

1/10

C 35-945

CENTRAL ELECTRICITY GENERATING BOARD



DUNGENESS B NUCLEAR POWER STATION
(In German)

Das Kernkraftwerk Dungeness 'B'

Das Kernkraftwerk Dungeness 'B'

Das Kernkraftwerk Dungeness 'B' der Central Electricity Generating Board (C.E.G.B.) in Kent, das mit fortgeschrittenen gasgekühlten Reaktoren (A.G.R.) ausgestattet werden soll, wird eine Nettoleistung von etwa 1 200 000 kW besitzen und das leistungsfähigste Kernkraftwerk der Welt sein.

Es wird das erste Kernkraftwerk im Rahmen des zweiten Kernenergieprogrammes Großbritanniens sein (das in dem Weißbuch 2335 der Regierung umrissen wurde), und es wird von Atomic Power Constructions Ltd. (A.P.C.) errichtet werden. Es wird geschätzt, daß die Kosten der an diesem Werk erzeugten Elektrizität um mehr als 25% geringer sein werden, als bei dem neunten und leistungsfähigsten der Magnox-Kernkraftwerke, das in Wylfa, Anglesey, errichtet wird, und um mehr als 10% geringer als bei dem modernsten mit Kohle gefeuerten Kraftwerk, das sich zur Zeit in Cottam, Nottinghamshire, im Bau befindet.

Das erste Kernenergieprogramm umfaßte neun Werke (siehe Tabelle I), die auf den von der United Kingdom Atomic Energy Authority (U.K.A.E.A.) in Calder Hall entwickelten Grundsätzen beruhten. Die Zwillingsreaktoren in jedem dieser Kraftwerke sind graphitmoderiert und mit Kohlendioxydgas gekühlt; den Brennstoff bilden Natururanmetallelemente in Magnesiumlegierungshülsen. Das Reaktorsystem ist nach dieser Magnesiumlegierung, die als "Magnox" bezeichnet wird, benannt. Die ersten Magnox Reaktoren haben sich im Betrieb als zuverlässig erwiesen. Ihre Betriebskosten sind zwar gering, doch ihre Kapitalkosten sind hoch, so daß es schwierig ist, sie im Vergleich mit großen modernen mit Kohle oder Öl gefeuerten Kraftwerken vollkommen wirtschaftlich zu machen.

Anstelle des Magnox-Systems hat die U.K.A.E.A. jedoch den A.G.R. entwickelt, und davon einen Prototyp in Windscale errichtet. Dieser Reaktor ist ebenfalls graphitmoderiert und mit Kohlendioxydgas gekühlt, doch wird als Brennstoff Urandioxyd in Hülsen aus rostfreiem Stahl verwendet. Zwar ist leicht angereichertes Uran erforderlich, doch können mit diesem Reaktor viel höhere Temperaturen und spezifische Leistungsdichten im Brennstoff erzielt werden, als mit dem Magnox Reaktor, und es sind auch viel höhere Brennstoffbestrahlungen möglich. Letztere betragen etwa 18000 bis 20000 MW Tage/Tonne verglichen mit 3000 bis 4000 MW Tage/Tonne bei den Magnox Reaktoren.

Der neue Reaktor ist daher kompakter und liefert Dampf zum Antrieb moderner großer Hochleistungsturbogeneratoren, wie sie in den neuesten mit Kohle und Öl gefeuerten Kraftwerken angeordnet sind.

Der Windscale A.G.R. wurde anfangs 1963 in Betrieb genommen. Die einheitlich guten Erfahrungen, die damit erzielt wurden, sowie die günstigen Resultate anderer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Bezug auf den für einen kommerziellen Reaktor erforderlichen Graphit veranlaßten die C.E.G.B. dazu, anfangs 1964 ein Kraftwerk dieser Art auszuschreiben. Dieses sollte in Dungeness (Abb. 6) am Ärmelkanal anschließend an dem fast vollendeten Magnox Werk errichtet werden.

Am 1. Februar 1965 erhielt die C.E.G.B. Angebote für den Bau von Kraftwerken mit A.G. bzw. wassermoderierten Reaktoren. Bei dem A.G.R. der A.P.C. sind die Energieerzeugungskosten geringer als bei irgend einem anderen der für Dungeness 'B' angebotenen Systeme.

