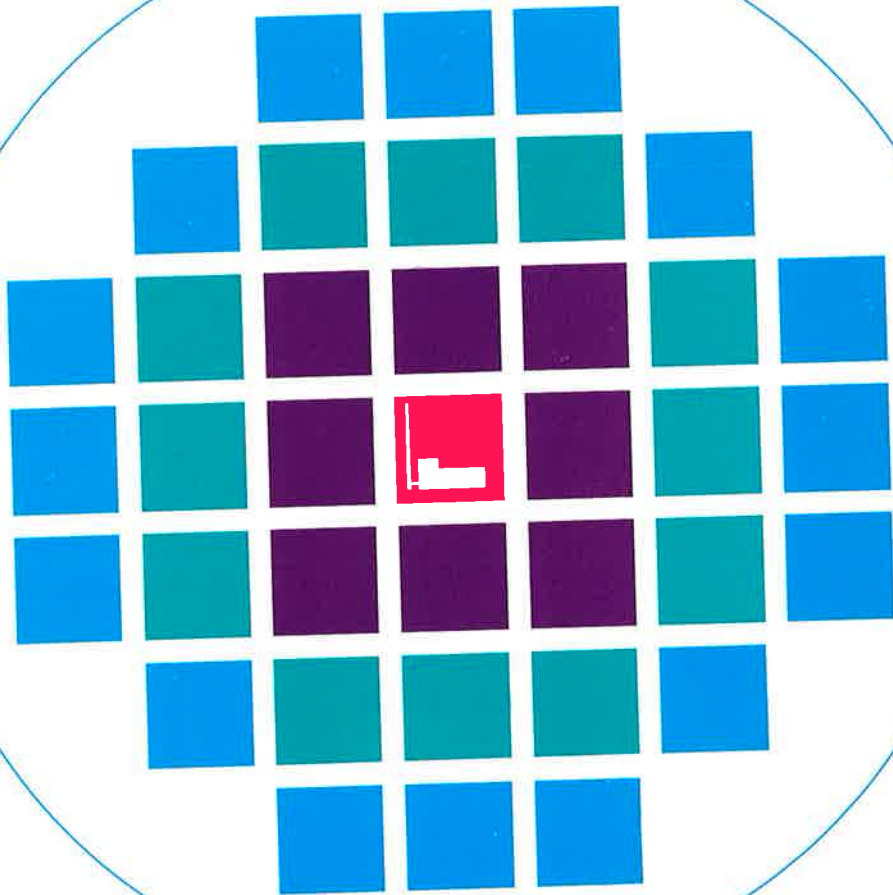
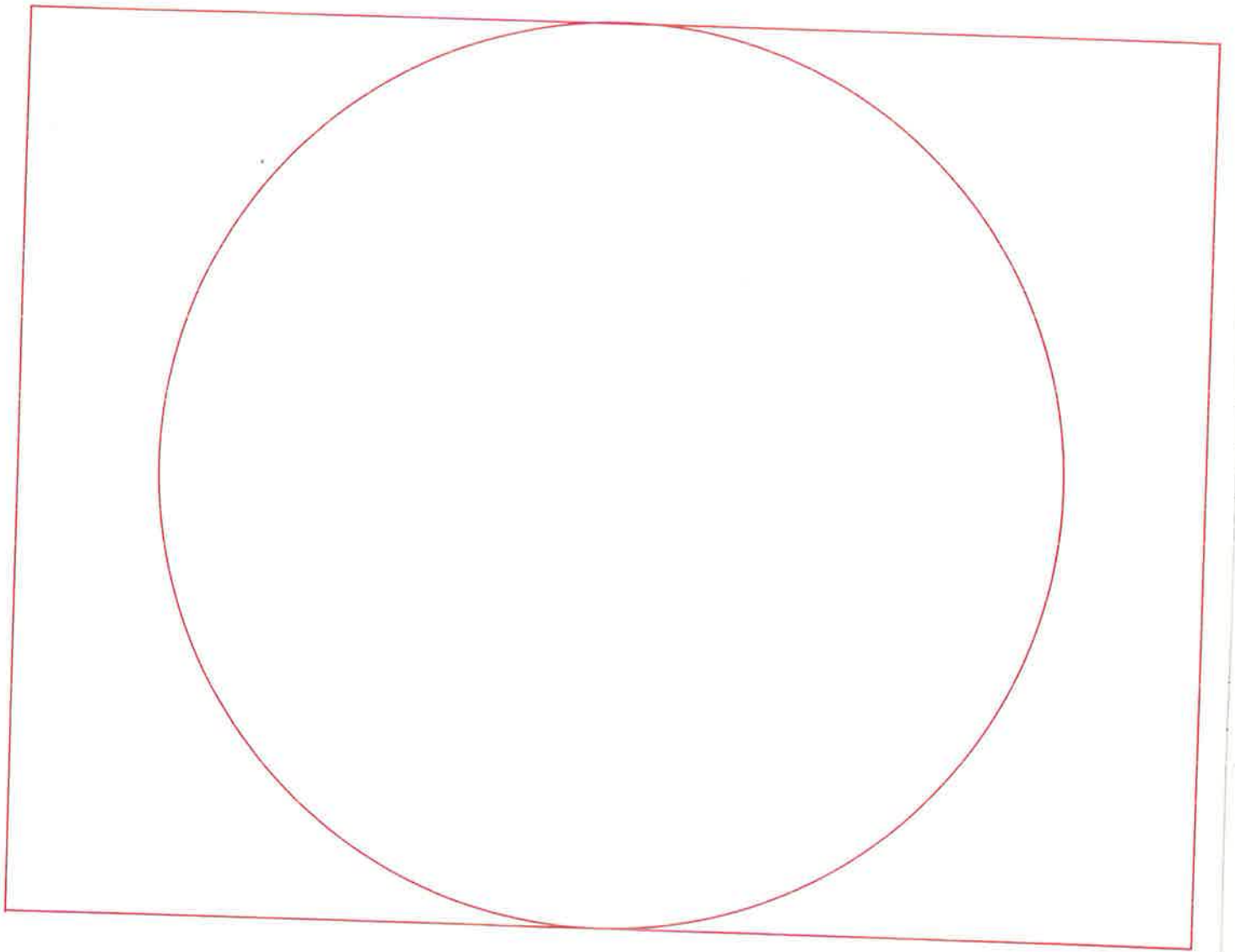
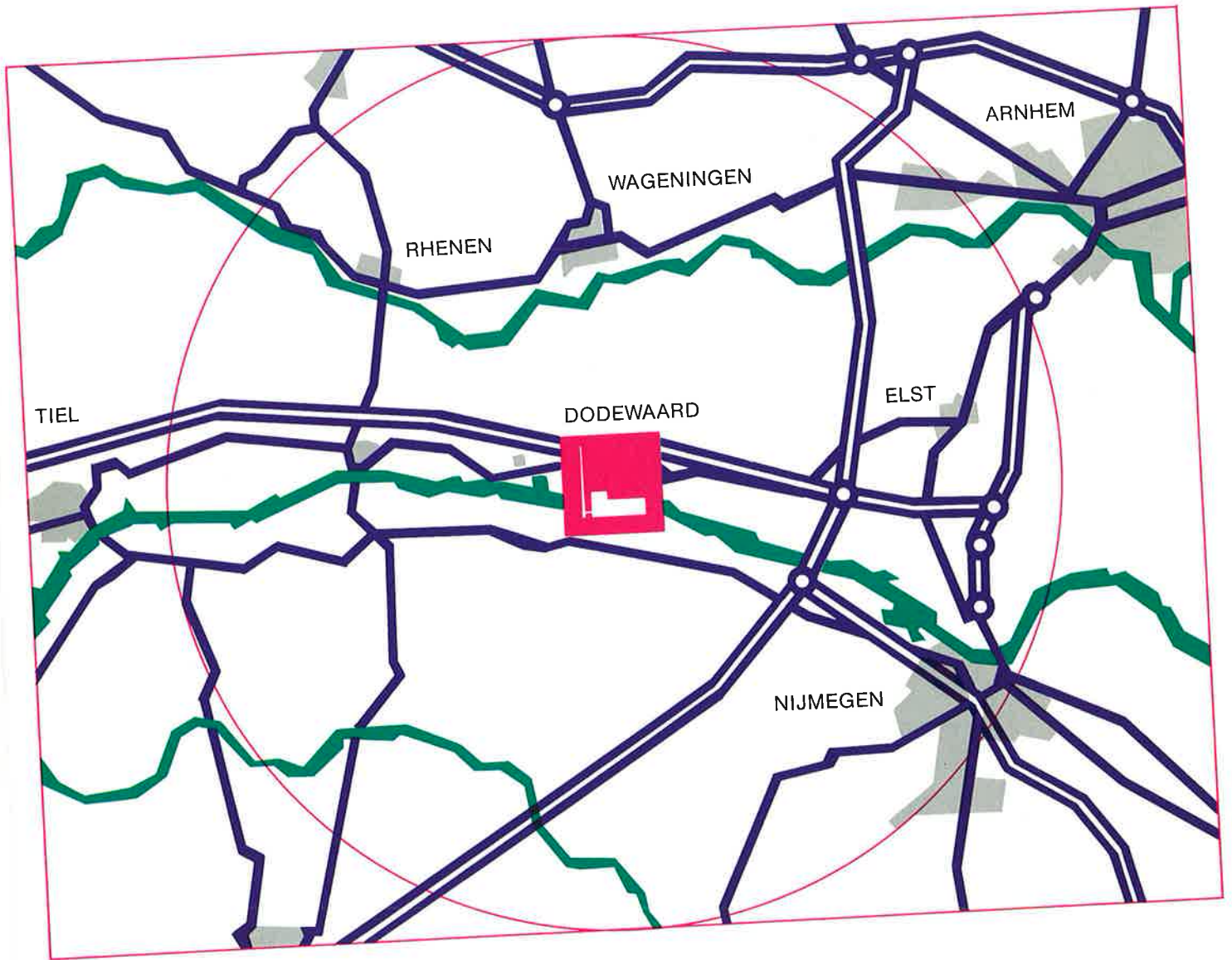


# De kerncentrale Dodewaard

475-5









2



Gezien het geringe aandeel dat kernenergie in de Nederlandse electriciteitsvoorziening tot nu toe inneemt, neemt de kernenergiecentrale te Dodewaard een bijzondere plaats in met betrekking tot de mogelijkheid ervaring op te doen en in stand te houden waar het het gebruik van kernenergie betreft. De aanwezigheid van deze nucleaire installatie heeft ook voor de Nederlandse overheid een belangrijke functie ten aanzien van de ontwikkeling van wetgeving en de opbouw van een effectieve controlerende instantie.

De kernenergiecentrale levert slechts een vermogen van 60 MW, en speelt daardoor een bescheiden rol in de Nederlandse electriciteitsvoorziening.

Primair is echter het uitgangspunt: de gezamenlijke electriciteitsbedrijven inzicht te geven in specifieke problemen die samenhangen met het gebruik van kernenergie voor de electriciteitsproductie.

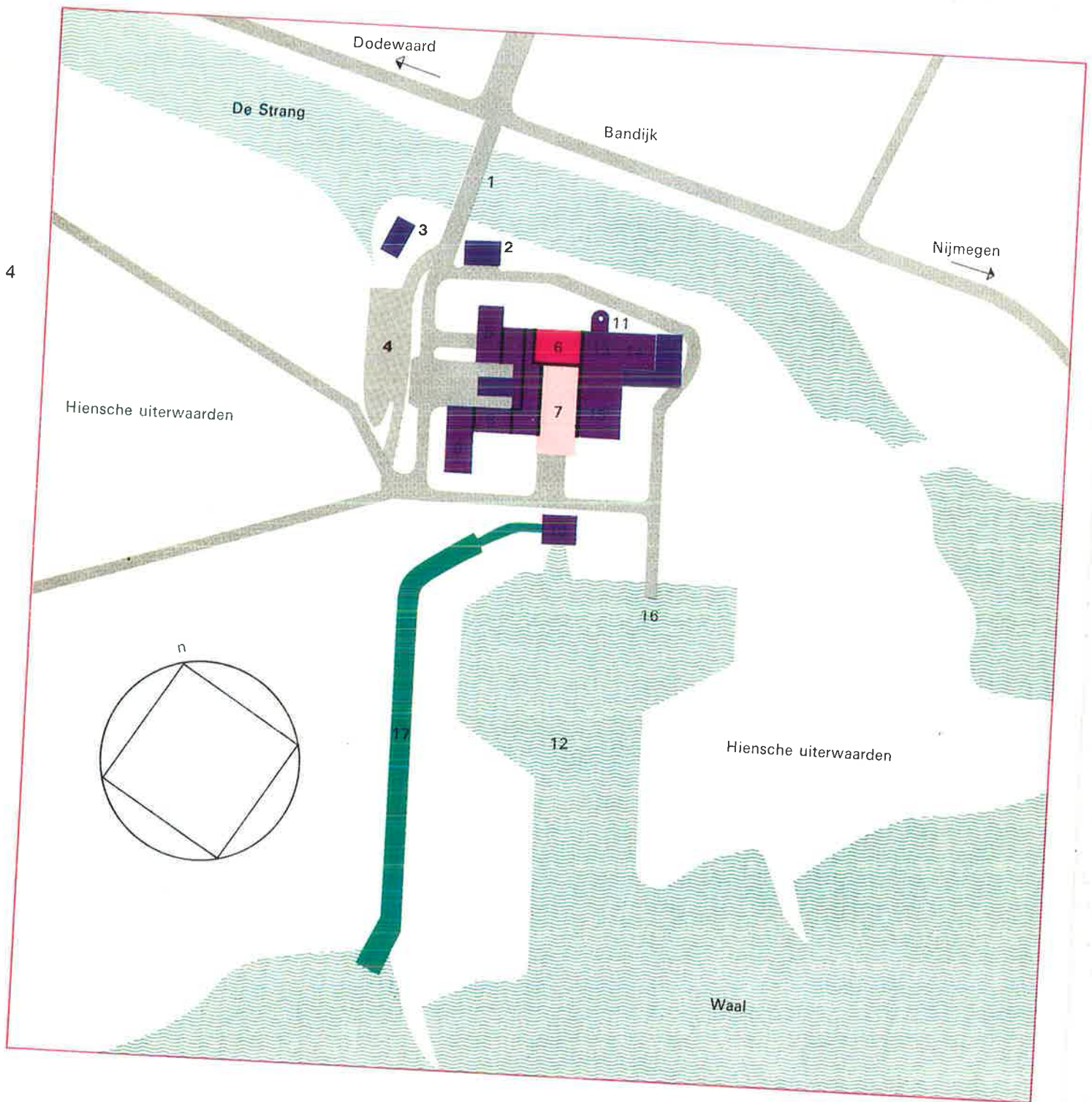
Voor dit doel is de installatie al tijdens de bouw voorzien van allerlei aanvullende instrumenten, die diepgaand onderzoek naar de vele aspecten van het nucleaire bedrijf mogelijk maken.

