konstruktionen af deres første facilitet til bestråling af silicium.<sup>19</sup>

Topsils første prøveleverance blev leveret i 1974. Året efter aftog de førende leverandører af kraftkomponenter i størrelsesordenen 100 kg. NTD-silicium. Året efter var produktet universelt accepteret blandt kraftkomponentproducenterne og i 1977 rapporterer markedsaktørerne om, et marked for NTD-silicium på mere end 20 tons (det totale marked for FZ-silicium lå på dette tidspunkt omkring

<sup>18</sup> Samtale med Hans Janus, 20/1 2010.

<sup>19</sup> NN [Kaj Heydorn] (1982) "Eksport af neutroner", *Årsberetning. Forsøgsanlæg Risø*, 12-13; Brev fra Kaj Heydorn til forfatteren, 4/3 2010.

100 tons per år).<sup>20</sup> Producenterne af FZ-silicium fik med introduktionen af neutrondotering en ny renæssance.

Topsil var en af de siliciumproducenter, der i slutningen af 1970'erne gik forrest med til at udbrede anvendelsen af neutrondoteret silicium. Opmuntret af den kommercielle succes for NTD-silicium og den øgede konkurrence fra de øvrige producenter af FZ-silicium vedtog virksomheden i 1979 en forretningsplan, der helt udfasede brugen af den konventionelle doteringsteknik. Ved at gå over til udelukkende at benytte neutrondotering kunne Topsil både forenkle produktionsgangen og høste stordriftsfordele (se diagram 1), hvilket kompenserede for de øgede doteringsomkostninger.<sup>21</sup> Den kemiske doteringsteknik var vanskelig at styre, hvilket betød at producenterne måtte kassere en hel del silicium. En væsentlig fordel ved NTD-processen var, at den medførte lavere materialeforbrug under produktionsprocessen. Og fordi produktet var mere ensartet kunne komponentproducenterne også reducere den anvendte mængde FZ-silicium pr. komponent. Alt i alt medførte dette faktisk, at efterspørgslen efter FZ-silicium i slutningen af 1970'erne stagnerede til trods af en underliggende vækst på 15 % pr. år i markedet for komponenter.<sup>22</sup>

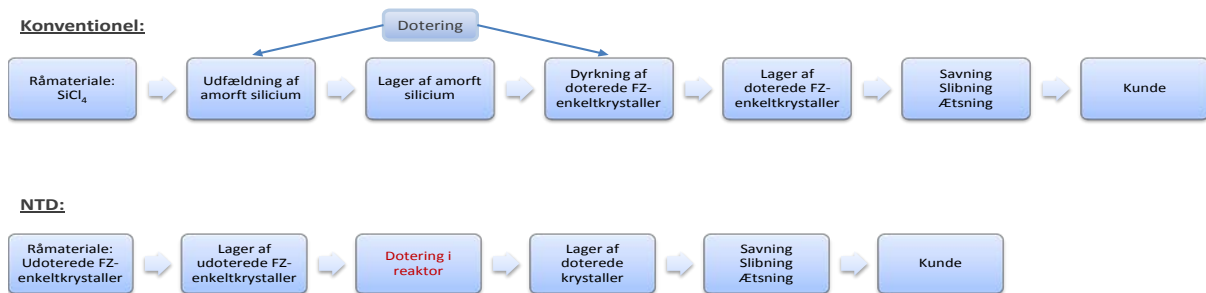


Diagram 1: Procesdiagram for fremstilling af konventionelt (kemisk) doteret silicium og NTD-silicium. Det fremgår tydeligt at introduktionen af NTD-teknologien forenkler produktionsprocessen.

Silicium til thyristorer sælges som tynde skiver – såkaldte ”wafere” – med en typisk tykkelse på 1/3 millimeter. For siliciumproducenterne ville det være fordelagtigt, hvis man i stedet for at dotere krystallerne kunne dotere de udsavede og polerede wafere, da dette ville reducere omkostningerne til doteringsprocessen med ca. 50 % og reducere behovet for lagerkapacitet. Samtidig ville dette have den fordel, at hovedlageret kunne flyttes helt hen mod slutningen af produktionsprocessen, hvilket giver forøget fleksibilitet i hele produktionskæden. Dette viste sig at være en teknologisk umulighed, dels fordi det forøgede overfladeareal medførte en større grad af urenheder og dermed et mere radioaktivt produkt, og dels fordi det skøre materiale var for vanskeligt at håndtere.<sup>23</sup> På Isotoplaboratoriet blev man af forskellige firmaer adskillige gange bedt om at prøvebestråle ”wafere”, men anmodningerne blev af de anførte grunde afvist.<sup>24</sup>

<sup>20</sup> H. Janus (1979) “Application of NTD Silicon for Power Electronics”, J.M. Meese (red.) *Neutron Transmutation Doping in Semiconductors*, 37-45, 38.

<sup>21</sup> ”Topsil Manufacturing Strategies. Discussion Background”, 13/3 1979, Hans Janus’ private arkiv; samtale med Hans Janus 16/2 2010. Fordelene ved NTD er diskuteret i Janus, *Application of NTD Silicon for Power Electronics*.

