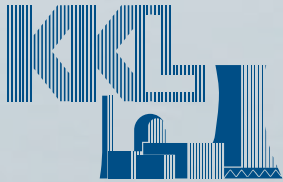




Kernkraftwerk Leibstadt

Technische Beschreibung



Kernkraftwerk Leibstadt
www.kkl.ch

Inhaltsverzeichnis

Das KKL – ein Partnerwerk	4
Unser KKL – Ihr Strom	5
Von der Bauzeit bis heute	6
Das KKL auf einen Blick	7
So funktioniert das KKL	8
Der nukleare Teil des KKL	9
■ Dampferzeugungssystem	9
■ Reaktorregelung	10
■ Schnellabschaltung	11
■ Brennelemente	12
■ Hilfsanlagen	14
Schnittzeichnung der Anlage	16/17
Der konventionelle Teil des KKL	18
■ Hauptwärmekreislauf	18
■ Turbinengruppe	19
■ Generator	20
Kühlsysteme	22
■ Hauptkühlwassersystem	22
■ Nebenkühlwassersystem	23
■ Notkühlsysteme	23
Elektrische Anlagen	24
■ Transformatoren	24
■ Eigenbedarf	24
■ Notstromversorgung	25
■ Notsteuerstelle	25
Der Brennstoff des KKL	26
■ Brennstoffbeschaffung	26
■ Brennstoffverbrauch	26
■ Wiederaufarbeitung	26
Abfall	27
■ Hochaktiver Abfall	27
■ Schwach- und mittelaktiver Abfall	27
■ Transport- und Lagerbehälter	27
Sicherheit im KKL	28
■ Schutz von Mensch, Umwelt und Anlage	28
■ Gelebte Sicherheitskultur	29
■ Behördliche Kontrolle	29
Umweltaspekte	30
■ Treibhausgase	30
■ Emissionen in Luft und Wasser	30

Impressum

Erstausgabe April 2011

Kernkraftwerk Leibstadt AG, CH-5325 Leibstadt

Gesamtleitung: Barbara Bumbacher, KKL

Konzept und Redaktion: Ruth Schmid, KKL

Technische Beratung: Ulrich Schläppi, KKL

Gestaltung: Markus Etterich, Basel

Grafiken: Edith Huwiler, Zürich

Fotos: Palma Fiacco, Zürich; Karin Gfeller, KKL;
Peter Graf, KKL; Daniel Schläfli, Kleindöttingen;

Ruth Schmid, KKL; Ivo Stalder, KKL

Druck: Offsetdruck Kramer, Leibstadt



Das KKL – ein Partnerwerk

Am Schweizer Ufer des Hochrheins, zwischen Koblenz und Laufenburg und unweit der Aare-Mündung, liegt das 1245 MW-Kernkraftwerk Leibstadt. Es nahm am 15. Dezember 1984 als fünftes Schweizer Kernkraftwerk den Dauerbetrieb auf. Nach Beznau I, Beznau II, Mühleberg und Gösgen ist Leibstadt das jüngste und leistungsstärkste Kernkraftwerk der Schweiz. Seit 1984 produziert es zuverlässig rund ein Sechstel des in der Schweiz verbrauchten Stroms. Das entspricht zirka 29 Millionen Kilowattstunden jeden Tag.

Das Kernkraftwerk Leibstadt ist eine Aktiengesellschaft. Insgesamt sind sieben Unternehmen der Strombranche zu unterschiedlichen Anteilen an der Kernkraftwerk Leibstadt AG (KKL) beteiligt: AEW Energie AG, Alpiq AG, Alpiq Suisse SA, Axpo AG, BKW-FMB Beteiligungen AG, Centralschweizerische Kraftwerke AG (CKW) und Elektrizitätsgesellschaft Laufenburg AG (EGL). Die Axpo Holding AG besitzt mit insgesamt 52,7 Prozent die Mehrheitsbeteiligung. Die Axpo AG stellt die Geschäftsleitung des KKL.

Das KKL beschäftigt rund 500 Mitarbeitende aus der Schweiz und dem grenznahen Ausland. Über 20 Prozent der Belegschaft kommen aus Deutschland. Das KKL ist ein langfristig sicherer und attraktiver Arbeits- und Ausbildungsplatz in der weiteren Region. Auch darüber hinaus ist das Unternehmen für zahllose Lieferanten und Dienstleister ein wichtiger Partner und solider wirtschaftlicher Wert.