Het zijn juist deze aspecten, die in commerciële kernenergiecentrales minder aandacht kunnen krijgen, waaraan de Dodewaard centrale zijn unieke positie ontleent.

Dit boekje beoogt een overzicht te geven van de overwegingen die bij de bouw een rol hebben gespeeld, alsmede enig inzicht te verschaffen in de werking van de centrale en de bedrijfservaringen tot nu toe.

Bovendien wordt een indruk gegeven van het uiteenlopende onderzoekswerk, dat veelal wordt verricht door specialisten van de KEMA, in samenwerking met de GKN, met het doel de kennis betreffende de kernenergie in Nederland op peil te houden en door eigen onderzoek te verdiepen.





4

**Algemene terreinindeling**

- 1 brug
- 2 portiersloge
- 3 fietsenstalling
- 4 parkeerplaats
- 5 werkplaatsen
- 6 reactorgebouw
- 7 turbinegebouw
- 8 kantine
- 9 kantoor
- 10 koelwatergebouw
- 11 ventilatieschacht
- 12 haven
- 13 ventilatie-installatie
- 14 opslag en verwerking radioactief afval
- 15 waterbehandelingssystemen
- 16 steiger
- 17 koelwateruitlaat

Om de bouw van de centrale tegen de juiste achtergrond te zien, dient allereerst iets vermeld te worden over de instellingen van de Nederlandse electriciteitsbedrijven, die bij de voorbereiding betrokken waren.

Voor het waarborgen van een bedrijfszekere en zo economisch mogelijke electriciteitsvoorziening is in de loop der jaren tussen de electriciteitsbedrijven een hechte samenwerking tot stand gekomen.

Uit deze samenwerking is een aantal instellingen ontsproten, die in het raam van de gezamenlijke activiteiten een bepaalde taak vervullen. Zo is in 1927 opgericht de N.V. tot Keuring van Electrotechnische Materialen (KEMA).

Bij de KEMA worden keuringen voor de electriciteitsbedrijven verricht, alsmede onderzoek op het gebied van de energievoorziening gedaan. Ook worden adviezen met betrekking tot electrotechnische projecten gegeven aan electriciteitsbedrijven en anderen.

In het kader van het onderzoek ging de KEMA zich reeds in 1946 als eerste in Nederland actief bezig houden met studies betreffende kernenergie.

In 1949 werd opgericht de N.V. Samenwerkende Electriciteits-Productiebedrijven (SEP), met als taak de coördinatie van de Nederlandse electriciteitsproductie.

Toen de ontwikkeling van kernenergie in de vijftiger jaren in een zodanig stadium was gekomen, dat men in verschillende landen de bouw van kernenergiecentrales overwoog, is in SEP-verband onderzocht of kernenergie ook in Nederland een rol zou kunnen spelen in de electriciteitsvoorziening. Het resultaat van deze studie was dat de bouw van een kernenergiecentrale van 150 MW technisch mogelijk zou zijn, doch onaanvaardbaar vanwege de hoge financiële lasten voor de electriciteitsbedrijven.

Vanuit de politiek en de industrie bleef men aandringen op de bouw van een kernenergiecentrale in Nederland.

Een aanvaardbare oplossing om de eerste kernenergiecentrale in Nederland te verwezenlijken werd gevonden in de bouw

6 van een centrale van 50 MW, die veel minder kapitaalsinvesteringen vergde, maar die qua vermogen toch voldoende groot was om de nodige ervaring te verwerven.

Op 2 februari 1965 werd de N.V. Gemeenschappelijke Kernenergiecentrale Nederland (GKN) opgericht, met als doel de bouw en het bedrijven van de eerste Nederlandse kerncentrale.

Met de Amerikaanse firma General Electric werd een contract gesloten waarbij werd bedongen dat de onderdelen zoveel mogelijk in Nederland vervaardigd zouden worden.

Bovendien werd overeengekomen dat een werkgroep van deskundigen van de electriciteitsbedrijven in Amerika zou kunnen deelnemen aan de vervaardiging van het nucleaire ontwerp.

DE GKN had de algehele leiding bij de bouw, terwijl General Electric als adviseur optrad.

De bouw is mede mogelijk gemaakt dankzij financiële bijdragen van de Nederlandse overheid, ter stimulering van de industriële ontwikkeling op het gebied van de kerntechniek. Ook Euratom heeft een financiële bijdrage geleverd voor de financiering van het specifiek nucleaire werk.

Bij de bouw heeft de Nederlandse industrie, overeenkomstig de opzet, en belangrijk aandeel in het project gehad.

Ruim 95 % van de werkzaamheden is door de Nederlandse industrie uitgevoerd.

Hierdoor heeft de industrie zich vertrouwd kunnen maken met de specifieke fabricagemethoden en met de stringente eisen die gesteld worden bij de vervaardiging van nucleaire componenten.

Als plaats van vestiging voor de eerste kernenergiecentrale is gekozen voor Dodewaard omdat enerzijds de ligging aan de rivier de Waal een waarborg is voor voldoende koelwater, anderzijds omdat in Dodewaard een onderstation is gevestigd van het landelijk koppelnet, zodat de opgewekte electriciteit

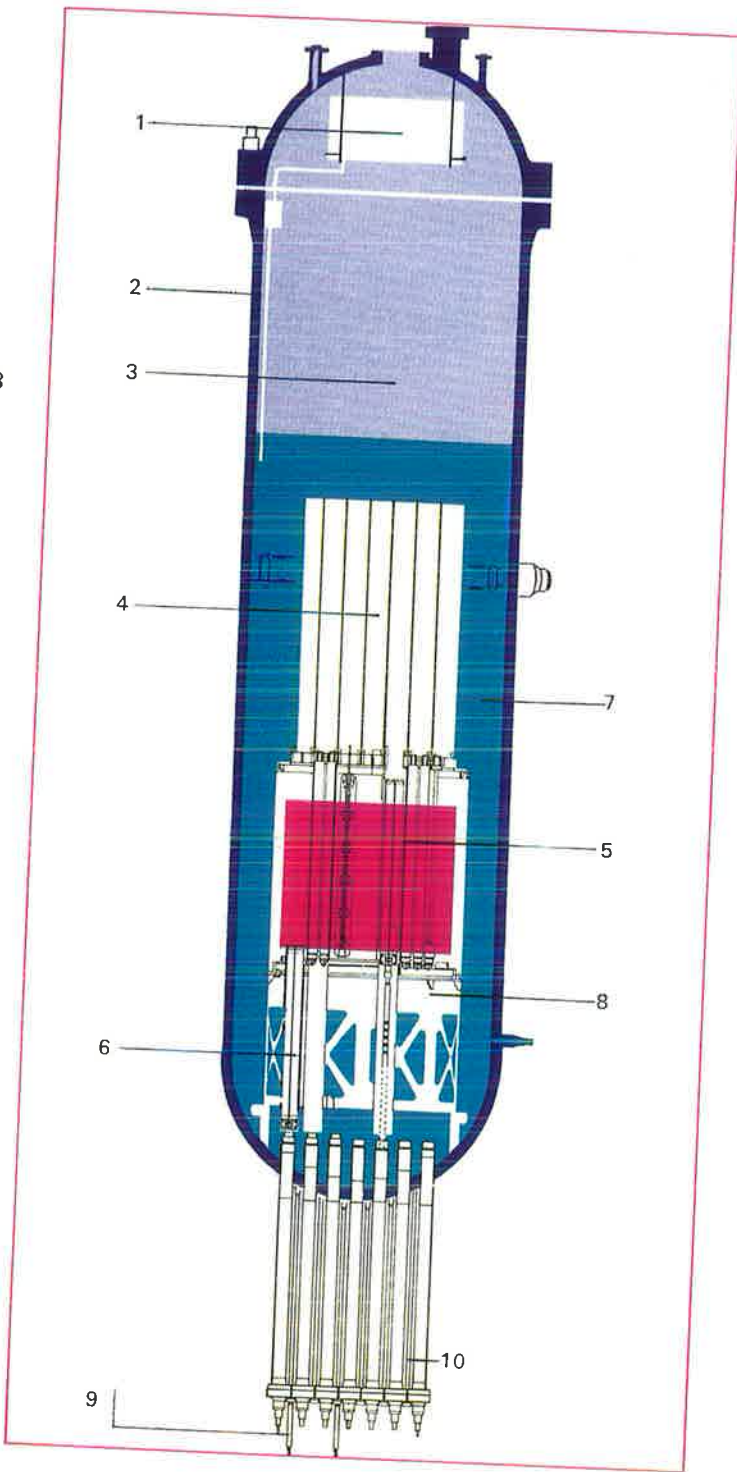
gemakkelijk in het koppelnet kan worden ingevoerd. Bovendien ligt Dodewaard dicht bij Arnhem. Dat is een voordeel omdat het onderzoek veelal wordt uitgevoerd door deskundigen van de KEMA die in Arnhem is gevestigd. Ook dienen verschillende afdelingen van de KEMA als stafgroep voor technische ondersteuning van de centrale in Dodewaard. Voorts wordt een gedeelte van de administratie en ook het personeelsbeleid vanuit Arnhem verzorgd. Deze samenwerking maakt het mogelijk het aantal medewerkers van de centrale beperkt te houden.

*Onderzoek naar het gedrag van gebruikte splijtstofelementen vindt onder water plaats in het splijtstofopslagbassin.*





8



figuur 1 Langsdoorsnede reactorvat

- 1 stoomdroger
- 2 reactorvat
- 3 stoomafscheidingsruimte
- 4 schoorsteen
- 5 splijtstofelement
- 6 regelstaaf
- 7 valkanaal
- 8 mantel
- 9 buizen voor kerninstrumentatie
- 10 regelstaafaandrijving

Energie kan niet worden gemaakt, doch is potentieel aanwezig in bepaalde energiebronnen.

Bij het gebruik van kernenergie wordt de energie vrijgemaakt die potentieel binnen de kern van een atoom aanwezig is.

Dit gebeurt door de atoomkernen van het atoom uranium-235 te beschieten met neutronen.

De atoomkern van uranium neemt een neutron op, en wordt daardoor zo instabiel, dat de atoomkern in twee stukken uit elkaar valt.

Bij dit proces komt veel energie vrij, die wordt gebruikt om water aan de kook te brengen.

De gevormde stoom wordt naar een turbine-installatie geleid om een roterende beweging te verkrijgen, waardoor een generator wordt aangedreven die de electriciteit produceert.

De basis voor de mogelijkheid kernsplijting toe te passen voor energie-opwekking ligt in het feit dat bij het uiteenvallen van de uraniumkern ook 2 à 3 neutronen met grote snelheid vrijkomen.

Indien één van deze neutronen een volgende splijting veroorzaakt, kan het proces zichzelf aan de gang houden: een kettingreactie is het resultaat.

Nu is het niet zo simpel om de kettingreactie in gang te zetten en te houden.

Dat komt omdat veel neutronen verloren gaan zonder dat een nieuwe splijting tot stand wordt gebracht.

Hiervoor zijn verschillende oorzaken:

- slechts 0,7% van het uranium dat in de natuur voorkomt is te splijten ( $^{235}\text{U}$ ): 99,3% is niet splijtbaar ( $^{238}\text{U}$ )
- er gaan veel neutronen verloren doordat ze worden geabsorbeerd in atoomkernen van het niet-splijtbaar uranium of in atoomkernen van constructiematerialen
- er verdwijnen nogal wat neutronen uit de kernreactor doordat ze niet met andere atoomkernen botsen
- onder de stoffen die bij de splijting worden geproduceerd (de splijtingsproducten), is er een aantal dat relatief veel neutronen absorbeert.

Een niet onbelangrijk gegeven is ook dat de neutronen die vrijkomen bij een kernsplijting een hoge snelheid meekrijgen en juist daardoor minder geschikt zijn om een nieuwe splijting tot stand te brengen.

Dit alles stelt nogal wat eisen aan de constructie van de kernreactor en de splijtstof.

In de eerste plaats is het van belang de snelle neutronen af te remmen om de kans op nieuwe splijtingen te verhogen. Dit afremmen gebeurt door de neutronen te laten botsen met lichte atoomkernen, waardoor de snelheid door de botsingen wordt gereduceerd.

Voor het afremmen van de neutronen, ook wel modereren genoemd, komen een aantal materialen in aanmerking. De meest gebruikte materialen zijn gewoon water (licht water), zwaar water en grafiet.

In Dodewaard wordt voor dit doel gewoon water gebruikt.

Om het verlies aan neutronen tegen te gaan, en tenminste één van de vrijkomende neutronen over te houden voor een nieuwe splijting staat een aantal wegen open:

- een optimaal ontwerp van de splijstofelementen en de kern om de neutronenlek zo klein mogelijk te maken
- het kiezen van constructiematerialen die weinig neutronen wegvangen
- zorgen dat neutronen die de reactor dreigen te verlaten weer worden teruggekaatst (toepassen van een reflector rond de kern)
- het verhogen van het percentage aan splijtbaar uranium-atomen door middel van het verrijkingproces.

De reactor van Dodewaard gebruikt gewoon water, enerzijds om de neutronen langzaam te maken en anderzijds om de bij het kernsplijtingsproces gevormde warmte af te voeren. Doordat het gebruikte gewone water naar verhouding ook veel neutronen absorbeert, moet er worden gewerkt met verrijkte splijtstof, die ongeveer 3% van de splijtbaar vorm bevat ( $^{235}\text{U}$ ).

- 10 Ook de constructiematerialen zijn zoveel mogelijk geselecteerd op een lage neutronenabsorptie. Door al deze voorzorgen is het mogelijk om een stabiele kettingreactie aan de gang te houden.