Entwurf des Kraftwerkes

Der vollständige Reaktor einschließlich des Kernes, der Hauptgasgebläse und der Kessel befindet sich in einem Druckgefäß aus Beton; der Kern ist in der Mitte des Druckgefäßes und die Gebläse befinden sich, wie in Abb. 4 dargestellt, unterhalb der Kessel. Ein innerer Druckzylinder in der Form einer Glocke trennt den Kern von den Kesseln. Die Gebläse fördern das Gas in den Bereich innerhalb dieses Zylinders, wobei ein Teil des Gases durch den Kern nach unten strömt und den Graphit sowie seine Halterahmen ungefähr auf der Eintrittstemperatur erhält. Das gesamte Gas strömt dann durch die Brennstoffkanäle und Laderohre nach oben und wird durch Abzüge in den Raum über dem Druckzylinder gefördert, von wo er durch die Kessel wieder zu den Gebläseeinlässen zurückströmt.

Die Innenwände des Druckgefäßes aus Beton sind mit einer Wärmeisolierung aus rostfreiem Stahl verkleidet, so daß es unnötig ist, eine heiße Zelle, wie in dem Windscale A.G.R., vorzusehen. Rings um und über dem Kern sind Schilde angeordnet, die die Aktivierung der Kessel und Gebläse verhindern, so daß diese ohne weiteres zugänglich sind und wie erforderlich gewartet werden können. Unter gewissen Verhältnissen ist es auch möglich, in den Raum über dem Kern einzutreten.

Das Druckgefäß aus Beton ist zylindrisch und durch peripherische bzw. vertikale Drahtseile in dem Zylinderkörper, sowie durch horizontale Drahtseile in den beiden Enddeckeln vorgespannt. Die innere Grenzfläche ist durch eine wassergekühlte Membrane aus Flußstahl abgedichtet.

Die Kessel sind von Zwangsdurchlaufbauweise mit einstufiger Zwischenüberhitzung. Die Kesselrohrenden sind so angeordnet, daß sie zur Anbringung von Verschlüssen oder für andere Arbeiten ohne Eintritt in das Druckgefäß erreicht werden können. Es sind vier Kesselteile je Reaktor vorgesehen, von denen jeder als Einheit mit einem Gasgebläse arbeitet.

Jedes Gasgebläse ist eine Zentrifugalmaschine, deren umlaufende Teile eine unten an der Wand des Druckgefäßes angeordnete Patroneneinheit bilden. Ein einfaches Muffenventil dient zur Trennung des Gebläses von der Hauptgasleitung, so daß die ganze Patroneneinheit nach Druckentspannung, doch ohne das Druckgefäß mit Luft zu füllen, durch die Wand des Gefäßes zur Wartung ausgebaut werden kann. Falls erforderlich können die anderen drei Gebläse wieder unter Vollast betrieben werden, nachdem die vierte Öffnung abgedichtet wurde. Jedes Gebläse wird mit einem Synchronmotor durch eine Flüssigkeitskupplung angetrieben, die die Regelung der Gebläsedrehzahl ermöglicht.

Der Uranradioxydbrennstoff ist in Hülse aus rostfreiem Stahl enthalten, wie in dem U.K.A.E.A. Prototyp. Diese sind in drei konzentrischen Ringbündeln von 36 Hülse innerhalb von Graphitmuffen angeordnet, so daß sie 101,6 cm lange Brennstoffelemente bilden. Die Mehrkapselbrennstoffelemente des A.G.R. sind von den in den Magnox-Werken zur Anwendung gelangenden Brennstoffelementen ganz verschieden, wie dies in Abb. 5 ersichtlich ist. Die Leistungsdichte im Brennstoff ist etwa dreimal so hoch wie bei dem Magnox-System und die axiale Verschiebung der Brennstoffelemente nach teilweiser Bestrahlung bedingt, daß der ganze Brennstoff im wesentlichen gleichmäßig bestrahlt wird.