Sicher, zuverlässig und wirtschaftlich, so möchte das KKL auch weiterhin seinen Strom produzieren, im Auftrag und nach Vorgabe der Eigentümer, mindestens bis zum Jahr 2045. Dabei ist der Schutz von Mensch und Umwelt vor radioaktiven und konventionellen Gefahren immer oberstes Ziel.

In der Glaswand des Informationszentrums spiegelt sich das Kernkraftwerk.

Unser KKL – Ihr Strom

Strom für eine Million Menschen

Wasserkraft und Kernenergie sind die Pfeiler der Schweizer Stromproduktion. Rund 40 Prozent der Grundversorgung erzeugen die fünf Schweizer Kernkraftwerke. An diesen wichtigen Versorgungsauftrag gegenüber den schweizerischen Stromkonsumenten leistet das Kernkraftwerk Leibstadt einen beträchtlichen Beitrag. Seit 1984 produziert es über neun Milliarden Megawattstunden jährlich – allein gut 15 Prozent des Schweizer Strombedarfs. Und das zuverlässig rund um die Uhr.

Sicherheit zuerst

Mehrfach geführte Sicherheitssysteme, eine hohe Sicherheitskultur sowie fachliche und soziale Kompetenz der Mitarbeitenden garantieren, dass das KKL mit Schweizer Zuverlässigkeit läuft. Dank kontinuierlicher Verbesserung in allen Belangen kann es sich weltweit mit den besten Anlagen messen. Abläufe im Zusammenspiel von Mensch und Maschine werden regelmässig geprüft und Prozesse optimiert. Bei Überschreiten bestimmter Betriebsgrenzwerte wird der Reaktor automatisch abgeschaltet.

Das KKL selbst, Bund und Behörden stellen gemeinsam sicher, dass die geltenden gesetzlichen Anforderungen an den Schutz von Mensch und Umwelt jederzeit erfüllt sind. Sicherheit steht immer vor Wirtschaftlichkeit.

Wirtschaftlich wertvoll

Das KKL ist eine Stromfabrik. Der produzierte Strom wird zum Gestehungspreis an die Aktionäre abgegeben. Diese Unternehmen sind grösstenteils im Besitz der öffentlichen Hand. Kantone und Gemeinden, Elektrizitätswerke sowie private Endverbraucher profitieren von den attraktiven Gestehungskosten des KKL-Stroms. Sie liegen seit Jahren im Bereich von fünf Rappen pro Kilowattstunde Strom – ein im internationalen Vergleich sehr tiefer Wert. Darin inbegriffen sind auch die Kosten für die Stilllegung der Anlage und Entsorgung der Abfälle (1 Rp./kWh). Der relativ geringe Anteil der Brennstoffkosten von fünf bis zehn Prozent garantiert langfristig tiefe und stabile Strompreise. Vom KMU bis zur Grossindustrie kommt dies allen zugute und hilft dem Land, trotz hoher Infrastruktur- und Lohnkosten die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten.

Foto: Ruth Schmid



Dem Kühlturm entsteigt reiner Wasserdampf.

Dem Klima zuliebe

Aus dem Kühlturm des KKL steigt reiner Wasserdampf. Das Kraftwerk selbst gibt weder CO₂ noch andere Treibhausgase oder Luftschadstoffe ab. Nicht allein deshalb ist das KKL eine umwelt- und klimafreundliche Anlage. Auch alle vor- und nachgelagerten Prozesse von der Uranmine bis zum geologischen Tiefenlager weisen sehr bescheidene Emissionen auf.

Ein Stück Unabhängigkeit

Die heimischen Kern- und Wasserkraftwerke stellen sicher, dass die Schweizer Stromversorgung in hohem Mass vom Ausland unabhängig bleibt. Der in der Kernenergie verwendete Brennstoff Uran wird in vielen Ländern der Erde abgebaut und hat eine sehr hohe Energiedichte. So müssen nur vergleichsweise geringe Mengen importiert werden, welche sich leicht bevorraten lassen. Das KKL kann seine Versorgung langfristig und sicher planen.