Een voordeel van het gebruik van gewoon water om de neutronen af te remmen, is gelegen in het feit dat bij het verminderen van de dichtheid van het water door bijvoorbeeld koken, het splijtingsproces direct wordt tegengewerkt omdat minder neutronen worden afgeremd.

Dit gegeven noemt men wel passieve veiligheid: bij storingen wordt het proces altijd door natuurkundige processen in een veiliger toestand gebracht.

Ook bij de constructie van de reactor in Dodewaard is veel aandacht besteed aan het aspect veiligheid.

Aangezien in Dodewaard het water in het reactorvat zelf kookt, spreekt men van een kokendwaterreactor.

De uitvoering van de reactor is in principe vrij eenvoudig. (figuur 1) Het uranium komt in de kern voor in de vorm van het oxide  $UO_2$ . Dit kan omdat zuurstof zeer weinig neutronen absorbeert. Het  $UO_2$  bevindt zich, in tabletvorm, in Zircaloy pijpen. Deze pijpen, de splijtstofstaven, staan in water.

Dit water heeft hier dus een tweeledige bestemming. In de eerste plaats doet het dienst als moderator en zorgt dus voor de verlangzaming van de neutronen. In de tweede plaats vervult het de taak van koelmiddel, waarmee de in de splijtstof ontwikkelde warmte wordt afgevoerd.

Door het kookverschijnsel binnen de kern wordt een gedeelte van de moderator vervangen door dampbellen. Aangezien de reactor ondergemodereerd is, zal de reactiviteit ten gevolge van het koken, afnemen. Er is hier sprake van een passieve terugkoppeling, die bepalend is voor het ontwerp van de reactorkern. De koeling van de splijtstofelementen door het water vindt plaats door middel van natuurlijke convectie, die nog vergroot wordt door toepassing van een "schoorsteen" boven de kern. De damp, die binnen de reactorkern ontstaat, wordt grotendeels afgescheiden aan het wateroppervlak.

Daardoor ontstaat er een verschil in gemiddelde vloeistofdichtheid binnen en buiten de kern, met als gevolg natuurlijke circulatie. Deze natuurlijke circulatie wordt nog versterkt doordat binnen de ruimte tussen de kern en de wand van het reactorvat, de zogenaamde valruimte, het koudere voedingswater wordt geïnjecteerd. In tabel 1 zijn de belangrijkste gegevens van de reactor vermeld.

Tabel 1

#### Algemeen

Netto-electrisch vermogen	56,1 MW
Totaal electrisch vermogen	59 MW
Thermisch vermogen	183 MW
Stoomproductie	290 ton/h
Stoomtemperatuur	291 °C
Verzadingsdruk bij deze temperatuur	75,5 bar

#### Reactorkern

Aantal splijtstofelementen	164
Aantal staafjes splijtstof (36 × 164)	5904
Aantal regelstaven	37
Hoogte van de kern	1793 mm
Diameter van de kern	1788 mm

#### Splijtstof

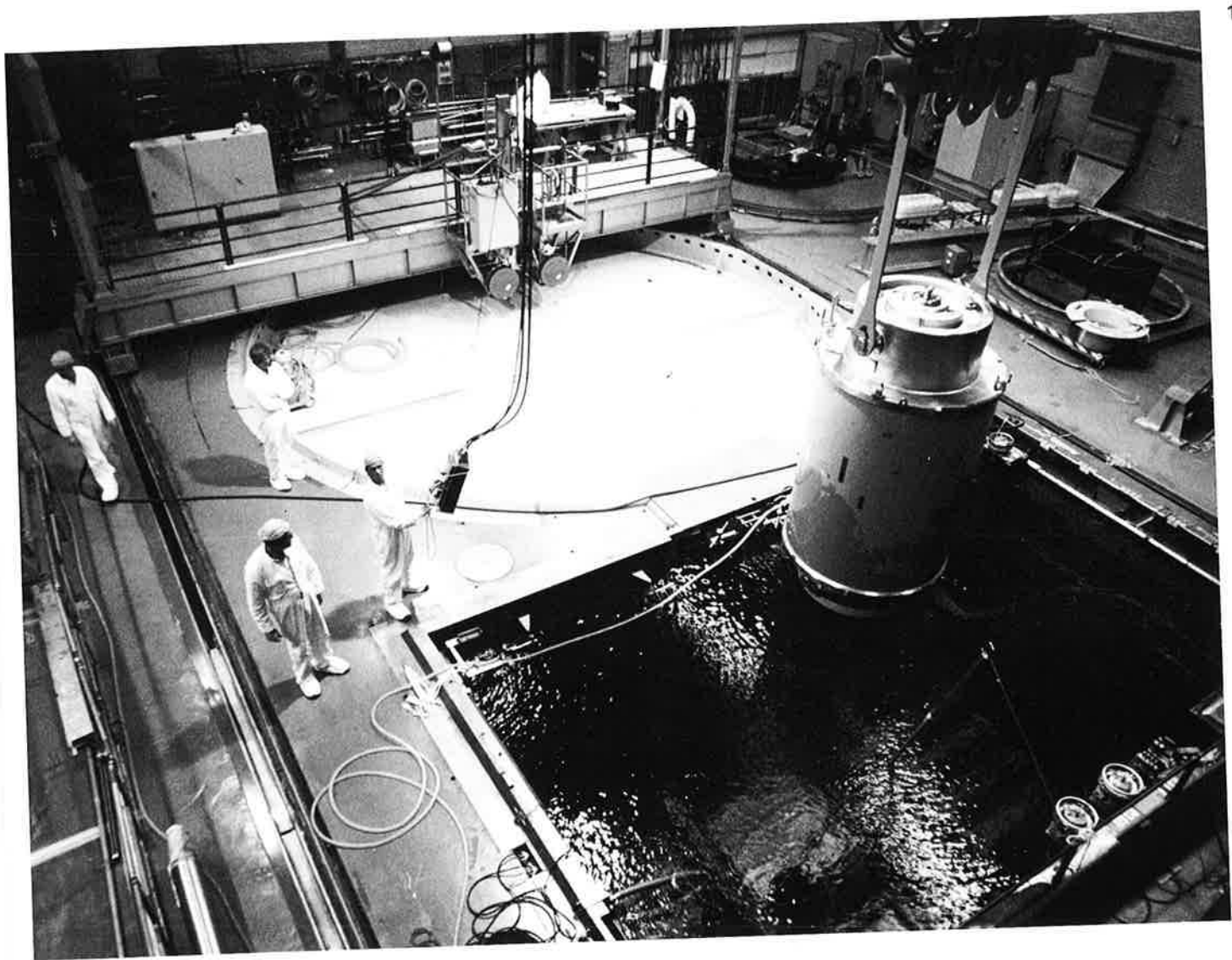
Materiaal	$UO_2$
Verrijking	3 %
Bekledingsmateriaal	Zircaloy

#### Regeling

Aantal regelstaven	37
Materiaal regelbladen	$B_4C$



Een transportcontainer voor gebruikte splijtstof verlaat het splijtstofopslagbassin op weg naar een opwerkingsinstallatie.



### 3 DE KERNCENTRALE DODEWAARD

- 12 Het nucleaire gedeelte van de centrale bestaat uit een aantal onderdelen die kort zullen worden besproken.

#### Het reactorvat

Het reactorvat in Dodewaard is 12 meter hoog en heeft een inwendige diameter van 2,8 meter.

De wanddikte is 8 centimeter en het totale gewicht bedraagt 90 ton (zie tabel 2). In het reactorvat is de reactorkern geplaatst.

In de bovenruimte van het vat bevindt zich stoom, die via de hoofdstoomleiding naar de turbine-installatie wordt geleid.

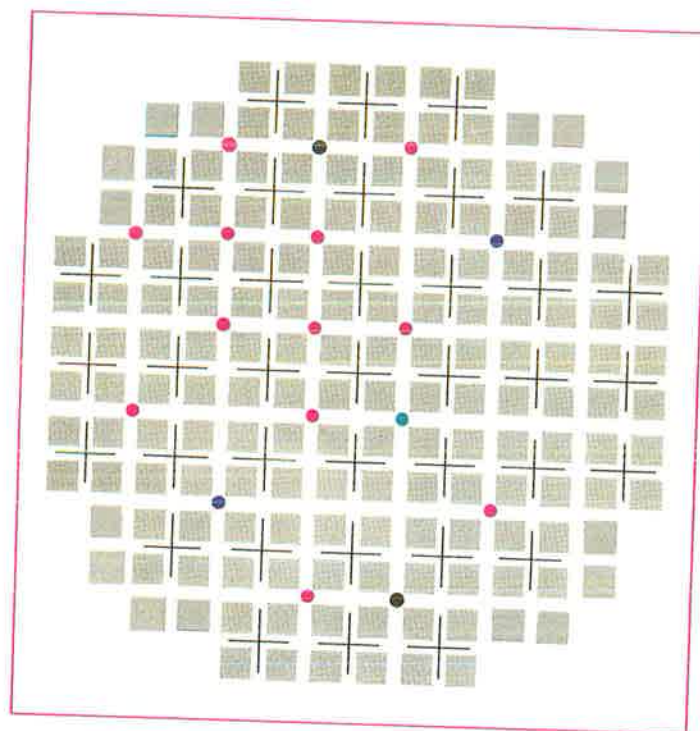
Aan de onderzijde van het vat bevinden zich de hydraulische regelstaafmotoren, waarmee de regelbladen tussen de elementen kunnen worden bewogen, om het vermogen van de reactor te regelen.

Verder zijn er enige aansluitingen aan het reactorvat gemaakt, waardoor onder andere de na passage door de turbine tot water gecondenseerde stoom in het reactorvat wordt teruggevoerd. Dit water valt via het valkanaal naar beneden in het reactorvat om, door natuurlijke circulatie, door de kern weer verwarmd te worden.

Tabel 2

#### Reactorvat

Vatlengte, inwendig	12090 mm
Inwendige diameter	2794 mm
Dikte van de deksel	65 mm
Dikte van de cilindrische vatwand	80 mm
Bodemdikte	65-95 mm
Totaal gewicht, inclusief deksel	ca 90 ton



figuur 2 Schematische dwarsdoorsnede van de reactorkern

- kanalen voor startmonitors
- verlengingsmeter
- kanalen voor kerninstrumentatie
- splijtstofelementen
- + regelstaaf
- startbronnen

## De reactorkern

De reactorkern bestaat uit 164 splijfstofelementen en 37 regelbladen. Figuur 2 geeft een schematisch overzicht van de reactorkern.

Een splijfstofelement is opgebouwd uit 36 splijfstofstaafjes, die tot ca 3% verrijkte uranium bevatten in de vorm van uraniumoxide ( $UO_2$ ), dat gesinterd is tot tabletjes van 10 mm in doorsnede en 12 mm hoog.

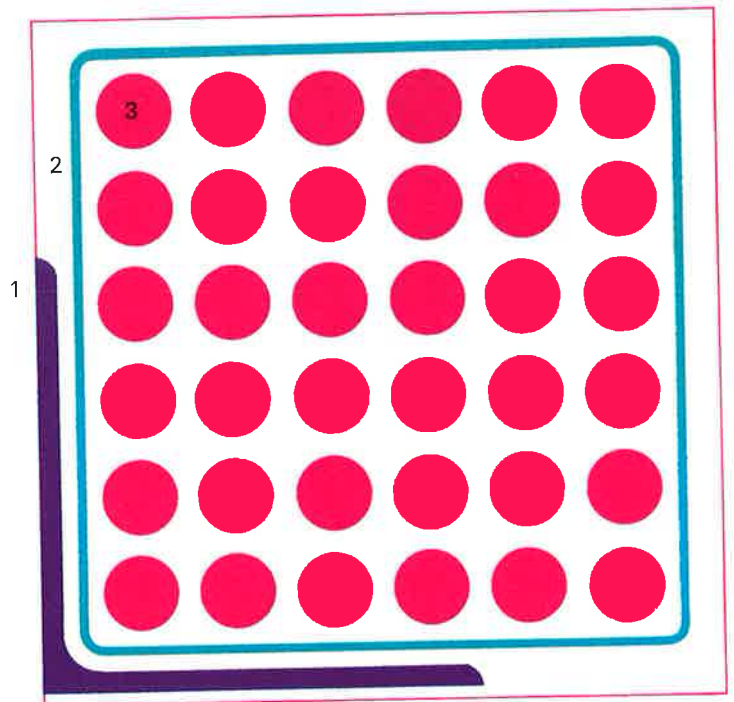
De tabletjes zijn in de staafjes opgestapeld en de staafjes zijn hermetisch gesloten, doordat ze boven en onder zijn dichtgelast. Binnenin de tabletjes vindt het splijtingsproces plaats.

Doordat de snelheid waarmee de gevormde splijtingsproducten vrijkomen binnenin de tabletjes wordt weggenomen, ontstaat er wrijvingswarmte, die de tabletjes en daarmee de staafjes verwarmt.

In tegenstelling tot de naar verhouding zware splijtingsproducten, kunnen de vrijkomende neutronen wel naar buiten treden, waarbij er voor gezorgd moet worden, dat er weinig neutronen in de constructiematerialen worden geabsorbeerd. Om deze reden zijn de splijfstofstaafjes vervaardigd van Zircaloy, een legering van zirconium en aluminium.