Individuelle Standrohre, die durch das Druckgefäß führen, ermöglichen den Zugang zu jedem Kanal in dem Kern. Acht Brennstoffelemente sind zu einer Kette verbunden, die an einer in dem Standrohr angeordneten Absperrvorrichtung angebracht ist. Die ganze Kombination bildet eine Gruppe, die als Einheit von der Lademaschine transportiert und in den Reaktor eingeführt wird. Die Absperrvorrichtungen enthalten motorbetriebene Sperrventile, mit denen bei normalen Betriebsverhältnissen die Kanalströmung von der Schaltwarte aus geregelt werden kann. Dies ist ein Merkmal, welches es ermöglicht, maximale Leistung zu erzielen und gleichzeitig komplizierte Arbeit auf der Beschickungsbühne zu vermeiden. Die Regelstäbe sind an ähnlichen Absperrvorrichtungen angebracht, die die Antriebsmotoren und Mechanismen enthalten, und sie sind mit den Brennstoffgruppen auswechselbar.

Eine einzige Lademaschine bedient beide Reaktoren. Sie ist auf einem Krangerüst über der Beschickungsbühne angeordnet und kann mit jedem der Standrohre an beiden Reaktoren oder mit den Bedienungsschächten in dem zentralen Brennstofftransportblock verbunden werden. Die Lademaschine ist für den Betrieb bei Vollast des Reaktors ausgelegt, doch brauchen weder Greifer noch andere Bauteile der Lademaschine die Druckhülle unter der Beschickungsbühne zu diesem Zwecke durchdringen. Alle Transportarbeiten über dem Reaktor werden von der Schaltwarte aus gesteuert.

Die Einrichtungen zum Transport von neuem, bzw. bestrahltem Brennstoff befinden sich in einem zentralen Block zwischen den beiden Reaktoren, und dieser Bereich enthält auch die Wartungsvorrichtungen für die Lademaschine und die Standrohrteile.

660 MW Turbinensätze

Die beiden 660 MW Turbogeneratoren arbeiten unter den gleichen Dampfverhältnissen wie in modernen mit Kohle gefeuerten Kraftwerken. Die Turbinen entsprechen in ihrer technischen Ausbildung den normalen 500 MW Maschinen, die in großen Mengen für die C.E.G.B. hergestellt werden. Die Kondensatoren sind von neuestem Satteltyp. Die Generatoren sind denen, die für die 660 MW überkritischen Anlagen in Drax, Yorkshire, konstruiert werden, ähnlich.

Die von den Turbogeneratoren gelieferte elektrische Leistung wird durch Generatortransformatoren heraufgesetzt und zu dem Netzschaltheis

geleitet. Die Stromverteilung zu den Hilfsgeräten des Kraftwerkes findet wie üblich vom Generator selbst und vom Netz aus statt, wobei die primäre Spannung 11000 V beträgt. Bei völligem Ausfall der auswärtigen Stromversorgung und des normalen Eigenbedarfssystems werden die wesentlichen Strommengen, die zur Aufrechterhaltung der Sicherheit des Kraftwerkes erforderlich sind, durch vier Dieselgeneratoren geliefert, die durch Hilfsbatterien unterstützt sind, so daß garantierte Leistungen aufrechterhalten werden können.

Die beiden Reaktoren sind gemeinsam mit den anderen Anlagen und Geräten des Kraftwerkes in einem einzigen Mehrzweck-Gebäude untergebracht. Dieses ist in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt. Das Gebäude umfaßt einen auf der Landseite befindlichen Reaktorblock, in dem die beiden Reaktoren und der Brennstofftransportblock untergebracht sind, einen Turbinenblock auf der Seeseite, der die Turbogeneratoren und ihre Hilfsgeräte enthält und dazwischen einen Bedienungsblock für die Schaltgeräte, Instrumentierungen, Umkleideräume und andere Gemeinschaftsräume. Unter der Erde, und wo massive Abschirmung erforderlich ist, wurde mit Stahlbeton gebaut, während die anderen Teile des Gebäudes Stahlrahmenkonstrukturen mit Metallschutzverkleidung sind.

Der Betrieb aller wichtigen Anlagen des Werkes wird von einer einzigen Schaltwarte aus gesteuert, die sich in der Mitte des Gebäudes befindet. Es sind hier auch umfangreiche Datenverarbeitungsanlagen vorgesehen.