Solide verankert

Beim Bau des Kernkraftwerks wurde vertraglich vereinbart, dass die KKL AG der Gemeinde Leibstadt einen Teil des jährlichen Strombedarfs liefert. Da das Kernkraftwerk aber kein Versorger ist, entschädigt die KKL AG die Gemeinde Leibstadt mit dem Gegenwert von rund einem Drittel ihres jährlichen Stromverbrauchs. Daneben zahlt die KKL AG jährliche Beiträge in die «Stiftung Pro Leibstadt» ein, um kulturelle und gemeinnützige Projekte in der Gemeinde Leibstadt zu fördern. Auch über das Informationszentrum, einem Ort der Begegnung und des Austauschs, trägt das KKL zum gesellschaftlichen Leben in der Region bei.

Von der Bauzeit bis heute

Die Kernkraftwerk Leibstadt AG (KKL) wurde am 26. November 1973 gegründet und der Partnervertrag mit ursprünglich 14 Firmen unterzeichnet. Bei der Inbetriebnahme Ende 1984 blickte das Unternehmen bereits auf eine rund 20-jährige Planungs- und Baugeschichte zurück. Vor dem Bau wurde der Standort in der Gemeinde Leibstadt umfassend auf seine Eignung hin untersucht. Bodenbeschaffenheit, Energieabtransport, Zugänglichkeit für Schwertransporte und andere Faktoren waren zu berücksichtigen. Besonders wichtig war die Lage am Rhein, der jederzeit eine ausreichende Wasserversorgung des Kühlkreislaufs gewährleistet. Auch die geringe seismische Aktivität sprach für den Standort Leibstadt. Sie ist im nördlichen Schweizer Mittelland viel geringer als beispielsweise im engeren Alpenraum, was für die Sicherheit der Anlage relevant ist, selbst wenn sie wie das KKL für sehr starke Erdbeben ausgelegt ist. Auch den hohen Anforderungen des Umweltschutzes wurde Rechnung getragen. Da der Bund während der Projektphase im Jahr 1971 die Kühlung mit Flusswasser verbot, wurde die Kraftwerkskühlung umkonzipiert und auf Kühlturbetrieb ausgelegt.

Zahlreiche Verzögerungen in der Projektierung brachten mit sich, dass die ursprüngliche Ausleistungsleistung von 600 MW bis zu Betriebsbeginn auf 960 MW erhöht und die Anlage an den Fortschritt der Technik angepasst werden konnte. Die gesamten Baukosten betragen rund 4,8 Milliarden Franken – eine hohe, aber langfristig sichere und attraktive Investition, die sich rechnet bei einer voraussichtlichen Lebensdauer der Anlage von 60 Jahren.



Foto: Archiv KKL

Der Bau des KKL dauerte rund zehn Jahre.

Von 1998 bis 2003 wurde der Betrieb weiter Schritt für Schritt optimiert. Die Nettoleistung des Kraftwerks stieg auf 1165 MW. Im Zuge der weiteren kontinuierlichen Erneuerungen und Modernisierungen erfolgte auch der Ersatz grosser Komponenten wie Niederdruckturbinen und Blocktransformator. Dank gezielter Verbesserungen des Wirkungsgrades stieg die Nettoleistung bis 2010 auf 1245 MW. Für alle Optimierungen wurden gegenüber der zuständigen Aufsichtsbehörde, dem Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), umfassende Sicherheitsnachweise erbracht.

Seit der Betriebsaufnahme hat das KKL in die Sicherheit und Effizienz der Anlage bereits gegen 700 Millionen Franken investiert. Damit bleibt das Werk weiterhin auf dem Stand der Technik.



Foto: Palma Fiacco

Dank konstanter Wartung und Erneuerung ist das KKL eine moderne Anlage.