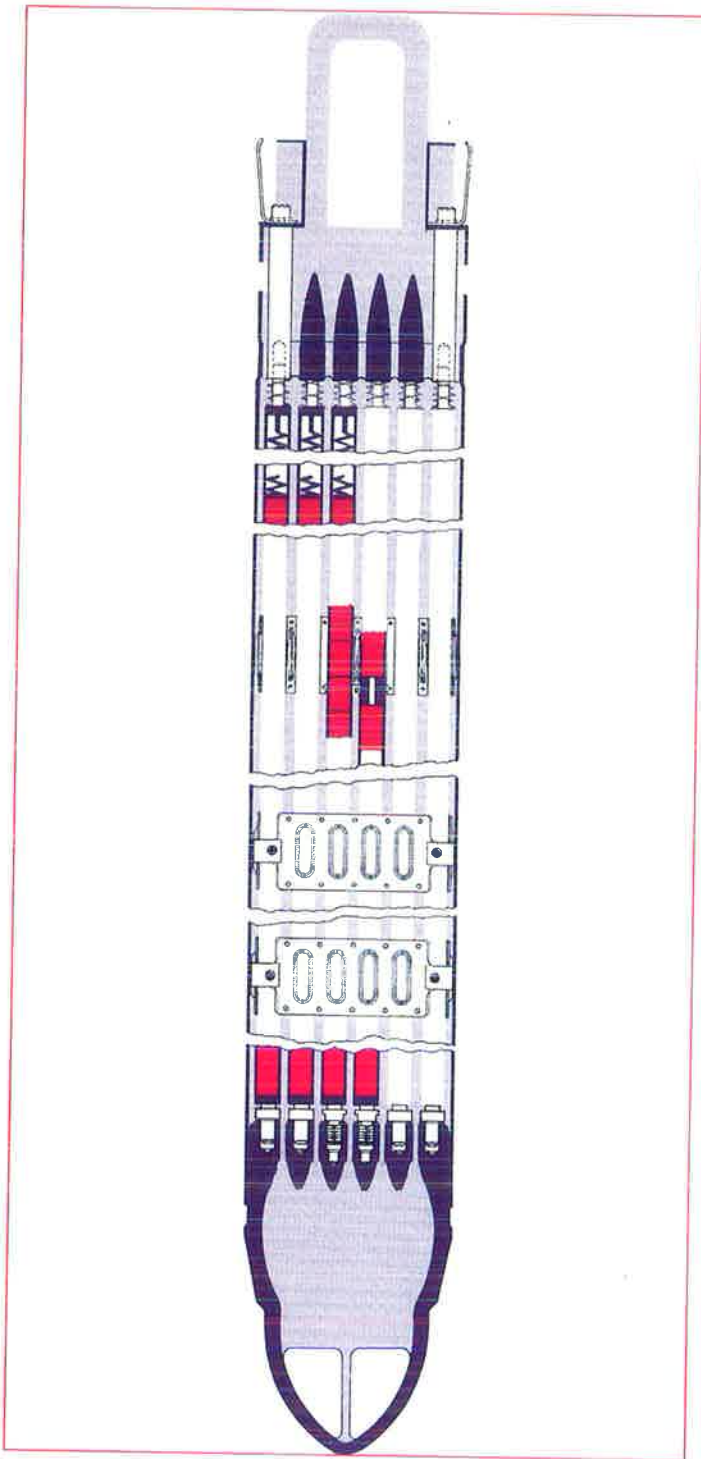
Elk van de 37 kruisvormige regelbladen is omgeven door vier splijfstofelementen. Op deze manier grenst elk van de splijfstofelementen aan een regelblad, uitgezonderd de elementen die zich aan de buitenomtrek van de kern bevinden. Figuur 3 geeft een schematische voorstelling van een splijfstofelement met een regelblad. Aangezien dit patroon zich vele malen binnen de reactor herhaalt, spreekt men vaak van: de eenheidscel.

Figuur 4 geeft een beeld van een splijfstofelement. In deze figuur zijn de splijfstofstaafjes zichtbaar, omdat de koker, die zich om het splijfstofelement bevindt, niet is weergegeven. Verder ziet men onderaan de instroomopening, waardoor het water het splijfstofelement binnenkomt. Dit water stroomt langs de buisjes en verlaat het element weer door gaatjes in de bovenplaat, bij de haak. De regelbladen hebben nagenoeg dezelfde lengte als de splijfstofelementen. Zij zijn opgebouwd



figuur 3 Schematische doorsnede van de eenheidscel met splijfstofbundel

- 1 regelblad
- 2 splijstfokoker
- 3 splijfstofstaafjes



uit roestvrijstalen staafjes, gevuld met borium carbide, in een kruisvorm tezamen gehouden door een roestvrijstalen mantel.

Borium absorbeert gemakkelijk neutronen. Elke regelstaaf kan afzonderlijk bewogen worden door een hydraulisch systeem. Daartoe is voor elke staaf een doorvoering aangebracht in de bodem van het reactorvat.

#### De reactoromhulling

Het gehele reactorvat is opgenomen in een tweede stalen gasdichte veiligheidsomhulling, die ook wel wordt aangeduid als insluitsysteem of containment. (figuur 5)

Deze veiligheidsomhulling is zelf weer verbonden met twee enorme vaten, die voor de helft met water zijn gevuld.

De functie van dit insluitsysteem is de verspreiding van radioactieve stoffen in onvoorziene omstandigheden te voorkomen.

Eventuele stoom die, bijvoorbeeld bij een breuk van de hoofdstoomleiding, zou vrijkomen, wordt in de drukvereffeningsvaten gecondenseerd, zodat in het insluitsysteem de druk beperkt blijft.

Het gehele systeem is op haar beurt weer geplaatst in een ringvormige betonnen ruimte met een wanddikte van 1,8 meter beton.

Het beton zorgt ervoor dat de straling die afkomstig is uit de reactor kern wordt afgeschermd.

Aan de bovenkant van het systeem is, naast de reactor, een 10 meter diep waterbassin gebouwd, waarin de splijfstofelementen, die na circa vier jaar gebruik uit de reactor kern komen, tijdelijk kunnen worden opgeslagen.

figuur 4 Langsdoorsnede splijstofelement

■ splijstof

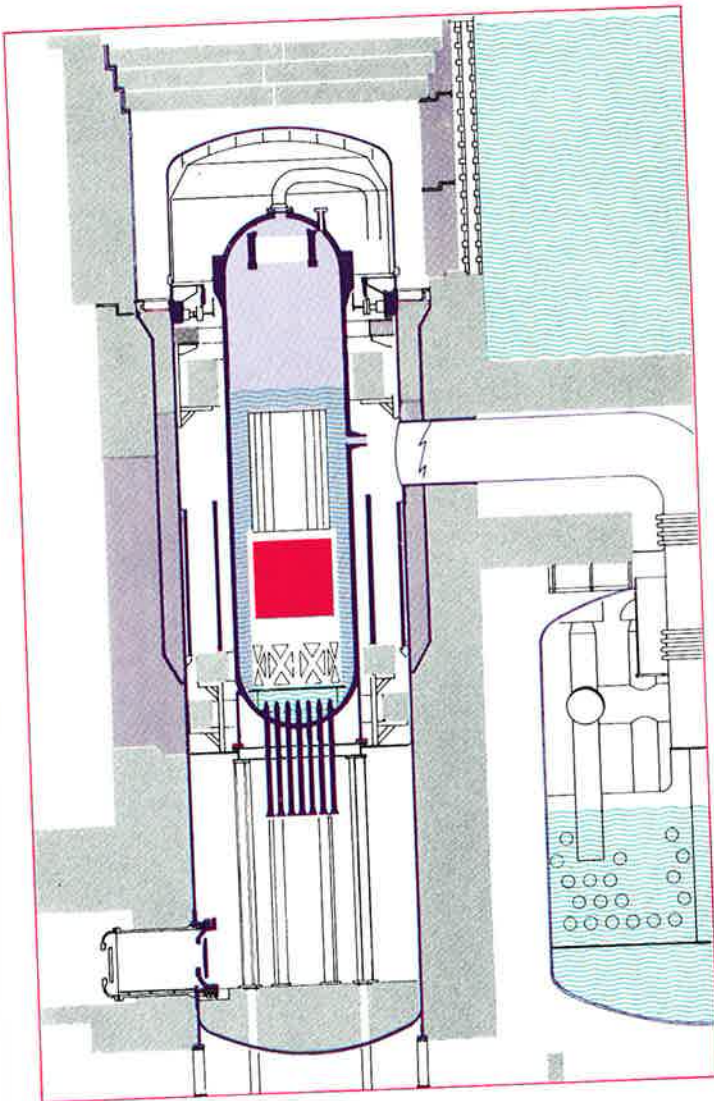


### Regeling van het vermogen

Tussen iedere vier splijtstofelementen is een regelblad aanwezig, waarmee het vermogen kan worden geregeld. Door de regelbladen een stukje uit te trekken wordt de reactie op gang gebracht, zodat van de twee à drie vrijkomende neutronen per splijting er juist één overblijft die een nieuwe splijting veroorzaakt. In deze situatie wordt de reactor "kritisch" genoemd.

Worden de regelbladen in deze situatie niet meer bewogen, dan stopt de reactie na enige tijd, omdat er uranium verbruikt is, en daardoor de kans op een nieuwe splijting nauwelijks nog aanwezig is.

Om de reactie op gang te houden, worden de regelbladen uit de kern geschoven waardoor er minder absorberend materiaal in de kern aanwezig is en er dus minder neutronen geabsorbeerd worden. De kans op splijting neemt daardoor toe. Op deze wijze wordt het vermogen geregeld en op een constant niveau gehouden.

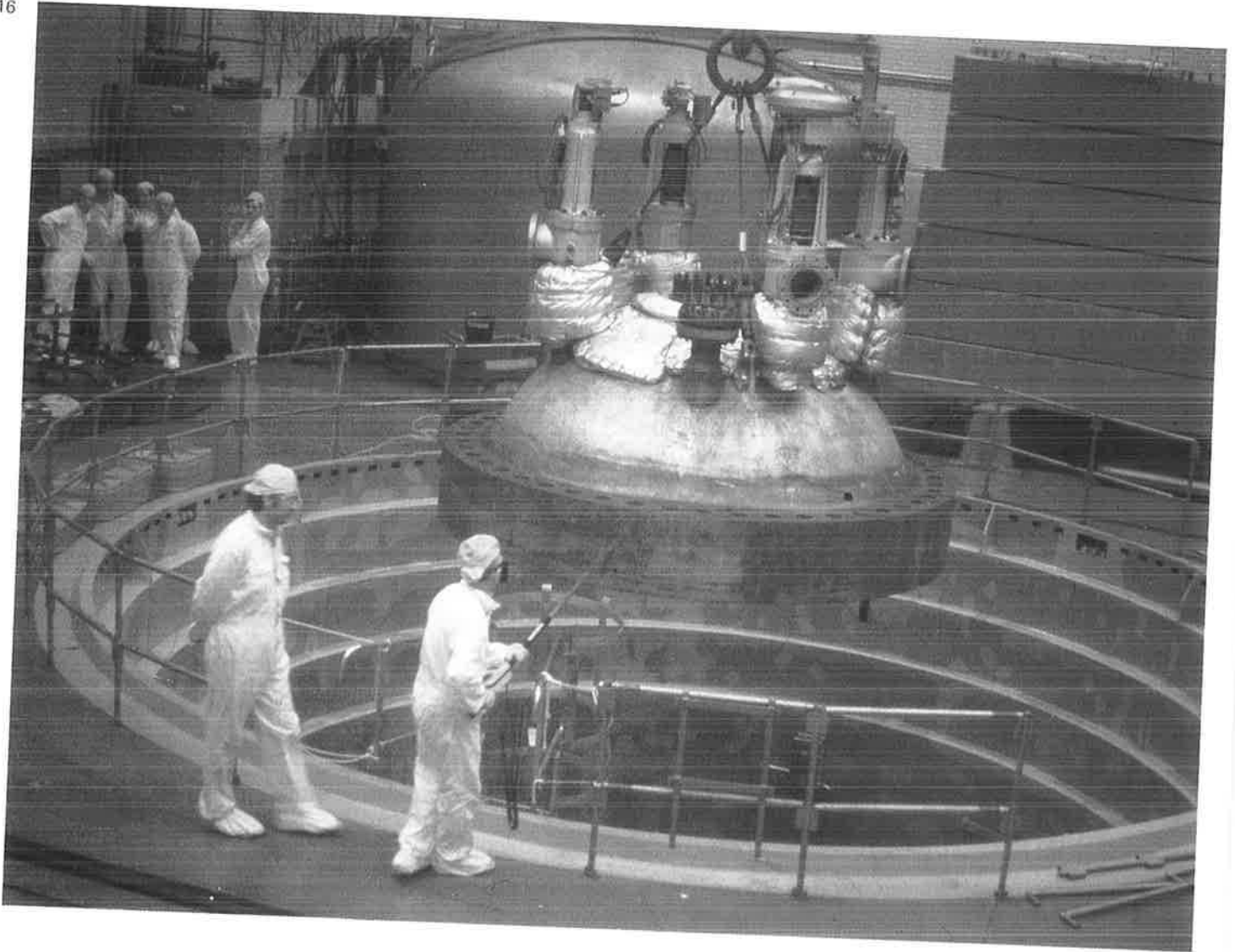


figuur 5 Het drukvereffeningssysteem

- zwaar beton
- gewoon beton
- insluitingssysteem en reactorvat
- reactorkern

*Voor de splijfstofwisseling moet de reactordeksel worden verwijderd.*

16



### Het splijtstofwisselen

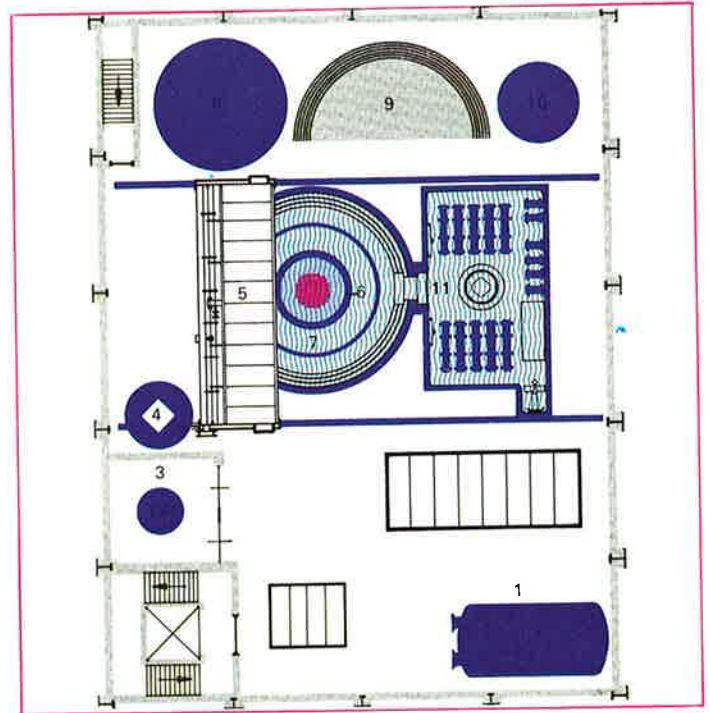
De energie, die de reactor levert, is afkomstig van de versplijting van  $^{235}\text{U}$ . Het is duidelijk, dat ook het  $^{235}\text{U}$  eens opraakt. Dit betekent dat er ongeveer 50 kg  $^{235}\text{U}$  per jaar bijgevoerd moet worden. Daar het uranium in de reactor een verrijkingsgraad heeft van ca 3% (dat wil zeggen 3 gr  $^{235}\text{U}$  per 100 gram U), moet er jaarlijks ongeveer 2 ton of één vijfde gedeelte van de kern vernieuwd worden. Echter het gedeelte van de splijtstof dat uit de reactor komt, is nog niet geheel uitgeput. Dit kan ook niet, omdat er nu eenmaal een minimum hoeveelheid uranium nodig is om de kettingreactie in stand te houden. Jaarlijks worden in Dodewaard 36 van de 164 splijtstofelementen vervangen door verse.