<sup>22</sup> Janus, *Application of NTD Silicon for Power Electronics*, 43.

<sup>23</sup> Samtale med Olof Malmros 8/2 2010.

<sup>24</sup> Korrespondance med Kaj Heydorn 2/3 2010.

Risøs bestrålingskapacitet var imidlertid i de første år begrænset, hvorfor Topsil også fik bestrålet silicium i Norge (Kjeller), Sverige (Studsvik), England (Harwell) og Frankrig (CEA/CENG).<sup>25</sup> Svenskerne var stærkt interesseret i NTD-silicium og konstruerede fuldautomatiske bestrålingsfaciliteter til deres forsøgsreaktor R2. Topsils samarbejde med den franske atomenergikommission CEA var særligt tæt og involverede ud over NTD-silicium også overførsel af virksomhedens særlige knowhow vedrørende indium og bismuth doteret silicium til infrarøde detektorer. Frankrig satsede i disse år stærkt på NTD-silicium ikke mindst på grund af behovet for avanceret HVDC-teknologi i forbindelse med udviklingen af TGV-toget.

Danmark er forbundet med Sverige, Norge og Finland via det europæiske elsamarbejdsnet, KONTISCAN-forbindelsen, der strækker sig fra det sydlige Europa gennem Danmark til Skandinavien. Fra Danmark sker transmissionen gennem et undersøisk jævnstrømskabel med en overførings-effekt på 250 MW ved en spænding på 250 kV. De thyristorer, der bruges i KONTISCAN, er produceret af NTD-silicium, som har været en tur i Risøs DR 3 reaktor.<sup>26</sup>

#### *Industrialiseret siliciumdotering på Risø*

Med flytningen til den store tungtvands reaktor DR 3 havde Isotoplaboratoriet fået adgang til en reaktor, der var perfekt til formålet. DR3 har nemlig et stort volumen, hvor neutronerne har den rette hastighed, idet der til doteringen kræves langsomme (såkaldt termiske) neutroner. DR 3 havde således potentielt en meget høj produktionskapacitet. Mere vigtigt er det dog, at forholdet mellem langsomme og hurtige neutroner er mest optimalt i en tungtvandsreaktor, hvilket er vigtigt for produktets kvalitet, da hurtige neutroner øger antallet af deformationer i krystalgitteret. Derfor var tungtvandsreaktorer konstrueret som DR 3 i specielt høj kurs hos NTD-producenterne.<sup>27</sup> Mange læsere vil måske undre sig over, at man ikke bare bruger almindelige kraftreaktorer til doteringen. Svaret er, at forsøgsreaktorerne netop er udviklet specielt med henblik på bestråling af materialer og derfor er langt bedre til dette formål.

Efter en langsom opstart i slutningen af 1970'erne lykkedes det i løbet af de næste 20 år for Isotoplaboratoriet at opbygge en række bestrålingsfaciliteter og skaffe andre kunder end Topsil. Et af de forhold, der motiverede Isotoplaboratoriet til at skaffe nye kunder, var bl.a., at Topsil i slutningen af 1970'erne økonomisk kørte på kanten med betalingsstandsning i 1978. Skulle man sikre sig en fortsat position i doteringsbranchen, måtte Isotoplaboratoriet skaffe sig andre kunder. Men Isotoplaboratoriet havde næsten ingen viden om de øvrige siliciumproducenter. Topsil havde naturligvis ingen interesse i, at Risø også bestrålede silicium for konkurrenterne, så her var der ikke nogen hjælp at hente. Isotoplaboratoriet hyrede derfor en tidligere salgschef hos Topsil som konsulent.<sup>28</sup> Herigennem kom man i kontakt med Heinz Herzer, der var leder af den tyske kemikoncern Wacker-Chemitronics afdeling for FZ-silicium.

Wacker var Europas største producent af FZ-silicium og neutrontoteret silicium. Wackers silicium-aktiviteter lå ganske vist kun 50 km fra DR 3's søsterreaktor FRJ-2 ved Forschungszentrum Jülich, men her var man ikke interesseret i at bestråle silicium. Tyskerne havde derfor tidligere fået bestrålet silicium i England. Der var lidt af et scoop, da Risø i 1980 indgik kontrakt med Wacker om

<sup>25</sup> Samtale med Olof Malmros 8/2 2010.

<sup>26</sup> NN, *Eksport af neutroner*.