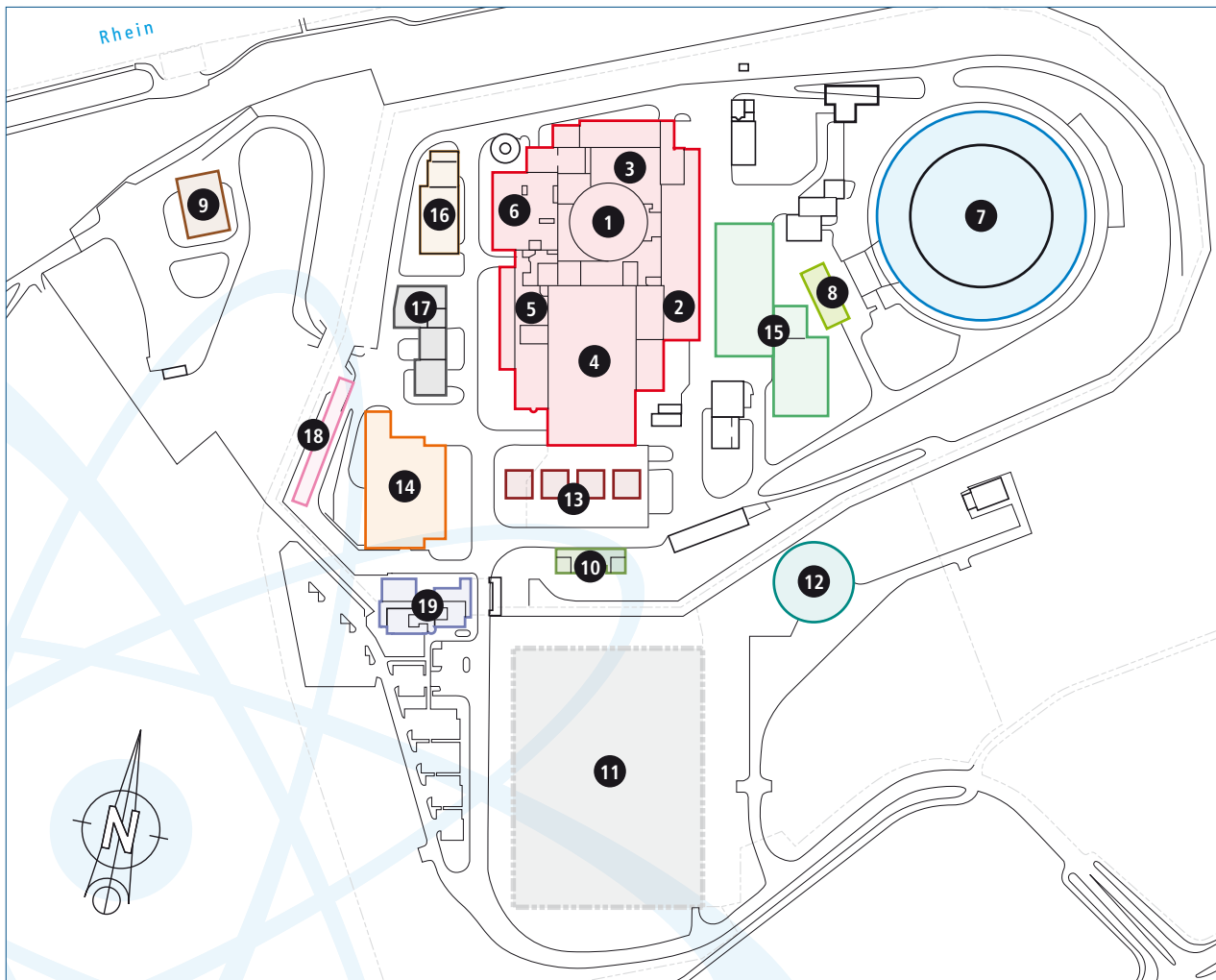
Das KKL auf einen Blick

Das KKL befindet sich auf Leibstadter Boden am Schweizer Ufer des Hochrheins, unweit der Aare-Mündung bei Koblenz (Schweiz) und Waldshut (Deutschland). Das gesamte Gelände des Kraftwerks einschliesslich der Parkplätze umfasst heute 24 Hektaren. Um beträchtliche 15 Prozent des Schweizer Strombedarfs zu erzeugen, braucht das KKL damit im Vergleich zu andern Stromerzeugungssystemen sehr wenig Land.

Alle Anlagenteile sind in einem überwachten und eingezäunten Bereich von zwölf Hektaren Grösse zusammengefasst. Rot gekennzeichnet sind die wichtigsten Gebäude: Brennelement-Lagergebäude, Reaktorgebäude und Maschinenhaus. Westlich davon liegen die