De benodigde ruimte voor deze jaarlijkse splijtstofwisseling, die plaatsvindt op de 36 meter vloer (figuur 6), heeft mede bijgedragen tot de vormgeving van het gebouw.

Bij een splijtstofwisseling worden eerst de betonnen deksels van de reactoromhulling verwijderd, dan het metalen deksel van het insluitsysteem en daarna het deksel van het reactorvat. De ruimte boven het vat wordt vervolgens met water gevuld en via een sluis verbonden met het splijtstofopslagbassin.

Zodoende is het mogelijk met behulp van het verrijdbare splijtstofwisselbordes de afgewerkte radioactieve splijtstofelementen onder water vanuit de reactorkern naar het opslagbassin te vervoeren.

In deze opslag blijft de splijtstof ongeveer een jaar staan om de meeste radioactiviteit te laten vervallen. Daarna worden de afgewerkte splijtstofelementen vervoerd in een transportcontainer naar de opwerkingsfabriek.

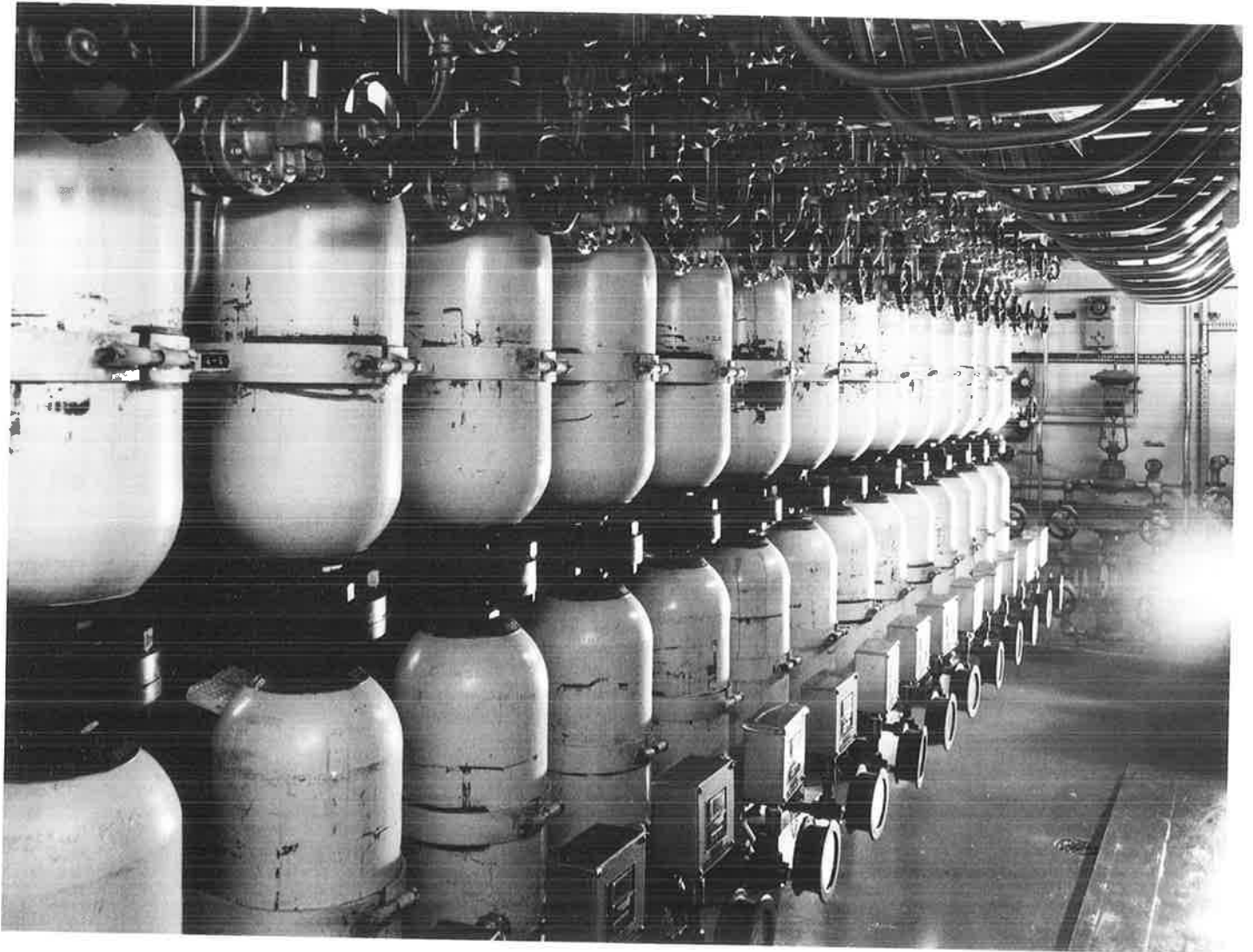


figuur 6 Horizontale doorsnede van de 36 m vloer

- 1 noodcondensator
- 3 spoelplaats voor transportvat
- 4 hulpbordes
- 5 splijtstofwisselbordes
- 6 reactorvat
- 7 reactorkamer
- 8 deksel reactorkamer
- 9 betondeksels
- 10 deksel reactorvat
- 11 splijtstofopslagbassin

*De drukaccumulatoren voor de hydraulische regelstaafdrijving.*

18





### De turbo-generator

De turbine is een gelijkdrukmaschine met een toerental van 3000 omwentelingen per minuut. De machine heeft een enkele as; is dubbelhuizig uitgevoerd met dubbele axiale stroming in het lage-druk gedeelte.

De inlaatstoomdruk is 66,3 bar, de temperatuur 283,2°C. Speciale voorzorgen zijn genomen om lekkage van radioactieve stoom langs de as te voorkomen.

Het vermogen van de generator (59 MWe) wordt geleverd bij een spanning van 10000 Volt. De generator wordt gekoeld met waterstof.

De opwekker is direkt gekoppeld met de turbo-generator.

### De hulpsystemen

De hulpsystemen van een kernenergiecentrale vertonen grote verschillen met die van conventionele centrales. Dit wordt ten eerste veroorzaakt door de aanwezigheid van radioactieve stoffen, die de bediening gecompliceerd maakt. Verder brengt de eigen aard van een kernenergiecentrale het gebruik van andere hulpsystemen met zich.

De beschrijving van de hulpsystemen voor de reactor zal plaatsvinden aan de hand van de tekening van de begane grond (13.20 meter vloer).

Op deze plattegrond vindt men in de linkeronderhoek het rechthoekige reactorgebouw (figuur 7).

In dit gebouw bevinden zich de reactorkamer (RK) en de drukvereffeningsvaten (DVV), met hun biologische afscherming (BS).

Om de reactorkamer tijdens reactorstilstand toegankelijk te maken, is een personensluis (PS) gebouwd.

Verder is plaats reserveerd voor het hydraulische systeem voor de aandrijving van de regelstaven (RSA), compleet met pompen en drukaccumulatoren voor noodstop.

Ook is er voldoende ruimte vrijgelaten om een wagen, voor het transport van de splijtstofelementen-transportcontainer naar binnen te rijden.

Een gedeelte van het water in het reactorvat wordt continu rondgepompt voor reiniging in het reactorwaterzuiverings-systeem (RZS). Dit systeem is opgesteld naast de drukvereffeningsvaten op de begane grond.

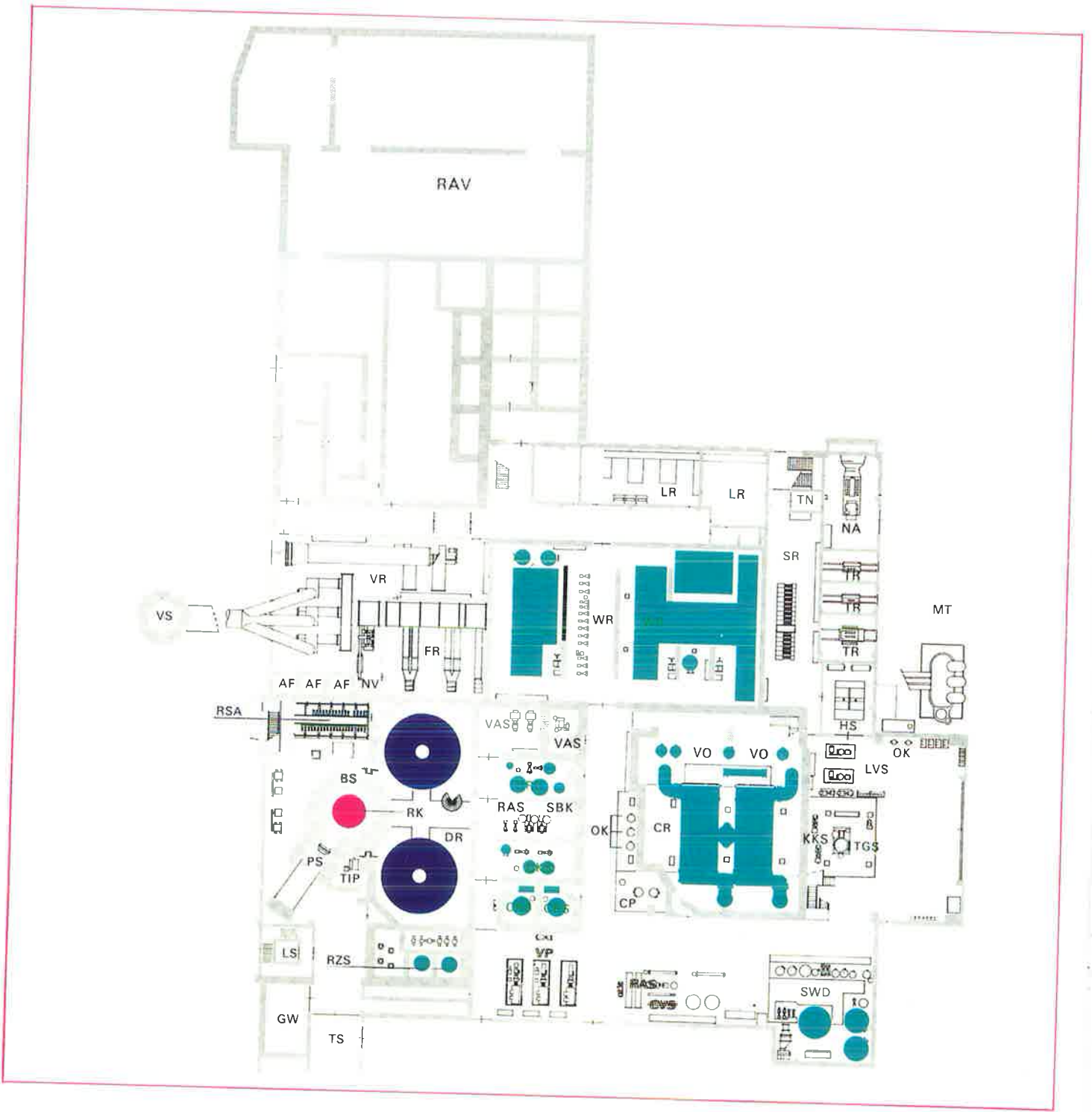
Naast de personensluis is een ruimte gereserveerd voor meetapparatuur, die van buitenaf in de kern kan worden ingebracht. In de kelder van het reactorgebouw (niet zichtbaar op de plattegrond) bevindt zich een dubbel uitgevoerd kern-inundatiesysteem.

Dit kern-inundatiesysteem (KIS) neemt de koeling van de reactor over als het vat lek zou raken. Verder vindt men er het afkoelsysteem van de drukvereffeningsvaten (DAS). Dit laatste systeem koelt deze vaten er ten gevolge van een ongeluk stoom in gecondenseerd is.

De systemen, die pas in werking treden als de reactor op lage druk is gekomen, zijn aan de turbinezijde als het ware uitgebouwd. Zij zijn opgenomen in een aantal ruimten, die van dikke afschermingsmuren zijn voorzien; het zijn het reactorafkoelsysteem (RAS), het afkoelsysteem van het splijtstofwisselbassin (SBK) en het gesloten koelwatersysteem (GKS). Verder bevinden zich in deze ruimte nog een aantal andere systemen, die ook afscherming behoeven, zoals de condensaatreiniging (CRS), de harsregeneratie (HRS) en het afgas-systeem (VAS). Het reactorafkoelsysteem heeft de taak om de temperatuur van het reactorwater laag te houden tijdens stilstand.

Bij het radioactieve verval van de splijtingsproducten komt namelijk zoveel energie vrij, dat het water daardoor snel opgewarmd zou worden. Wanneer de warmteafvoer uit de kern niet op normale wijze plaats vindt (bijvoorbeeld wanneer de reactor uit bedrijf is) is het nodig dat deze warmte door het reactorafkoelsysteem wordt afgevoerd.

Als de gebruikte splijtstof in het splijtstofwisselbassin is ondergebracht, ontstaat ook daar vervalwarmte, zodat ook daar gekoeld moet worden. Het gesloten koelsysteem vormt een barrière tussen sterk radioactief besmet water en het rivierwater.