<sup>27</sup> Se interview med lederen af HIFAR-reaktoren:

[http://www.ansto.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0006/41874/ANSTO\\_a\\_big\\_player\\_in\\_silicon\\_irradiation.pdf](http://www.ansto.gov.au/_data/assets/pdf_file/0006/41874/ANSTO_a_big_player_in_silicon_irradiation.pdf)

<sup>28</sup> Samtale med Kaj Heydorn 20/1 2010.

bestråling af en ganske betragtelig del af deres silicium efter en i forvejen fastlagt pris og leveringsplan for en årrække frem. Aftalen var dristig for begge parter, fordi de nødvendige bestrålingsfaciliteter endnu ikke fandtes. Et centralt element i aftalen med Wacker var netop, at den sikrede penge til en løbende udbygning af bestrålingsfaciliteter i DR 3. Når Isotoplaboratoriet overhovedet turde forpligte sig på en sådan kontakt, skyldtes det frem for alt den i konstruktionsafdelingen værende kompetence og utrættelige omhu for at følge projekterne til dørs.<sup>29</sup>



Billede 5. En færdigbestrålet siliciumkrystal flyttes i en blyafskærmet "flaske" fra det forsøgsrør i DR 3, hvori den er blevet bestrålet til lagerområdet, hvor den skal stå til "afkøling" i en uges tid. Herefter er strålingsniveauet så lavt, at krystallerne kan håndteres med de bare hænder. I reaktoroperatørernes jargon gik siliciumflasken under navnet "den røde tyr", fordi den var så vanskelig at styre! Foto fra sidst i 1970'erne. Risøs Billedarkiv.

I 1980-81 gik det igen sløjt med salget af Topsils produkter og Motorola besluttede sig for at lukke virksomheden. Den dødsdømte virksomhed blev overtaget af et joint venture bestående af dansk-amerikaneren Leif Pedersen og Phoenix Materials Corporation.<sup>30</sup> Da Topsil på papiret ejede flere af de bestrålingsfaciliteter, som sad i DR 3, var det en kilde til usikkerhed på Isotoplaboratoriet. Direktøren for Phoenix Materials Corporation, William Santini, var klar over, at han ejede en del af Risøs bestrålingsfaciliteter for silicium og kom personligt ned på Isotoplaboratoriet for at besigtige sin nye ejendom. Han oplyste, at der i fremtiden ikke skulle fremstilles silicium på Topsil og han ville derfor gerne have bestrålingsfaciliteterne med, så de kunne sælges sammen med det øvrige produktionsudstyr i Frederikssund. Isotoplaboratoriet var omvendt nødt til at råde over faciliteterne for at kunne opfylde forpligtelserne over for Wacker. Hans krav blev derfor afvist med henvisning til, at faciliteterne var alt for radioaktive. Bølgerne gik højt, og Santini truede med at pudse sine jurister på sagen. Gemytterne blev dog afdæmpet inden det kom til håndgribeligheder. Den delikate sag fandt først sin løsning, da de nye amerikanske ejere besluttede sig for at genoplive siliciumproduktionen i Frederikssund under navnet Topsil A/S. Affæren fik som konsekvens, at Risø gennem løbende rabatter til Topsil over nogle år fik overtaget faciliteterne 100 %.<sup>31</sup>

<sup>29</sup> Brev fra Kaj Heydorn til forfatteren, 4/3 2010.

<sup>30</sup> "Dansk-amerikaner bag køb af Topsil i Frederikssund", *Frederiksborg Amtsavis*, 30/8 1981.

<sup>31</sup> Interview med Kaj Heydorn, op.cit note 1, 65.

Verdensmarkedet for NTD-silicium blev i 1980'erne domineret af seks virksomheder: foruden Topsil og Wacker-Chemitronic i Europa, drejede det sig om Monsanto (USA) og de tre japanske firmaer Komatsu Electronic Metals, Shin-Etsu og Japan Silicon.<sup>32</sup> Japanerne havde allerede i begyndelsen af 1980'erne en stærk position på det globale marked for NTD-silicium. I foråret 1981 skulle HT-Equipment levere nyudviklet FZ-udstyr til Komatsu og herigennem kom Isotoplaboratoriet i kontakt med det japanske firma. Den danske ambassade i Tokyo fik yderligere udvirket, at Isotoplaboratoriet samme år kom med i erhvervsdelegationen ved det danske kongehus' officielle besøg i Japan. Det førte til en vigtig kontrakt med Komatsu og senere til en række kontrakter med de øvrige virksomheder i den japanske siliciumindustri. I de følgende år og indtil DR 3's nedlukning i 2000 bestrålede Risø silicium for de fem store japanske firmaer Komatsu, Shin-Etsu, Japan Silicon, samt OTC/Sumitomi Sitix Corporation og Toshiba.<sup>33</sup>

Også i Japan var situationen den, at de hjemlige forsøgsreaktorer ikke var særlig interesseret i siliciumdotering. Det gav sig udslag i så eksorbitant høje priser, at det kunne betale sig for de japanske firmaer at sende deres silicium med luftfragt til dotering i Europa. Ifølge forlydender fra de japanske firmaer var der også i Japan problemer med at overholde leveringstiderne. De japanske firmaers voksende interesse for Risø skal formentlig også ses i lyset af, at den eneste tungtvandsreaktor i Japan, JRR-3, i 1981 stod foran nedlukning. Reaktoren blev faktisk lukket 1. januar 1983 og undergik en ombygning for så at åbne i 1990. Denne reaktor havde hidtil været centrum for den japanske doteringsindustri. Den japanske siliciumindustri var derfor på et tidligt tidspunkt begyndt at benytte udenlandske reaktorer. Men også her var der ind i mellem problemer. Et af firmaerne talte åbent om dårlige erfaringer med at få bestrålet silicium ved den amerikanske universitetsreaktor i Missouri.<sup>34</sup>