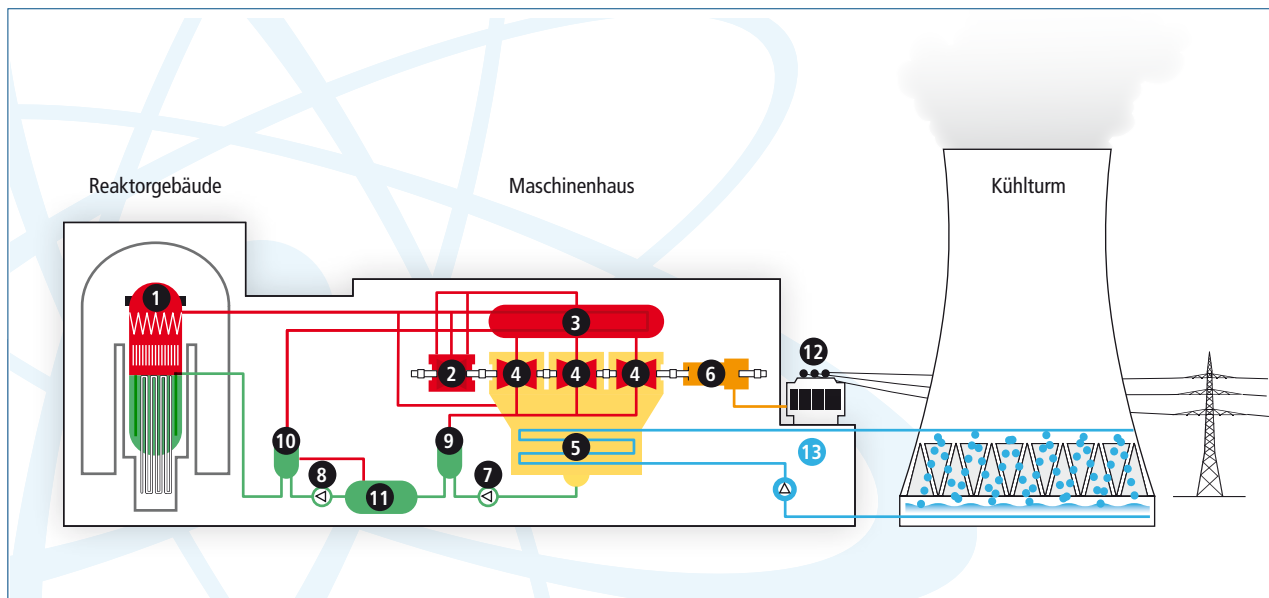
Nebengebäude wie Bürogebäude, Werkstätten und Lager, Betriebsgebäude und das Aufbereitungsgebäude, in dem Betriebsabfälle konditioniert und in Fässer abgefüllt werden.

Östlich davon befinden sich überwiegend weitere Lagerhallen, die Hauptkühlwasseranlage mit dem Pumpenhaus und der Kühlturm. Damit diese Kraftwerksbauten optisch nicht allzu dominant wirken, wurden sie acht Meter und der 144 Meter hohe Kühlturm sogar 15 Meter unter das Geländeniveau abgesenkt. Zentrale Teile der Anlage sind äusserst robust gebaut und teilweise unterirdisch angelegt. Sie bieten ein Höchstmass an Sicherheit für Anlage und Umwelt.



- | | | |
|-----------------------------|---|--------------------------|
| 1 Reaktorgebäude | 7 Kühlturm | 13 Blocktransformator |
| 2 Werkstatt | 8 Hauptkühlwasserpumpenhaus | 14 Werkstatt, Lager |
| 3 Brennelement-Lagergebäude | 9 Nebenkühlwasseranlage | 15 Lagerhallen |
| 4 Maschinenhaus | 10 50-kV-Schaltanlage | 16 Fasslager |
| 5 Betriebsgebäude | 11 380-kV-Schaltanlage | 17 Mock-up-Gebäude |
| 6 Aufbereitungsgebäude | 12 Ausbildungs- und Informationszentrum | 18 Infrastruktur-Gebäude |

Die Kraftwerksanlage im Überblick.



- | | |
|---------------------------------------|-------------------------|
| 1 Reaktor | 8 Speisewasserpumpe |
| 2 Hochdruckturbine | 9 Niederdruck-Vorwärmer |
| 3 Wasserabscheider-Zwischenüberhitzer | 10 Hochdruck-Vorwärmer |
| 4 Niederdruckturbine | 11 Speisewasserbehälter |
| 5 Kondensator | 12 Blocktransformator |
| 6 Generator | 13 Hauptkühlwasser |
| 7 Kondensatpumpe | ⊙ Pumpen |

Beim Siedewasserreaktor wird der im Reaktor erzeugte Dampf direkt auf die Turbinen geleitet und im Kondensator zu Wasser umgewandelt. Danach wird das Wasser mit Pumpen wieder in den Reaktor befördert. Das ist der primäre geschlossene Wasser-Dampf-Kreislauf. Dieser ist vollständig getrennt von der Kühlung des Kondensators über den Kühlturm.