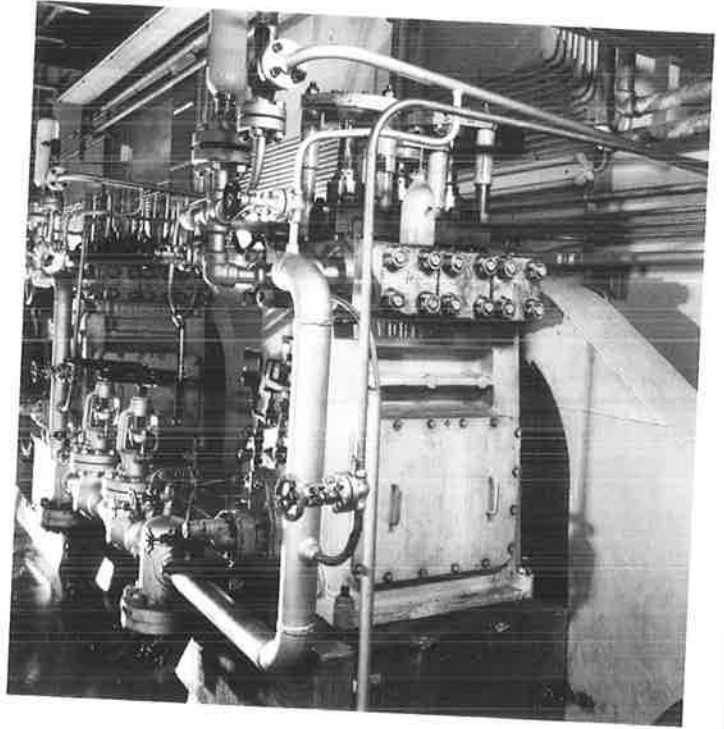
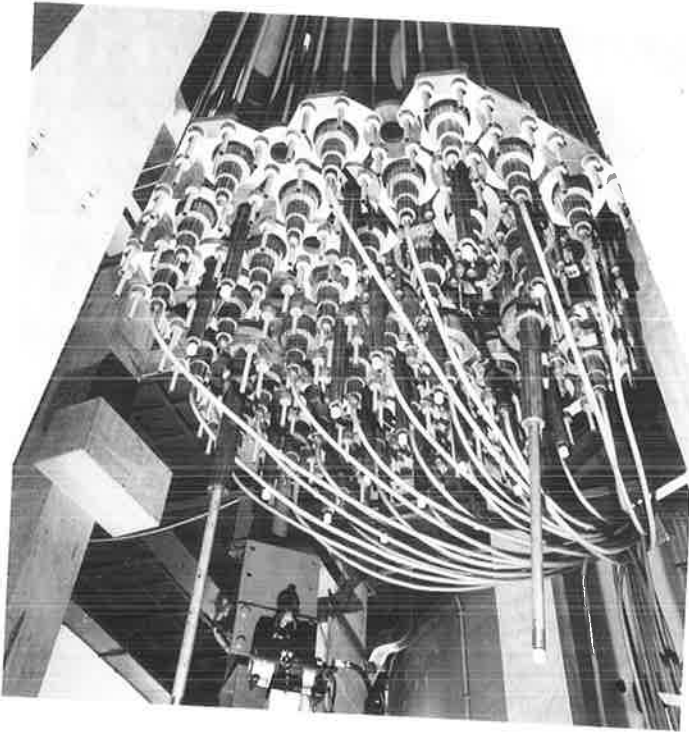
figuur 7 Horizontale doorsnede van de 13.20 m vloer

AF	afgasfilters	PS	personensluis
BS	biologisch schild	RAS	reaktorafkoelsysteem
CP	condensaatpompen	RAV	radioactief afval gebouw
CR	condensruimte	RK	reactorkamer
CRS	condensatiereinigingssysteem	RSA	regelstaafaandrijving
CVS	centrale-verwarmingssysteem	RZS	reactorzuiveringsstelsel
DR	drukvereffeningsruimte	SR	schakelruimte
DVV	drukvereffeningsvat	SWD	suppletiewater-demin-systeem
FR	filtreruimte	TGS	turbine- en generatoroliesysteem
GKS	gesloten koelwatersysteem	TIP	traversing incore probe
GW	werkplaats voor gecontamineerde onderdelen	TN	transformator 500 KVA
HRS	harsgeneratiesysteem	TR	bedrijfstrafo's
HS	hoofdschakelruimte	TS	transportsluis
II	indamperinstallatie	VAS	vacuümafgasstelsel
KKS	condensoreinigingssysteem	VP	voedingpompen
LR	waterlaboratorium	VR	ventilatorenruimte
LS	liftschacht	VS	ventilatieschacht
LVS	luchtvoorzieningssysteem	VO	voorwarmers
MT	machinetransformator	WR	waterbehandelingsruimte
NA	noodaggregaat	SBK	splijststofbassin koelsysteem
NV	noodventilatiesysteem		
OK	oliekoelers		
OM	omvormers		

*Alvorens aan het werk te gaan in hoge stralingsvelden wordt geoefend op een model. Hier ziet u een model van de onderkant van het reactorvat waar zich de aandrijving van de regelstaven bevindt.*

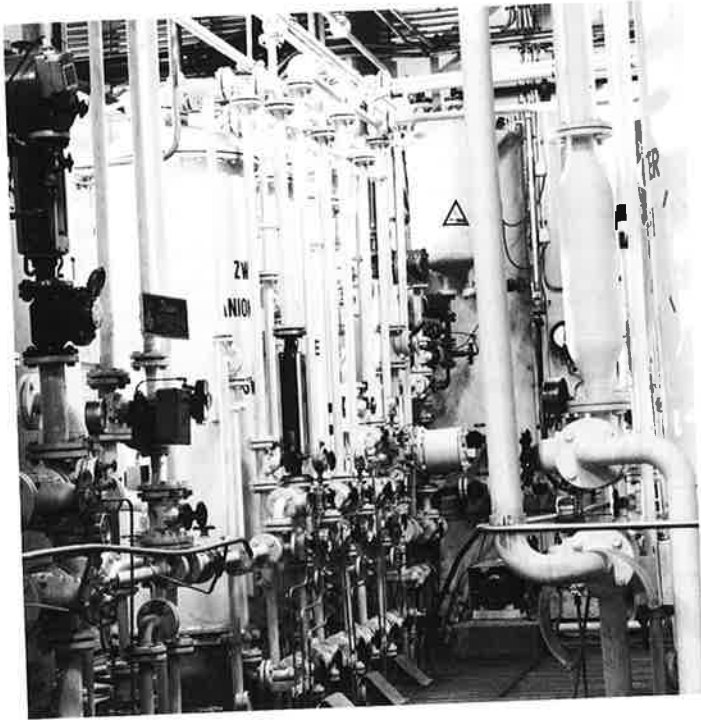
*De pompen die de druk leveren voor de hydraulische regelstaafaandrijving.*

22

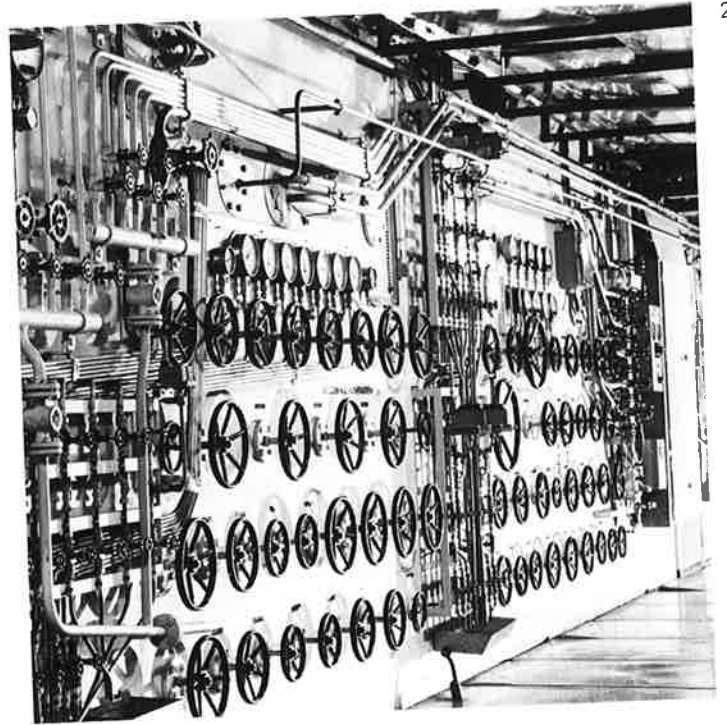




*Installatie voor het bereiden van water voor het reactorvat.*



*Het gesloten koelwatersysteem wordt, om de straling af te schermen, op afstand bediend.*



- 24 Om te voorkomen dat door lekkage radioactiviteit ongecontroleerd in het rivierwater zou komen, worden sterk radioactieve systemen niet met rivierwater gekoeld, maar met water in een gesloten systeem. Het water in dit gesloten systeem wordt dan tenslotte weer met rivierwater gekoeld via een warmtewisselaar zodat geen vermenging optreedt.

Het condensaatreinigingssysteem heeft tot taak al het water dat uit de condensator komt, van verontreinigingen te ontdoen, zodat het water weer gezuiverd de reactor ingaat. Voor deze reiniging wordt in de meeste systemen gebruik gemaakt van ionenwisselaars.

Het harsregeneratiesysteem dient ervoor om de harsen, die in de verschillende ionenwisselaars voorkomen, na gebruik te reinigen.

Het afgassysteem is het systeem, waarmee de niet gecondenseerde gassen uit de condensators worden afgezogen. Nadat de radioactiviteit van de gassen is "vervallen" in een lange vertragingsleiding in de kelder, worden deze gassen gemengd met de ventilatielucht en door de 100 meter hoge ventilatieschacht de atmosfeer ingeblazen.

De radioactiviteit van deze gassen is na het verlaten van de vertragingsleiding reeds zeer laag. Na verdunning met ventilatielucht zorgt de verspreiding in de atmosfeer ervoor, dat het stralingsniveau op de grond te verwaarlozen is.

Op de plattegrond ziet men verder de beide condensators. Hier wordt de stoom, die uit de turbine komt, gecondenseerd.

Met de condensaatpompen (CP) wordt het water vervolgens door het condensaatreinigingssysteem (CRS) gepompt naar de voorwarmers (VO), die naast de condensators zijn opgesteld, vanwaar het water door de voedingwaterpompen (VP) wordt teruggepompt naar het reactorvat.

Op de plattegrond van de 22,20 meter vloer (figuur 8) herkent men gemakkelijk de turbine met generator en opwekker. Ook

ziet men de regelzaal (RZ), die zich op de 22,20 meter vloer naast de turbinezaal bevindt.

In de regelzaal komt informatie uit de gehele centrale bij elkaar.

Veel systemen zijn daartoe op duidelijke wijze weergegeven op een grafisch paneel. Met behulp daarvan kunnen standen van kleppen in de gehele centrale waargenomen worden, en drukken, temperaturen en stroomsnelheden afgelezen worden. Verder worden alarmsignalen zichtbaar als een of andere parameter in de centrale een ongewenste waarde aanneemt. De geloosde hoeveelheid radioactiviteit wordt hier continu geregistreerd terwijl alle stralingsmonitors, die op verschillende plaatsen in de gebouwen zijn opgehangen hier de gemeten waarden weergeven.

Het centrum van de panelen wordt gevormd door een plattegrond van de reactorkern, waarop de operator onder meer de standen van alle regelstaven direct kan aflezen.

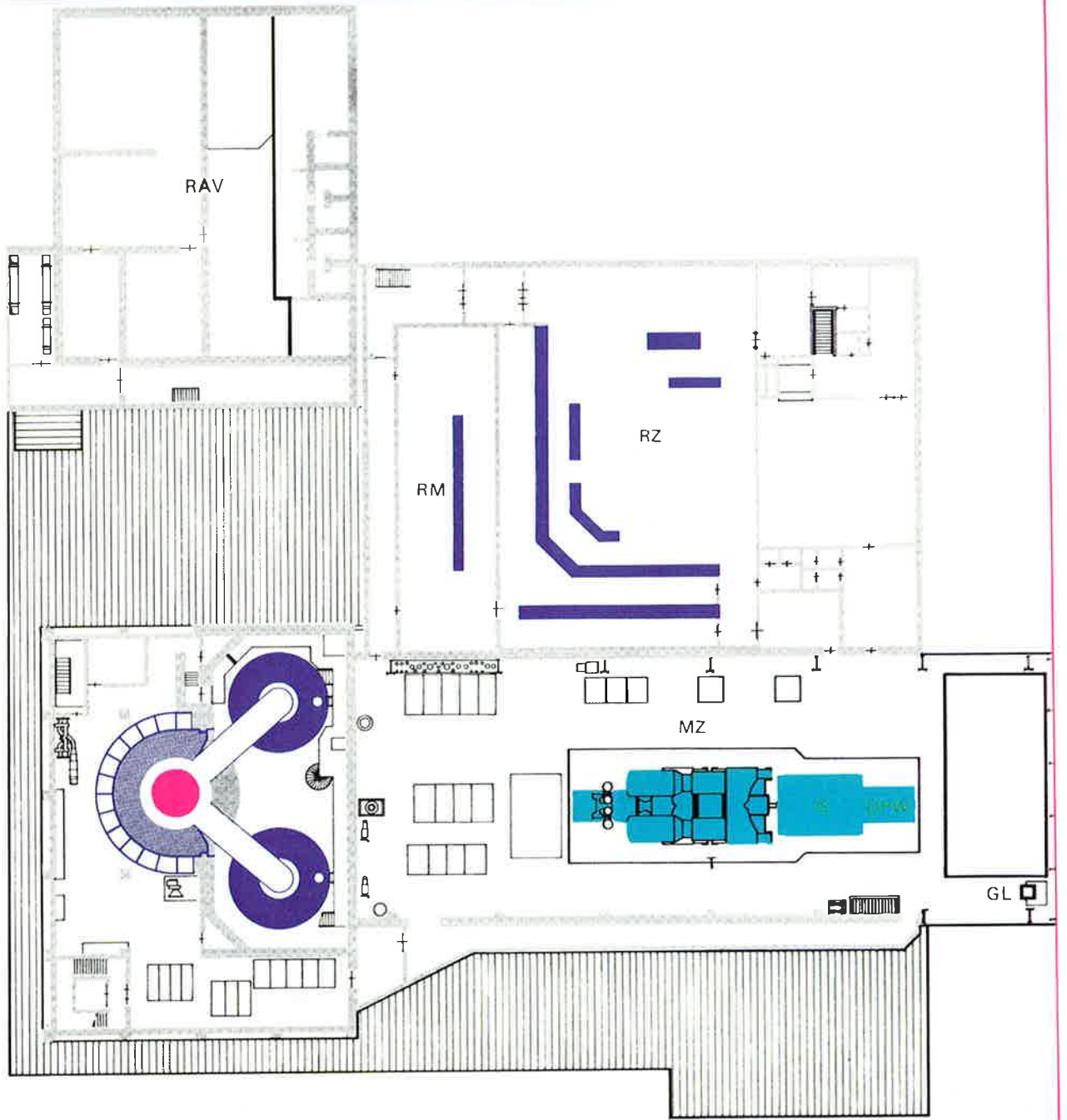
De console, waarachter de operator gezeten is, biedt onder meer de keuzemogelijkheid voor de regelstaven en de knoppen voor het in- of uitbewegen ervan.