DR 3 var Risøs flagskib. Den store engelskkonstruerede tungtvandsreaktor var oprindeligt erhvervet med henblik på test af reaktormaterialer. Da Risø ret hurtigt måtte opgive tanken om at udvikle sin egen kraftreaktor, blev reaktoren overtaget af fysikerne, som i løbet af 1960'erne opbyggede en af Europas førende faciliteter til neutron- og materialefysik. Med flytningen til DR 3 var siliciumproduktionen kommet til et sted med næsten ubegrænsede muligheder for vækst. I 1987 var man nået så vidt, at Isotoplaboratoriet lagde beslag på alle disponible lodrette forsøgshuller i DR 3. Et forsøgshul er en åbning, der giver adgang til området med høj neutronintensitet nær reaktorkernen eller i reaktortanken. Man bestrålede dette år i alt 16 tons silicium, hvilket svarede til 95 % af kapaciteten på toppen af reaktoren. Man måtte altså se sig om efter endnu en facilitet.

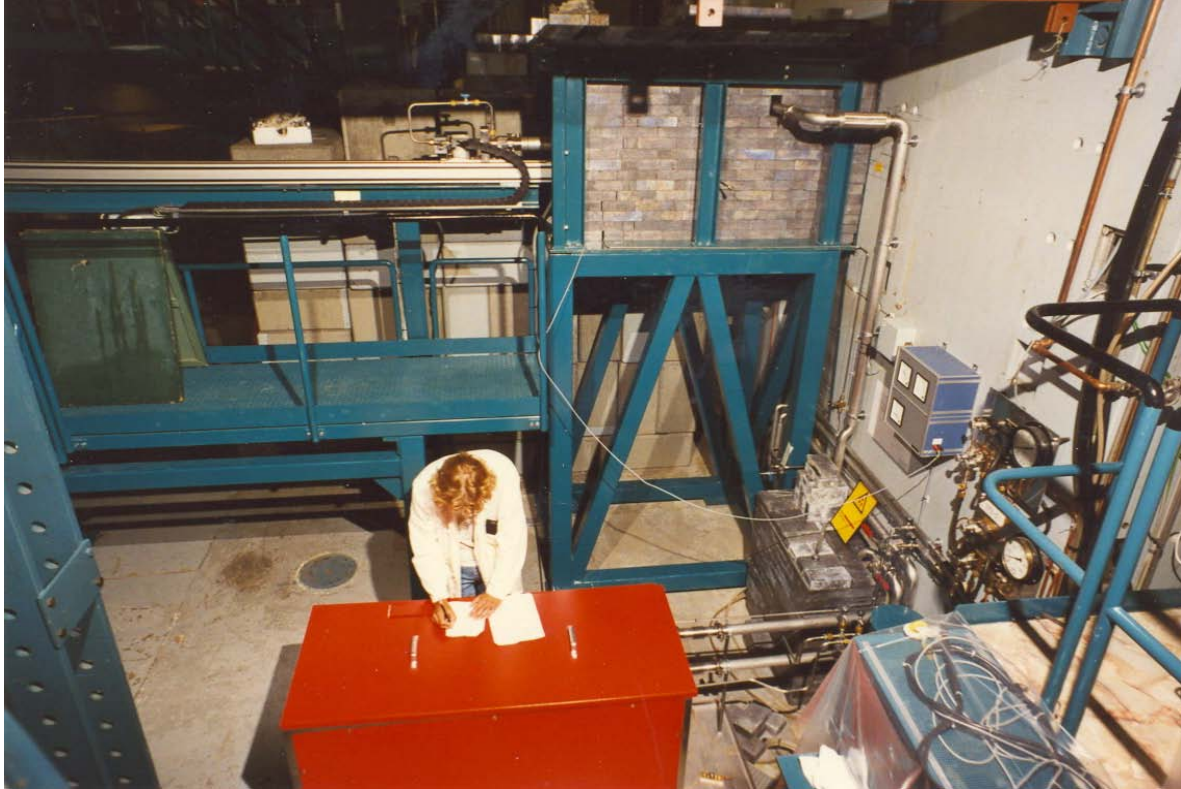
Ud over de lodrette forsøgshuller, var reaktoren også forsynet med 4 vandrette forsøgsrør. Heldigvis besluttede fysikerne i 1990 at rømme et af de vandrette forsøgsrør, som dermed gav plads til den ekspanderende siliciumbestrålingsforretning. I 1997-98 overtog siliciumdoteringen endnu et af de vandrette forsøgsrør. De vandrette rør havde potentielt større kapacitet, da de muliggjorde automatisering af doteringsprocessen ved hjælp af computerstyrede bestrålingsfaciliteter, hvilket dog viste sig at være en overordentlig kompliceret affære. Samtidig forøgedes kapaciteten for emner med en diameter på 5 tomme væsentligt. Dette var vigtigt, fordi større dimensioner for firmaerne var ensbetydende med lavere produktionsomkostninger. I de vandrette forsøgsrør blev der opstillet avancerede anordninger med computerstyring af dosis og automatisk fragt af siliciumkrystallerne

<sup>32</sup> Herzer, *Neutron-doped silicon – a marked review*, 5.