Das Gebäude und die anderen Teile des Werkes sind so geplant, daß Kontamination verhütet und alle festen radioaktiven Abfälle innerhalb des Gebäudes selbst beseitigt werden; alle Straßen können daher als sauber klassifiziert und freier Zutritt zu dem Haupteingang des Gebäudes gewährt werden. Dank dieser Vorkehrungen ist ausreichender Schutz gegen Strahlung und Kontamination geboten, ohne unnötige Beheligung des Bedienungspersonals bzw. der Besucher.

Was an der Anlage des Kraftwerkes Dungeness 'B' im Vergleich mit den früheren britischen Kraftwerken besonders auffällt, ist seine kompakte Bauart. Dies ist deutlich in dem Plan des Standortes (Abb. 1) der Kraftwerke Dungeness 'A' (550 MW) und 'B' (1200 MW) ersichtlich. Die kompakte Bauweise wird durch erhöhte Leistungsdichten im Brennstoff, verbesserte Dampfverhältnisse, die eng integrierte Auslegung des Reaktors und die Unterbringung der Turbogeneratoren und Reaktoren in einem einzigen Gebäude ermöglicht. Bei dem A.G.R. Entwurf für Dungeness 'B' sind die Reaktormittellinien nur 48 m voneinander entfernt, verglichen mit einem Abstand von mehr als 122 m in Dungeness 'A', und die Leistung je Quadratmeter Bodenfläche ist in diesem Werk etwa viermal so hoch, als dies normalerweise bei Magnox-Kraftwerken der Fall ist.

Betriebsmerkmale

Der für Dungeness 'B' geplante A.G.R. hat zahlreiche interessante Merkmale, die die Wirtschaftlichkeit des Betriebs erhöhen. Das einfache System der Brennstofferneuerung unter Vollast mit Zugang zu den einzelnen Kanälen durch separate Standrohre hat sich in Windscale sehr bewährt. Man rechnet damit, daß dieses System zu guter Verfügbarkeit des Reaktors führen wird, was ebenso wie die Methode der axialen Verschiebung des Brennstoffes entscheidend dazu beitragen sollte, die Brennstoffzykluskosten niedrig zu halten. Der Zugang zu den einzelnen Kanälen durch separate Standrohre erleichtert auch die Messung der Gastemperatur am Ausgang jedes Kanals und die Anordnung eines unter Last wirksamen Regelsystems für das aus jedem Kanal ausströmende Gas gestattet es, die Leistung mit einem Mindestmaß an durch den Brennstoffzyklus bedingten Schwankungen aufrechtzuerhalten.

Das System des Elektrogebläseantriebs mit Flüssigkeitskupplungen zur Drehzahlregelung wurde vorgeschrieben, um die Verfügbarkeit des Reaktors zu verbessern. In Verbindung mit der kompakten Auslegung und der weitgehend automatischen Steuerung sollte dies in niedrigen Arbeitskosten seinen Ausdruck finden. Die durch die Erneuerung des Brennstoffes bedingten Arbeitskosten werden ebenfalls niedrig sein, da der Brennstoff jede Woche nur in insgesamt 2 oder 3 Kanälen erneuert und in etwa der gleichen Anzahl von Kanälen axial verschoben werden muß. (Diese Zahlen beziehen sich auf das ganze Werk mit beiden Reaktoren.)

Die für normale Dampfzustände ausgelegte Turbine sollte ebenfalls zur Erzielung guter Verfügbarkeit beitragen.

Sicherheit

Der A.G.R. hat ausgezeichnete Sicherheitsmerkmale, so daß es möglich sein wird, ihn näher an den Bevölkerungszentren zu errichten, als die früheren Kernkraftwerke der C.E.G.B. Dies wird zum Teil dadurch ermöglicht, daß das Druckgefäß aus Spannbeton die gesamte Kühlgasanlage enthalten wird. Ein solches Gefäß erfordert zu seiner Sicherheit eine sehr große Anzahl separater Spanndrahtseile aus hochfestem Stahl, von denen viele gleichzeitig reißen müßten, damit das Gefäß in irgend einer Weise gefährdet sei. Ein plötzliches Entweichen des Kühlmittels ist daher unvorstellbar und der schlimmste Unfall dieser Art, der in Betracht zu ziehen ist, wäre langsamer Druckverlust durch eine Nebenleitung, der jedoch keine Überhitzung des Brennstoffes verursachen würde.