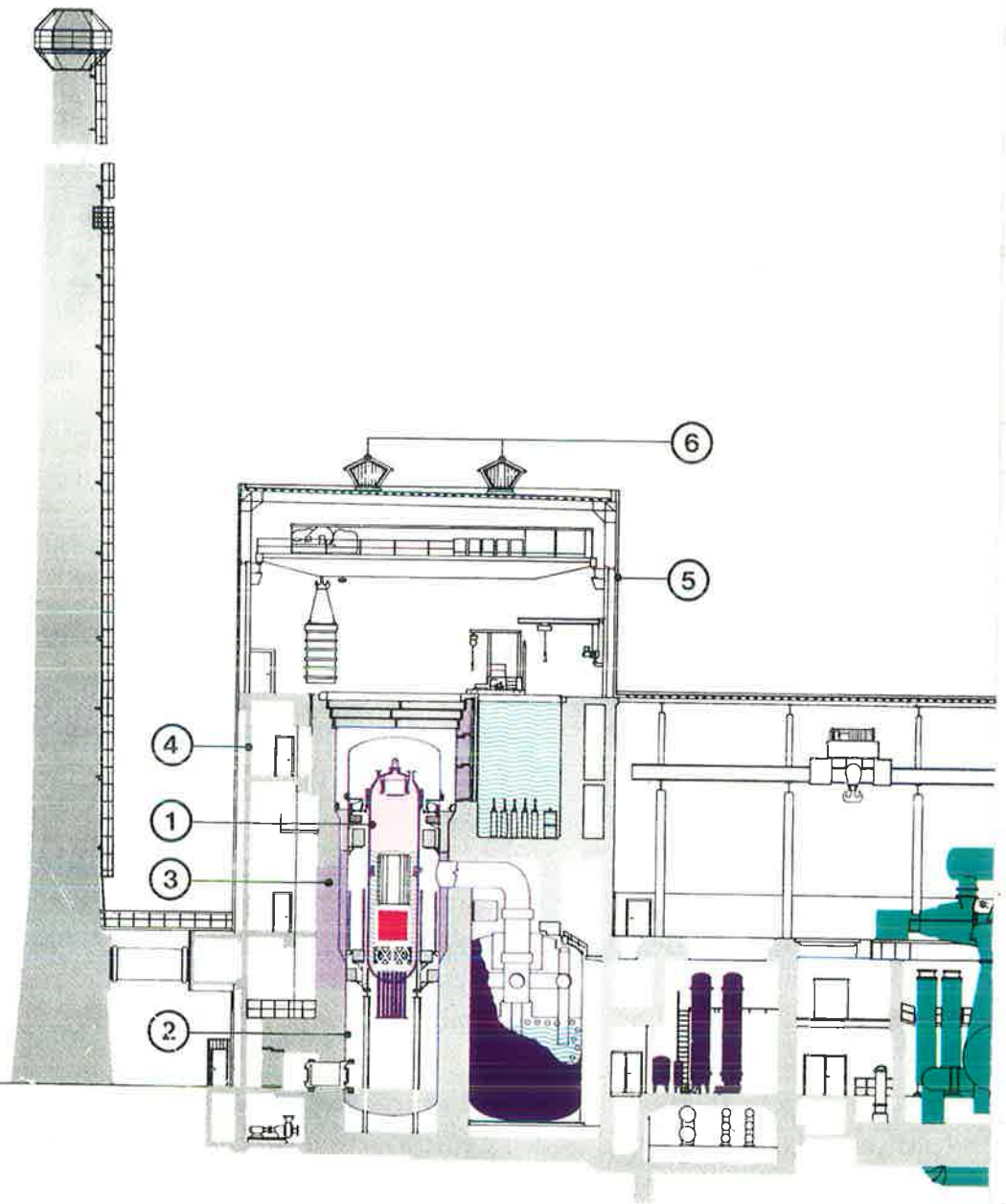
Op een ander paneel wordt de turbine met hulpsystemen grafisch weergegeven, als ook de generator met overige elektrische systemen. Op deze panelen kan men ook standen van schakelaars, stromen en spanningen aflezen.

Tenslotte wordt in figuur 9 de gehele centrale in langdoorsnede gegeven.

figuur 8 Horizontale doorsnede van de 22,20 m vloer

- G generator
- GL goederenlift
- MZ machinezaal
- OPW opwekker
- RAV radioactief afvalverwerking
- RM computer
- RZ regelzaal
- T turbine

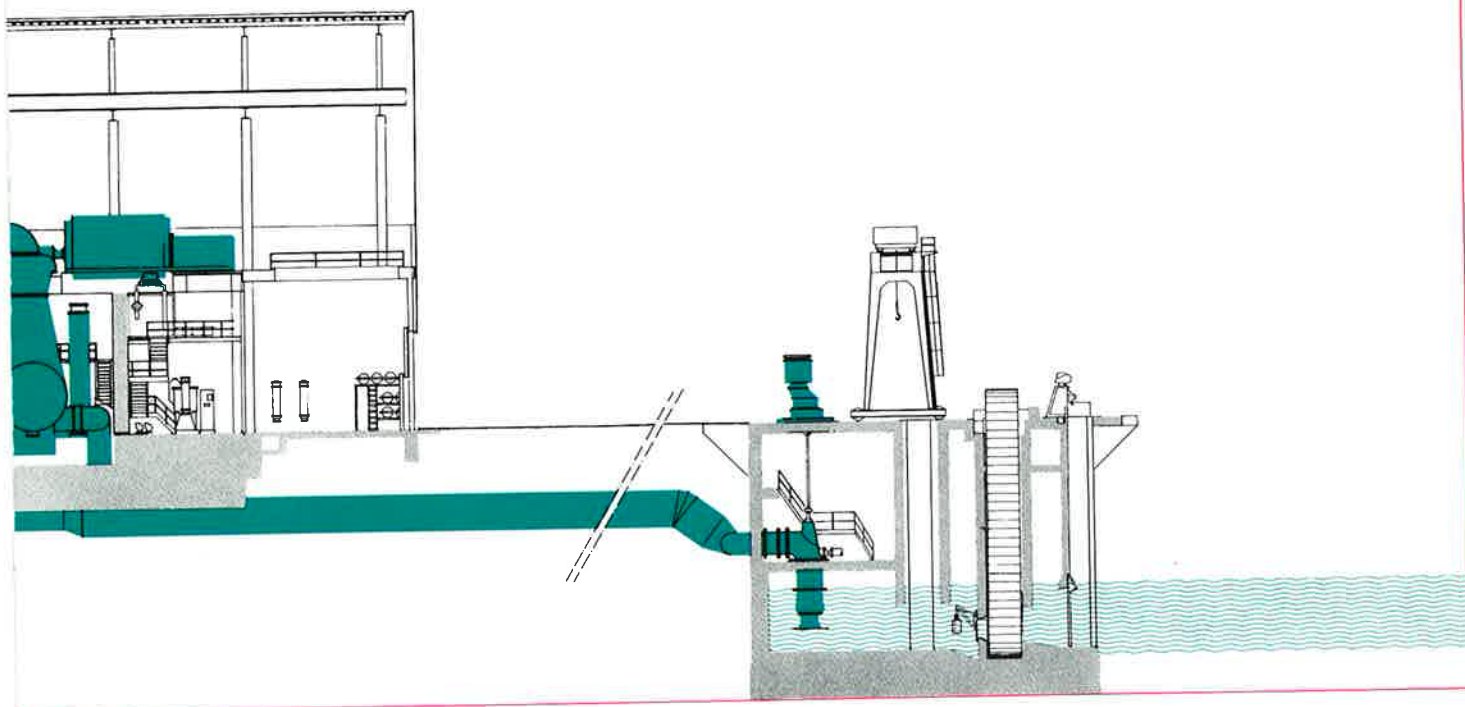




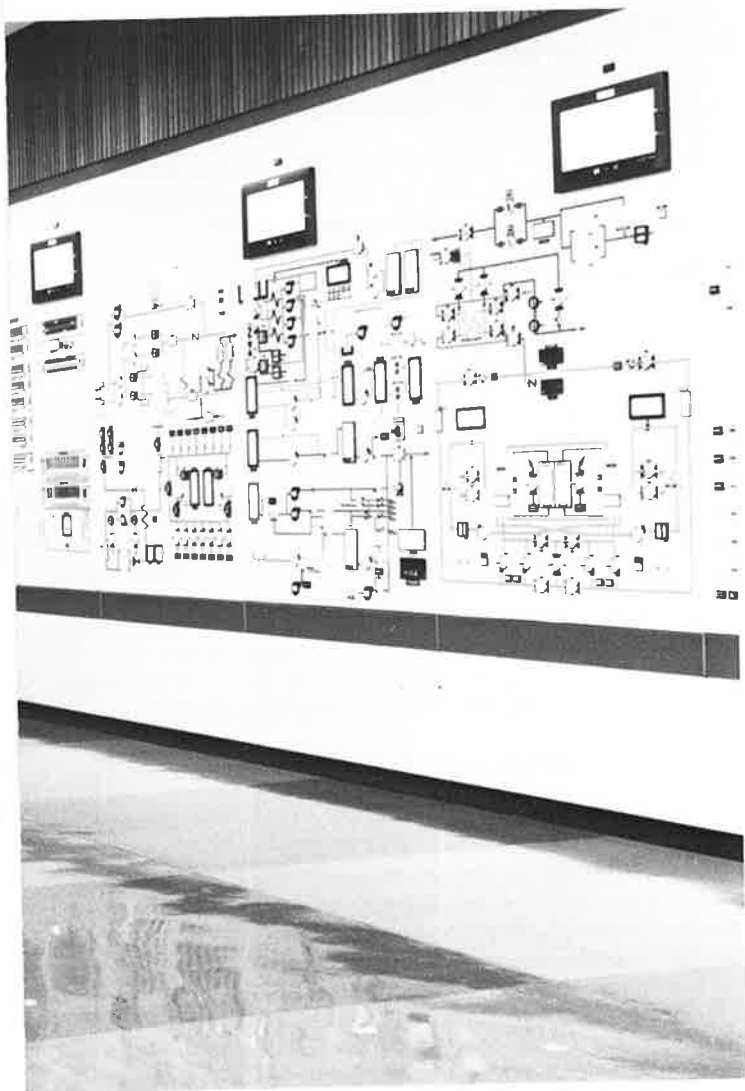


figuur9 **Langsdoorsnede kernenergiecentrale Dodewaard**

- ① *Stalen reactorvat*
- ② *Stalen insluitingsvat (containment)*
- ③ *Betonnen biologisch schild*
- ④ *Betonnen wand reactorgebouw*
- ⑤ *Stalen wand reactorgebouw, aan de binnenzijde bekleed met baksteen*
- ⑥ *Explosieluiken*







De bedrijfsresultaten van een elektriciteitscentrale worden gemeten naar de tijd dat de installatie als geheel beschikbaar is voor het leveren van electriciteit.

Voor de centrale van Dodewaard zijn deze cijfers zeer gunstig. De weinige niet-voorzien bedrijfsonderbrekingen die er in de loop van de jaren zijn geweest, hadden veelal betrekking op de turbine-installatie.

Met deze cijfers behoort de centrale van Dodewaard tot een van de beste ter wereld, wat ook blijkt uit de vele plaquettes die door General Electric in achtereenvolgende jaren aan Dodewaard zijn uitgereikt wegens "outstanding performance".

Om dit te bereiken en te continueren, moet veel aandacht worden besteed aan een aantal aspecten die van groot belang zijn bij het bedrijven van een kernenergiecentrale. Enkele hiervan zullen kort worden aangegeven.

#### Planning, werkmethode en procedures

In verband met de complexiteit van de installatie, de op bepaalde plaatsen aanwezige stralingsvelden en de vele mensen van de verschillende disciplines, die bij uitvoerende werkzaamheden zijn betrokken, is een goede planning van de werkzaamheden van wezenlijk belang.

Om voorafgaande aan de eigenlijke werkzaamheden het geheel te kunnen overzien en potentiële problemen te kunnen onderkennen, wordt veel aandacht gegeven aan de werkvoorbereiding, hetgeen resulteert in een aantal procedures.

Deze procedures worden ook kritisch bekeken door mensen die niet direct bij de uitvoering zijn betrokken, zoals kwaliteitsborgingsfunctionarissen, zodat de kans dat er fouten of onvolkomenheden in zitten klein is.

Indien noodzakelijk, bijvoorbeeld in verband met ter plaatse aanwezige hoge stralingsvelden, worden modellen gebouwd, waarin de werkzaamheden eerst worden geoefend.

Het opstellen van en het omgaan met deze procedures vereist speciale werkmethode, meer nog denkmethode, die in de



praktijk zijn en nog steeds worden geleerd.

Met de ervaring die in de loop der jaren is opgebouwd worden ook verschillende technieken ontwikkeld, bijvoorbeeld inspectiemethoden, of het construeren en gebruiken van afstandsbediende apparatuur.

Van groot belang is ook het preventieve onderhoud van systemen en de ontwikkeling van detectiemethoden om potentiële problemen vroegtijdig te onderkennen.

### **Opleiding en training personeel**

Dodewaard heeft altijd eigen opleidingsprogramma's gehad voor het eigen personeel.

Na het ongeval met de centrale in Harrisburg heeft de Nederlandse overheid de opleidings- en trainingsprogramma's voor de operators van de centrale geformaliseerd door de te stellen eisen vast te leggen in een voorschrift.

Deze eisen hebben betrekking op theoretische kennis en op praktische vaardigheid.

Ten behoeve van opleiding en training is een simulatorproject opgezet.

De simulator bestaat uit een computersysteem, waarmee de centrale in al zijn regelingen kan worden nagebootst.

Het doel is de operators intensief te trainen in het bedienen van de installatie, ook in uitzonderlijke omstandigheden.

### **Het omgaan met radioactiviteit en straling**

Een aspect, dat voortspuit uit het gebruik van kernenergie, is het omgaan met radioactiviteit en straling.