<sup>33</sup> Samtale med Kaj Heydorn, 20/1 2010.

<sup>34</sup> *Ibid.*

ind og ud af reaktoren (billede 6).<sup>35</sup> Selvom siliciumforretningen nu antog industrielle dimensioner, er det værd at bemærke, at der ikke var tale om serieproduktion. Hver siliciumkrystal krævede nemlig en individuelt fastsat strålingsdosis indenfor stramme tolerancer. Hertil kommer, at silicium er et skørt materiale, der skal håndteres med varsomhed.



Billede 6: En reaktoroperatør arbejder ved DR 3's første automatiske facilitet for indsætning og udtagning af silicium. Foto fra begyndelsen af 1990'erne. Bly- og betonklodser beskytter personalet mod stråling fra reaktorkernen.

Der blev, som det fremgår, fra begyndelsen af 1980'erne og frem på Risø postet mange penge ind i at udbygge bestrålingskapaciteten for silicium. Hvor siliciumdoteringen i 1970'erne havde været på tålt ophold ændrede holdningen til den type virksomhed sig i Risøs ledelse i det efterfølgende årti. Begyndelsen af 1980'erne var præget af nedskæringer i de offentlige forskningsbudgetter og institutionerne blev af regeringen opfordret til at søge eksterne bevillinger og øge kontraktforskning og anden indtægtsdækkende virksomhed. For at fremme den udvikling fik statsinstitutioner nu som noget nyt lov til selv at disponere over deres indtægter, hvor disse tidligere gik i statskassen.<sup>36</sup>

Da produktionen i første halvdel af 1990'erne nåede sit højdepunkt, bestrålede man i DR 3 årligt 25-30 tons silicium. Man havde da faciliteter til at håndtere silicium i størrelserne fra 2 til 5 tommer. Den gennemsnitlige årlige indtægt fra produktionen af NTD-silicium androg i perioden fra 1991-97 ca. 20 mio. kr., hvilket helt overskyggede Risøs øvrige indtægter fra produktion af radioaktive

<sup>35</sup> For flere detaljer se K.H. Nielsen og N. Hegaard (2007) "The new horizontal facility for neutron transmutation doping of silicon at DR 3", *Utilization Related Design Features of Research Reactors: A Compendium*, Technical Reports Series No 455, International Atomic Energy Agency, Vienna (2007), 189-203.

<sup>36</sup> Interview med Kaj Heydorn, op.cit note 1, 66-67.

isotoper og mærkede forbindelser.<sup>37</sup> De præcise data er givet i diagram 2. Indtægterne dækkede en betydelig del af driftsudgifterne ved DR 3, der i slutningen af 1990'erne lå omkring 40 mio. kr.<sup>38</sup>