Diese außerordentlich sichere Kühlanlage würde auch die Freisetzung radioaktiver Strahlen auf einen sehr geringen Wert einschränken, falls aus irgend einem unvorhergesehenen Grunde ein Brennstoffkanal innerhalb des Reaktors in hohem Maße überhitzt würde.

Die Sicherheit des Reaktors wird weiterhin durch die Anwendung von keramischem Urandioxyd-Brennstoff in Hülsen aus rostfreiem Stahl erhöht. Beide diese Materialien können sehr erhebliche Übertemperaturen ohne Gefährdung ertragen und sind selbst bei weit über dem Durchschnitt

liegenden Temperaturen in dem Kohlendioxyd-Kühlgas chemisch inert.

Die Zukunft

Der A.G.R. stellt einen weiteren Fortschritt (nach den Magnox Reaktoren) in der Entwicklung gasgekühlter Reaktoren dar. Wie in allen solchen Entwicklungen kann man damit rechnen, daß die nach Dungeness 'B' zu errichtenden A.G.R. Werke gewisse technische Verbesserungen aufweisen werden.

Nach dem Stand der gegenwärtigen Entwicklungsarbeiten zu schließen, sollte es möglich sein, nicht nur die technischen Anlagen, sondern auch die Betriebsverhältnisse späterer A.G. Reaktoren zu verbessern. Es sind eine Erhöhung des Kühlgasdruckes auf 42 kg/cm^2 , verglichen mit $31,6 \text{ kg/cm}^2$ in Dungeness 'B', sowie erhebliche Verbesserungen der Brennstoffparameter und Brennstofftransportmethoden zu erwarten. Das Ziel wäre eine Verminderung der Energieerzeugungskosten um 10%.

Wenn das Brennstoffelement aus 60 Hülsen von 10 mm Durchmesser anstatt aus 36 Hülsen von 14,5 mm Durchmesser bestünde, könnte die Leistungsdichte im Brennstoff ungefähr verdoppelt werden. Die Brennstoffbestände könnten daher erheblich vermindert und die ursprüngliche Kapitalsanlage um etwa 7% verringert werden. Es ist denkbar, daß die Wirkung dieser Kapitalersparnis auf die Energieerzeugungskosten in weitem Maße durch Erhöhungen der Anreicherungs- und Brennstofffertigungskosten zunichte gemacht würde. Konstruktionen für höhere Leistungsdichten im Brennstoff könnten jedoch von Interesse sein, falls das Hauptgewicht auf eine niedrige Kapitalsanlage gelegt würde - eine Möglichkeit, die für künftige A.G.R. Werke in Frage käme.

Der größte Einzelfaktor zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit zukünftiger A.G. Reaktoren scheint in der Steigerung der Reaktorgröße zu bestehen. Daß es praktisch sei, A.G.R. Werke mit etwa der doppelten Leistung wie der von Dungeness 'B' zu bauen, wurde in einer detaillierten von der U.K.A.E.A. 1964 durchgeführten Konstruktionsstudie bestätigt. Bei einem $2 \times 1200 \text{ MW}$ Werk mit 4 Turbogeneratoren wäre, verglichen mit einem $2 \times 600 \text{ MW}$ Werk, auf eine Ersparnis von etwa 10% in den Kosten der Energieerzeugung hinzuzielen. Wenn wir weiter in die Zukunft blicken, sehen wir andere mögliche Entwicklungen gasgekühlter Reaktoren, einschließlich der Anwendung dispergierter Brennstoffe, d.h. kleiner Uran-Karbid Kügelchen, die in hochgradig hitzebeständigem Siliziumkarbid eingebettet sind, anstatt in Hülsen aus rostfreiem Stahl eingekapselt zu sein.

TABELLE I

Das erste Kernenergieprogramm

Kraftwerk	Jahr der Inbetriebnahme	Soll-Leistung (MW)
Berkeley	1962	275
Bradwell	1962	300
Hunterston (*)	1964	300
Hinkley Point	1965	500
Trawsfynydd	1965	500
Dungeness 'A'	1965	550
Sizewell	1965	580
Oldbury	1966	600
Wylfa	1968	1180

Anmerkung: (*) Hunterston ist ein Kraftwerk der South of Scotland Electricity Board, alle anderen Kraftwerke sind Besitz der Central Electricity Generating Board.