Ter bescherming van de werknemers zijn er in de Nederlandse wetgeving normen gesteld voor de maximale stralingsdosis die mensen jaarlijks mogen ontvangen.

Primair is echter dat elke niet noodzakelijke blootstelling aan radioactiviteit en straling wordt voorkomen.

Hier ligt het werkterrein van de stralingscontroledienst, die toezicht houdt op de naleving van de wettelijke regelingen.

Door intensieve controle, en het meewerken aan het vaststel-



len van de eerder genoemde procedures, is er steeds meer inzicht en kennis gegroeid op het gebied van de praktische stralingsbescherming.

Waar mogelijk adviseert de stralingscontroledienst ook bij aanpassingen van de installatie, om potentiële stralingsbronnen te verwijderen of af te schermen.

Door al deze ervaringen is er een goed inzicht ontstaan in de problemen die zich kunnen voordoen in een kernenergiecentrale en de maatregelen die genomen kunnen worden om die problemen te voorkomen of te verminderen.

In Dodewaard heeft dat tot resultaat gehad dat de gemiddelde jaarlijkse stralingsdosis voor de werknemers in de loop van de tijd belangrijk is afgenomen.

Ook bij de totstandkoming van een databank bij TNO, waarin voor geheel Nederland de door radiologische werkers ontvangen stralingsdosis wordt geregistreerd, heeft Dodewaard een belangrijke rol vervuld.

Tenslotte zij vermeld dat de lozingen, die eveneens door de overheid aan strenge normen zijn gebonden, door de stralingscontroledienst worden bewaakt.

#### **Aanpassen van de installatie aan nieuwe inzichten**

Doordat de storingen die zich in nucleaire installaties over de gehele wereld voordoen worden gepubliceerd in internationale tijdschriften, kan er permanent worden gekeken of de gemelde problemen zich ook in Dodewaard zouden kunnen voordoen. Dit, gevoegd bij eigen ervaring en de resultaten van eigen onderzoek, heeft in de loop der jaren geleid tot aanpassingen van de installatie, die zodoende steeds opnieuw wordt aangepast aan de stand van de techniek.

#### **Praktijkervaring met de bestaande installatie**

Uit de jarenlange ervaring met de Dodewaard centrale komt ook een aantal aspecten naar voren die minder gemakkelijk te

veranderen zijn, maar die wel belangrijk zijn bij de eventuele bouw van nieuwe kernenergiecentrales.

Voorbeelden zijn de krap gebouwde werkruimten op sommige plaatsen.

Dit levert af en toe moeilijk werkbare situaties op.

Ook het grote aantal mensen dat is betrokken bij de werkzaamheden tijdens een revisieperiode kan maar moeizaam worden verwerkt, omdat de toegangs- en omkleedruimten ook krap zijn.

Een niet onbelangrijke bijdrage tot de stralingsniveaus geven constructiematerialen, die door rondvliegende neutronen, ook buiten het reactorvat, radioactief zijn geworden (activering).

Door de keuze van andere materialen kan de bijdrage ten gevolge van dit proces worden verminderd.

Ook in Dodewaard is voor bepaalde leidingen, bij vervanging, gekozen voor andere materialen.

Al in een vroeg stadium is in Dodewaard de afvalverwerking voor laag en middel-radioactief afval vervangen door een moderne afstandbediende installatie, die nog uitgebreid is met een verbrandingsoven, om het volume van het te verwerken afval zoveel mogelijk te beperken.

#### **Publieksinformatie**

Een niet onbelangrijk aspect van de centrale te Dodewaard is de informatie die in en door de centrale wordt verstrekt aan belangstellende groepen.

Jaarlijks bezoeken vele duizenden mensen de centrale om zich een beeld te vormen over het gebruik van kernenergie als energiebron voor de naaste toekomst.

32 De ervaring, opgedaan met het bedrijven van de centrale Dodewaard in een lange reeks van jaren heeft geleid tot veel technische en organisatorische maatregelen om de bedrijfszekerheid en de veiligheid te vergroten. De hoge beschikbaarheid, de lage gemiddelde stralingsbelasting en de steeds geringer wordende lozingen in lucht en water getuigen van het effect van die maatregelen.

Naast de bedrijfservaring speelt ook het specifieke onderzoek dat in Dodewaard wordt verricht een grote rol in het op peil houden en uitbreiden van de kennis omtrent het gebruik van kernenergie. Zonder volledig te zijn zullen enkele aspecten van dit onderzoek worden belicht.

### Optimalisatie splijtstofgebruik

Hoewel de kosten van de splijtstof maar een deel vormen van de totale productiekosten, wordt er toch veel onderzoek gedaan om de splijtstofhuishouding zo economisch mogelijk te doen zijn.

Eenzijds leidt dit onderzoek tot besparingen, doch even belangrijk is het inzicht dat ontstaat in het gedrag van de splijtstof tijdens gebruik.

In het verleden is voor dit doel onder meer een splijtstofelement, voorzien van instrumentatie, in de reactor geplaatst. Hiermee konden veel praktijkgegevens worden verzameld. Een andere belangrijke bron van gegevens vormt het onderzoek dat plaatsvindt aan gebruikte splijtstofelementen. Er worden allerlei testen uitgevoerd om bijvoorbeeld lekkages in splijtstofstaafjes op te sporen, terwijl er ook veel metingen plaatsvinden om te onderzoeken hoe een splijtstofelement in de praktijk is belast. Dit onderzoek heeft intussen geleid tot een hogere energie-opbrengst per splijtstofelement. Van belang is ook te kijken naar het hergebruik van het niet verspleten uranium en het nieuw gevormde plutonium. Door het vele eigen onderzoek zijn de deskundigen die zich hiermee bezighouden, ook internationaal, volwaardige gesprekspartners.

### Dynamisch gedrag van de reactor

In een werkend systeem vinden voortdurend fluctuaties van allerlei grootheden plaats zoals temperatuurschommelingen, drukveranderingen en veranderingen in de neutronenflux. Deze fluctuaties worden wel aangeduid als "ruis".

In Dodewaard wordt veel aandacht besteed aan de analyse van deze kleine fluctuaties (ruisonderzoek), waardoor veel inzicht wordt verkregen in het dynamisch gedrag van een kernreactor.

Uiteindelijk doel van het onderzoek is het beter begrijpen van dit dynamisch gedrag, wat op zich weer leidt tot mogelijkheden om uit afwijkingen in dit gedrag mogelijke fouten of ongerechtigheden vroegtijdig te herkennen.

### Materiaalonderzoek

Vanaf de start van de reactor zijn in het reactorvat allerlei materiaalmonsters gebracht, om te bestuderen hoe de in Dodewaard toegepaste materialen zich gedragen als ze worden blootgesteld aan de intense neutronenstraling binnen de reactorkern.

Deze monsters worden regelmatig verwijderd en onderzocht op bijvoorbeeld structuurveranderingen in het materiaal.

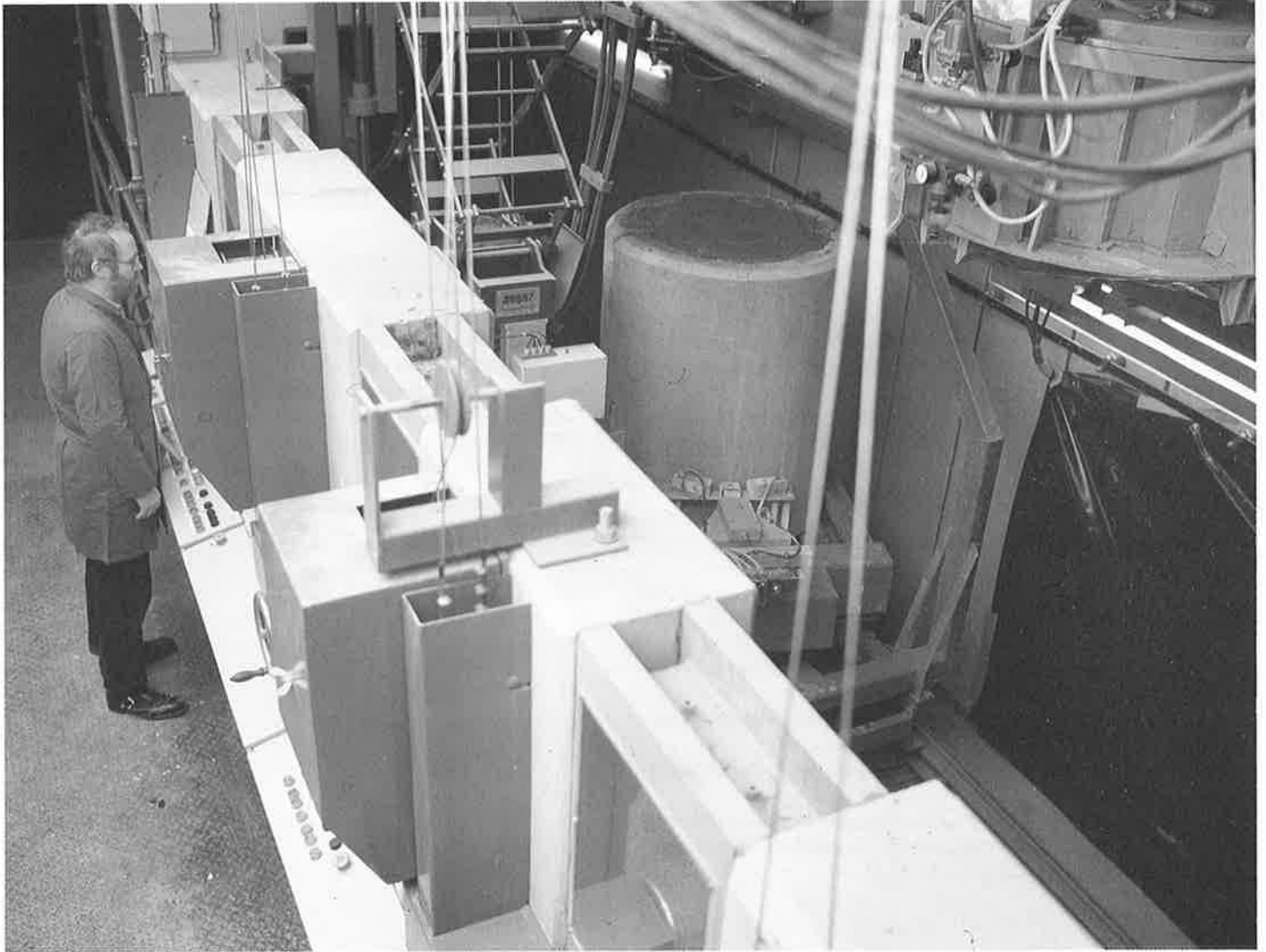
Ook de mate waarin de toegepaste of toe te passen materialen zelf radioactief worden onder invloed van neutronenstraling speelt een grote rol in dit onderzoek.

Van belang is ook het feit dat corrosieproducten die bijvoorbeeld vanuit de turbine-installatie in het water terechtkomen, in de buurt van de reactorkern eveneens door neutronen worden geactiveerd tot radioactieve producten.

Deze corrosieproducten kunnen zich vervolgens afzetten in allerlei leidingen, waardoor er ongewenste stralingsvelden ontstaan.

In Dodewaard vindt veel onderzoek plaats naar de wijze waarop dit proces verloopt, en vooral hoe het kan worden voorkomen.

*De op afstand bediende installatie voor de verpakking van licht radioactief afval in de kerncentrale Dodewaard.*



Hebben zich eenmaal afzettingen gevormd, dan is het belangrijk te onderzoeken hoe dit kan worden verwijderd (decontaminatie).

Met succes zijn en worden deze proeven in Dodewaard uitgevoerd.

Een bijzondere vorm van materiaalonderzoek is de controle van de effectiviteit van de regelbladen.

Regelbladen bevatten borium om de overvloedige neutronen weg te vangen.

Deze neutronen worden door de kernen van het borium opgenomen, en het zou niet onlogisch zijn te veronderstellen dat er na enige tijd in het borium een "verzadiging" optreedt, waardoor de effectiviteit van de regelbladen afneemt.

Om dit te onderzoeken wordt een regelblad uit de reactor verwijderd en bestraald met neutronen.

Een fotografische plaat wordt achter het regelblad gehouden, waarop zichtbaar wordt of er neutronen door het regelblad komen (neutrografie).

Deze technieken lijken eenvoudig, doch het gegeven dat alles, vanwege de straling, onder water moet gebeuren is natuurlijk een grote handicap en stelt bijzondere eisen aan de gebruikte technieken.

### **Afvalverwerking**

Een niet onbelangrijk aspect dat samenhangt met het gebruik van kernenergie is de afvalverwerking.

Tijdens het proces ontstaan radioactieve stoffen, die uiteindelijk als afval verwerkt moeten worden.

Van primair belang is het ontstaan van deze producten zoveel mogelijk te voorkomen.

Het eerder genoemde onderzoek is daarom al van uitzonderlijk belang, omdat door het toepassen van andere technieken de afvalstroom zo klein mogelijk kan blijven.

Er zal echter altijd een hoeveelheid materiaal als afval behandeld moeten worden. Ook op dit terrein vindt in Dodewaard onderzoek plaats.

Dit onderzoek is gericht op verkleining van het volume en heeft geresulteerd in twee werkbare procedés: zuurvertering en verbranding.

De laatste mogelijkheid, verbranding, wordt in Dodewaard toegepast om daarmee op industriële schaal ervaring op te doen.

Dit zijn slechts enkele voorbeelden van het vele onderzoek dat in Dodewaard wordt verricht.

Niet genoemd, maar zeker niet onbelangrijk, zijn de studies die worden uitgevoerd naar de veiligheid van reactoren en het gedrag van splijtstof in ongevalssituaties.

Er is op het gebied van risicoanalyses een geweldige know-how verkregen, die onder meer van nut was bij de risicoanalyses die zijn uitgevoerd bij de bouw van de stormvloedkering in de Oosterschelde.





**Colofon**

*Druk* : Roos en Roos, Arnhem  
*Lay-out* : Roos en Roos, Arnhem  
*Tekeningen* : Gerard Douwe/Easter Fairwether, Den Haag  
*Fotografie* : Henk Leerink, Ruud Rutten (GKN), APA,  
Ronald van der Horst, Henk Gerritsen  
*Uitgever* : N.V. Gemeenschappelijke  
Kernenergiecentrale Nederland

R&R/A3  
5-90