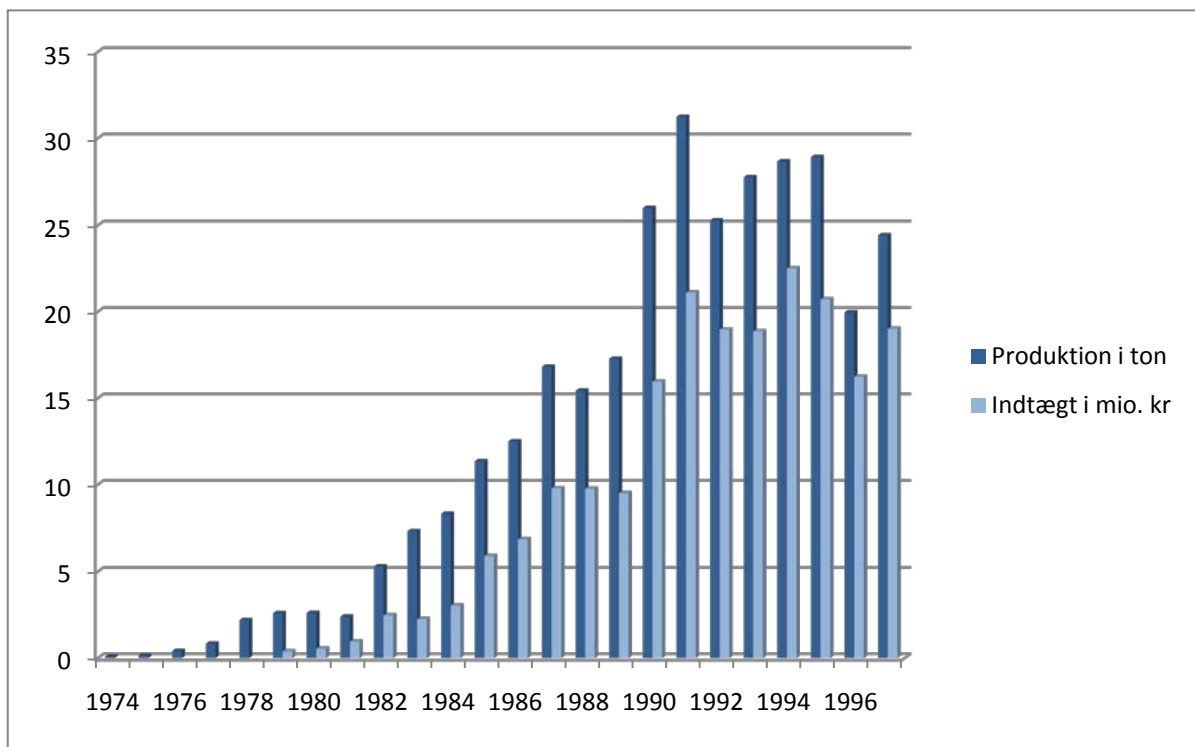


Diagram 2. Risøs siliciumforretning i tal. Doteret mængde og Risøs indtægter heraf 1974-97.<sup>39</sup>

Siliciumbranchen er præget af hemmelighedskræmmeri, der gør det vanskeligt at bedømme, hvor stor en del af verdensmarkedet Risø dækkede. I 1980 blev den samlede globale produktion anslået til 35 tons.<sup>40</sup> En officiel rapport fra IAEA fra 2007 angiver, at det globale marked for NTD-silicium omkring år 2000 nåede 100 tons p.a. samt, at markedet i de følgende år stabiliserede sig i dette leje. Værdien af den globale produktion vurderedes i samme rapport til 100 mio. EUR (750 mio. kr) p.a. mens forskningsreaktorenes indtægter ved bestråling af silicium blev anslået til 10 mio EUR (75 mio. kr) p.a.<sup>41</sup> Fordi der er tale om et nicheprodukt, er markedet for NTD-silicium således ikke overvældende stort, men til gengæld er det af meget stor økonomisk betydning for de reaktorfaciliteter, der satser på bestråling af silicium. De globale produktionsestimater understøtter umiddelbart Risøs eget skøn om, at DR 3 i 1990'erne bestrålede ca. 1/3 af den globale produktion af NTD-silicium.<sup>42</sup> Ifølge de angivne tal var den gennemsnitlige pris på siliciumbestråling på det globale

<sup>37</sup> Intern rapport, Risø-M-2410. *Isotoplaboratoriet 1959-1984*, s. 7. Findes på Risø Bibliotek.

<sup>38</sup> Interview med fhv. reaktorchef Heinz Floto, 13/3 2007, 94. Op.cit. note 1.

<sup>39</sup> Talmateriale og regnskabstal 1998, Kaj Heydorns privatarkiv.

<sup>40</sup> Herzer, *Neutron-doped silicon – a marked review*, 4.

<sup>41</sup> *Utilization Related Design Features of Research Reactors: A Compendium*, s. 151, Technical Reports Series No 455, International Atomic Energy Agency, Vienna (2007). En kinesisk kilde fra 2009 angiver dog et globalt output på 180 tons for 2009. Se Myong-Seop Kim; Sang-Jun Park; In-Cheol Lim (2009), "Estimation of future demand for neutron-transmutation-doped silicon caused by development of hybrid electric vehicle and its supply from research reactors", *Power Electronics and Applications*, 2009 volume, Issue, 8-10 Sept, 1-10.

<sup>42</sup> NN, *Eksport af neutroner*, 12. Telefonsamtale med ingeniør Nils Hegaard, 31/1 2007.

markeds omkring år 2000 altså ca. 0,75 øre/g, hvilket jævnført med på side 4 opgivne tal viser, at Risø prismæssigt lå i den øvre ende af markedet.

Det bryder med mange tilvante forestillinger, men i dette tilfælde ser vi offentligt ansatte forskere og ingeniører arbejde målrettet på at oparbejde en global kundekreds og trimme en produktion med henblik på at gøre den profitabel. Ret beset var der ikke noget nyt i, at Risø tjente penge på at servicere industrien. Fx steriliserede man i 1960'erne ved Risøs elektronaccelerator store mængder medicinsk engangsudstyr.<sup>43</sup> Men det var første gang, at man leverede den slags serviceydelser i så stor en skala og på et globalt plan. NTD-processen var dermed med til at redefinere grænsen mellem det offentlige og det private.