TABELLE II

Hauptdaten des Werkes

Elektrische Netto-Leistung	1200 MW
Brutto-Leistung	1320 MW
Anzahl der Reaktoren	2
Anzahl der Turbogeneratoren	2
Gesamtwirkungsgrad des Werkes	41,5%
Art des Brennstoffes	36 Hülsen von 14,48 mm (0,57") Durchmesser in Bündeln
Anzahl der Brennstoffelemente in einer Kette	8
Spezifische Leistungsdichte des Reaktors	9,5 MW/TeU
Anfängliche Anreicherung	1,47/1,76%
Zusätzliche Anreicherung	1,99/2,42%
Brennstofferneuerung	Laufend unter Last bei axialer Verschiebung der Brennstoffelemente
Gitterteilung	39,37 cm (15,5")
Gitteranordnung	quadratisch
Aktivkernhöhe	8,23 m (27 Fuß)
Aktivkerndurchmesser	9,45 m (31 Fuß)
Gesamtzahl der Kanäle	465
Anzahl der Brennstoffkanäle bei Gleichgewicht	412
Kanalgaseintrittstemperatur	320°C
Kanalgasaustrittstemperatur	675°C
Höchsttemperatur der Hülsen	800°C
Gebälse-Austrittsdruck	31,6 kg/cm ² (450 p.s.i.a.)
Anzahl der Gebläse je Reaktor	4
Art des Gebläses	Zentrifugal
Gebälse-Drehzahl	1500 U/min
Drehzahlregelung	Flüssigkeitsantriebskupplung
Gebälseantrieb	Synchronmotor
Installierte Leistung je Gebläse	16700 PS/ (16500 HP)
Kesseltyp	Zwangsdurchlauf
Frischdampfdruck am Turbinenabsperrventil	162,7 kg/cm ² (2315 p.s.i.a.)
Frischdampfdruck am Turbinenabsperrventil	565°C
Frischdampfdurchsatz am Turbinenabsperrventil	1678 t/h (3,7 M lbs/h)
Zwischenüberhitzungsdruck	39 kg/cm ² (556 p.s.i.a.)
Zwischenüberhitzungstemperatur	565°C
Kondensatorvakuum	734mm (28,9in) Hg
Kühlwassereintrittstemperatur	14°C
Elektrische Leistungsdichte kW/m ³ Druckbehältervolumen	106 (3,0 kW/ft ³)
Elektrische Leistungsdichte kW/m ³ Gebäudevolumen	2,47 (0,07 kW/ft ³)

BESCHREIBUNG DER ABBILDUNGEN

1	Kern und Reflektor
2	Oberes Schild
3	Seitliches Schild
4	Halterahmen
5	Druckzylinder
6	Wärmeisolierung
7	Lade- und Regelstandrohre
8	Beton-Druckbehälter
9	Kessel
10	Dampfaustritt
11	Speisewassereinlaß
12	Plenum Raum
13	Gasgebläse
14	Triebwerk für Gasgebläse
15	Beschickungsbühne
16	Lademaschine
17	Beschickungsbühnenkran
18	Block für bis zur Entladung bestrahlten Brennstoff
19	Lager für neuen Brennstoff
20	Gasspeicher
21	Reservoir
22	Kühlbecken
23	Schaltwarte
24	Sicherheits-/Instrumentenräume
25	Haupt-Umkleideraum
26	Entgaser
27	Abgaskamin
28	Generatoren
29	Maschinentransformator
30	Lager für Diesel-Kraftstoff
31	Reserve-Speisewasserbehälter
32	Feuerwehr-Wasserbehälter
33	Siphonkammer
34	Kühlwasserpumpenhaus
Abb.1	Plan des Kraftwerkes *
Abb.2	Querschnitt des Kraftwerkes*
Abb.3	Magnox und AGR Brennstoffelemente
Abb.4	Querschnitt des Reaktors
Abb.5	Modell des Kraftwerkes*
Abb.6	Geländeplan