### *Risøs styrker*

Siliciumeventyret sluttede brat med beslutningen om at nedlukke alle Risøs nukleare forskningsfaciliteter, herunder også DR 3, i 2000. Men hvordan gik det til, at Risø frem til da kunne fastholde sin internationale førerposition på siliciumområdet? Her er det først og fremmest vigtigt at gøre opmærksom på, at antallet af velegnede faciliteter selv på verdensplan var yderst begrænset. Tungtvandsreaktorer er som tidligere nævnt særligt velegnede til formålet, hvilket siliciumproducenterne da også lagde stor vægt på og benyttede i deres reklamemateriale.<sup>44</sup> Midt i 1980'erne var der kun omkring 17 tungtvandsreaktorer i drift i den vestlige verden. Som tidligere nævnt var reaktorer af DIDO-typen specielt velegnede på grund af deres attraktive forhold mellem langsomme og hurtige neutroner, samtidig med at de havde en høj kapacitet. DR 3 var af denne type, hvoraf der kun eksisterede seks eksemplarer i verden. Karakteristik nok var det en DIDO-reaktor – HIFAR i Australien – som efter 2000 overtog den position, som DR 3 hidtil havde indtaget på verdensmarkedet.<sup>45</sup> Af IAEA's liste over forskningsreaktorer fremgår det, at der fra omkring 1970 og frem i verden blev lukket en række tungtvandsreaktorer. Harwell, der allerede i slutningen af 1970'erne satsede stærkt på siliciumdotering, lukkede i 1990 to tungtvandsreaktorer af DIDO-typen, som begge blev benyttet til siliciumbestråling, hvilket alt andet lige må have givet plads til ekspansion andre steder i verden. Risø lader altså til at have haft den rigtige reaktor på det rigtige tidspunkt. For det andet er det naturligt at pege på, at Risø og Topsil var *first mover* på området, hvilket alt andet lige giver en betydningsfuld akkumulation af teknisk knowhow. Jeg vil mene af disse rent tekniske faktorer var af afgørende betydning for Risøs succes. Men de tekniske forhold forklarer ikke i sig selv, hvordan Risø var i stand til at fastholde sin førerposition i mere end 25 år i et marked i vækst. De kunne jo fx forvalte deres muligheder dårligt.

Et mere nuanceret svar på spørgsmålet, der også inddrager socio-økonomiske, institutionelle og organisatoriske forhold, forudsætter en dybtgående komparativ undersøgelse af de forskellige aktører på markedet. Jeg har ikke i denne omgang haft mulighed for at gå i detalje med disse forhold. I mangel heraf må vi derfor nøjes med de lokale forklaringer og det der kan udledes af disse. Det fremhæves, at man på Risø arbejdede målbevidst med kvalitetssikring og kvalitetsudvikling. Isotoplaboratoriet blev således i 1994 ISO 9000 certificeret, som den måske første statsinstitution i Danmark.<sup>46</sup> En af Risøs afgørende forcer var også konstruktionsafdelingen, der efterhånden fik stor

<sup>43</sup> Nielsen (red.), *Til samfundets tarv*, 130-131.

<sup>44</sup> Interview med Kaj Heydorn 15/1 2007, 66. Op cit. note 1.

<sup>45</sup> Som på så mange andre industrielle områder er det dog i dag Kina, der med en årlig produktion på angiveligt op imod 65-68 tons, har sat sig på en betydelig del af verdensmarkedet. Chenyang et al. (2009) "The development and application of silicon Neutron Transmutation Doping (NTD) technology in China", *Engineering Sciences*, 7(4), 95-100.

<sup>46</sup> Interview med Kaj Heydorn 15/1 2007, 68. Op cit. note 1.



ekspertise i at fremstille pålidelige bestrålingsfaciliteter. En tredje forklaring er, at DR3 var en meget stabil og veldrevet reaktor, som gennem tiden kun har haft ganske få uplanlagte nedlukninger.<sup>47</sup> Leveringssikkerhed var et at Isotoplaboratoriets bedste forhandlingskort.

Det kan konstateres, at Risø gennem tiden har kørt en meget liberal politik med hensyn til prisen på serviceydelser. I den officielle beretning om DRAGON projektet konstateres det, at Risø kunne lave bestråling og efterundersøgelser til en pris der var 1/3 af prisen på tilsvarende undersøgelser på den engelske atomenergikommissions forsøgsanlæg i Harwell.<sup>48</sup> Det samme var bestemt ikke tilfældet med siliciumdotering, hvor Risø ifølge Kaj Heydorn prismæssigt lå lidt over de nærmeste konkurrenter.<sup>49</sup> Heydorns udsagn understøttes som tidligere anført også af de tilgængelige tal. Når man på Risø ikke tabte markedsandele skyldtes det, at faktorer som kvalitet, kvalitetskontrol og leveringssikkerhed var i top.

Langt de fleste leverandører af bestrålingsservice er som Risø nationale laboratorier, dvs. offentlige forskningsinstitutioner. Der synes at være en tendens til at NTD-silicium har relativt lav prioritet i lande med store atomenergiprogrammer. I disse lande er der lukrative hjemmemarkeder for tests af reaktormaterialer. Dette forhold kan forklare, hvorfor forsøgsreaktorer i Danmark, Norge og Australien har spillet en fremtrædende rolle på markedet for siliciumdotering. Ingen af disse lande har satset på atomenergi. I forlængelse heraf kan man pege på at der på Risø eksisterede en forståelse og et tæt samarbejde mellem ledelsen af DR 3 og Isotoplaboratoriet baseret på den fælles økonomiske interesse i siliciumdoteringen.<sup>50</sup>

### *En unik innovationshistorie*

Jeg startede med at kalde NTD-silicium for en i dansk henseende unik innovationshistorie. Innovationsprocesser udviser normalt et fænomen, som innovationsforskere kalder ”path dependency”. Lokalt, kontekst og historie har afgørende betydning for den retning som teknologiske forandringer bevæger sig i. Økonomerne har fx hæftet sig ved, at store dele af et lands eksport af en bestemt varegruppe kan henføres til meget afgrænsede regioner. Blandt de fænomener, der kan forklare, hvorfor innovation i bestemte regioner specialiseres i bestemte retninger er tilstedeværelsen af særlige naturressourcer og dannelsen af afgrænsede selvforstærkede industriklynger med akkumulation af knowhow (fx den vestjyske tekstilindustri, den schweiziske urmagerindustri, diamantforarbejdningsindustrien i Antwerpen etc.). Dannelsen af industriklynger kan have mange historiske årsager. Med henblik på at forklare, hvorfor visse geografiske regioner er mere innovative og har større konkurrencekraft end andre, har innovationsøkonomerne introduceret begrebet om nationale eller regionale innovationssystemer. Hermed forstås i almindelighed det sæt eller system af specifikke samfundsinstitutioner, virksomheder, lovgivningskomplekser og kulturelle særegenheder, som tilsammen giver den teknologiske udvikling retning og afgør dens hastighed. Der findes i litteraturen flere kanoniske definitioner, således skal man ifølge Christopher Freeman ved et nationalt innovationssystem forstå ”the network of institutions in the public and private sectors whose activities and interactions initiate, import, modify and diffuse new technologies”.<sup>51</sup> Richard Nelson giver denne kortere definition: ”a set of institutions whose interactions determine the innovative perfor-

<sup>47</sup> Interview med fhv. reaktorchef Heinz Floto, 13/3 2007, 96. Op cit. note 1.

<sup>48</sup> Shaw, *Europe's Nuclear Power Experiment. History of OECD Dragon Project*, 1983, Pergamon Press.

<sup>49</sup> Interview med Kaj Heydorn 15/1 2007, 68. Op cit. note 1.

<sup>50</sup> Interview med fhv. reaktorchef Heinz Floto, 13/3 2007, 96. Interview med Kaj Heydorn 15/1 2007. Op cit. note 1.

<sup>51</sup> C. Freeman (1987) *Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan*. (London: Pinter), 1.

mance ... of national firms".<sup>52</sup> Ved at studere disse systemer komparativt kan man danne sig et billede af de forskellige landes styrker og svagheder og på den baggrund give innovationspolitiske anbefalinger.<sup>53</sup>

Danmark savnede imidlertid helt virksomheder med kompetencer indenfor højspændingsteknik. Topsil var samtidig den eneste virksomhed i Danmark, der fremstillede halvledermaterialer. Man kan således argumentere for at diffusion, cirkulation og tilgængelighed af global viden bevirker, at lokale faktorer ikke har den samme betydning i videnintensive brancher. Cirkulation af viden minimerer i en vis udstrækning regional specificitet. Hvis man således skal lokalisere rødderne til Topsils innovation omkring NTD-silicium er den rette kontekst ikke Danmark men snarere de internationale ingeniørvirksomheder som Topsil henholdsvis samarbejdede og konkurrerede med – altså ASAE, BBC og Siemens. Mere generelt foregik den her beskrevne udvikling i et transnationalt innovationssystem, et grænseoverskridende netværk af multinationale virksomheder, nationale forskningsinstitutioner og regeringsorganisationer, hvor cirkulationen af teknologisk viden og knowhow blev formidlet og formet af udviklingskontrakter, samarbejdsaftaler og patentbeskrivelser. Det forekommer helt meningsløst at analysere denne udvikling ved hjælp af begreber som nationale eller regionale innovationssystemer. Vi skal derfor benytte sidstnævnte begreber med ekstrem forsigtighed, når vi kigger på innovationscases på videnintensive områder, der involvere multinationale virksomheder.

Dette casestudie demonstrerer således meget tydeligt, hvordan innovationen inden for store tekniske systemer er blevet et globalt fænomen. Hvert af de store tekniske systemer – elektricitetsproduktion, radiokommunikation, mobiltelefoni etc. – kan således betragtes som et mere eller mindre velafgrænset innovationssystem med globale dimensioner. Overfor økonomernes fokus på geografisk afgrænsede innovationssystemer, hvad enten det nu er i form af klynger eller regionale innovationssystemer, kan man på baggrund af dette casestudie anføre, at selve det tekniske system i mange tilfælde bør tilskrives en større forklaringskraft end geografien.

---

<sup>52</sup> R. Nelson, R. (ed.) (1993), *National Innovation Systems. A Comparative Analysis* (Oxford/New York: Oxford University Press), 4-5.

<sup>53</sup> For en interessant og eksemplarisk udfoldelse af denne tankegang, se C. Edquist og B.-Å. Lundvall (1993) "Comparing the Danish and Swedish Systems of Innovation" C. Edquist, in Nelson, R.R. (red.), *National Innovation Systems: A Comparative Analysis* (Oxford: Oxford University Press), 265-298.