So funktioniert das KKL

Im Kernkraftwerk Leibstadt wird die seit Jahrzehnten bewährte Technologie der sogenannten Leichtwasserreaktoren genutzt. Die meisten der rund 440 weltweit in Betrieb stehenden Kernkraftwerke funktionieren nach dieser grundsätzlichen Technik, aus der hauptsächlich zwei Typen hervorgegangen sind, die Druckwasser- und Siedewasserreaktoren. «Leichtwasser» bezeichnet dabei das im Reaktor für Kühlung und Moderation verwendete normale Wasser (H_2O). Im Gegensatz dazu steht das in nur wenigen andern Reaktortypen eingesetzte «Schwerwasser» (D_2O). Im KKL ist ein Siedewasserreaktor eingesetzt.

Bei der Spaltung von Uranatomkernen im Reaktor wird Energie freigesetzt. Das Wasser im Reaktor erhitzt sich, Dampf entsteht und wird über vier Dampfleitungen zur Hochdruckturbine und anschliessend zu den drei Niederdruckturbinen geleitet. Der Dampf treibt die Turbinen an, die wiederum über eine starre Kupplung den Generator drehen. So wird thermische in mechanische Energie und darauf im Generator in elektrische Energie

umgewandelt. Diese fliesst über den Blocktransformator ins Hochspannungsnetz. Der Dampf wird nach Passieren der Turbinen im Kondensator gekühlt. Er kondensiert wieder zu Wasser, das mithilfe von Pumpen zurück in den Reaktor befördert wird. Dieser primäre Wasserkreislauf ist vollständig in sich geschlossen. Der Turbinen-Kondensator wird durch Kühlwasser aus dem Kühlturm gekühlt.

Das Kernkraftwerk wird vom Commandoraum aus überwacht und gesteuert. Hier sind rund um die Uhr langjährig ausgebildete Operateure mit der Aufsicht über die Anlage betraut. Sie «fahren» den Reaktor, die Turbinen und den Generator und prüfen regelmässig die Funktionen sämtlicher Anlagekomponenten und -systeme. Die Operateure werden vom ENSI geprüft und müssen alle zwei Jahre ihre Zulassung erneuern. Dazu trainieren sie am betriebseigenen Simulator den Normalbetrieb und mögliche Störfallszenarien in einer vorgeschriebenen Anzahl von Stunden.

Der nukleare Teil des KKL

■ Dampferzeugungssystem

Der Reaktor ist das Herz eines jeden Kernkraftwerks. In Leibstadt ist es ein Siedewasserreaktor vom Typ BWR-6 der amerikanischen Firma General Electric, der als Dampferzeugungssystem dient. Charakteristisch für diese Bauweise sind externe Umwälzpumpen. Im Vergleich zur Gesamtanlage sind die Abmessungen des Reaktors verhältnismässig klein. Das den Reaktor umgebende Druckgefäss misst sechs Meter im Durchmesser und 22 m in der Höhe. Es besteht aus 15 cm dickem Stahl und schliesst die Brennelemente, den Wasserabscheider, den Dampftrockner und die Steuerstäbe ein.

Der Reaktorkern besteht aus 648 Brennelementen mit je 96 Brennstäben in 10 x 10-Anordnung. Die Brennstäbe sind mit angereichertem Urandioxid in Form von Pellets gefüllt. Die Kernauslegung ermöglicht bei einer mittleren Leistungsdichte von $62,7 \text{ kW/dm}^3$ eine thermische Reaktorleistung von 3600 MW.

Im Betrieb steht das Reaktordruckgefäss unter einem Druck von 73,1 bar. Der Siedepunkt des Wassers steigt dadurch auf 286°C . Beim Durchfließen des heissen Reaktorkerns nimmt das Wasser Wärme auf und steigt als Dampf-Wasser-Gemisch aus dem Kern auf. Der Wasserabscheider trennt das Wasser vom Dampf. Das abgetrennte Wasser wird zwischen Druckgefäss und Reak-

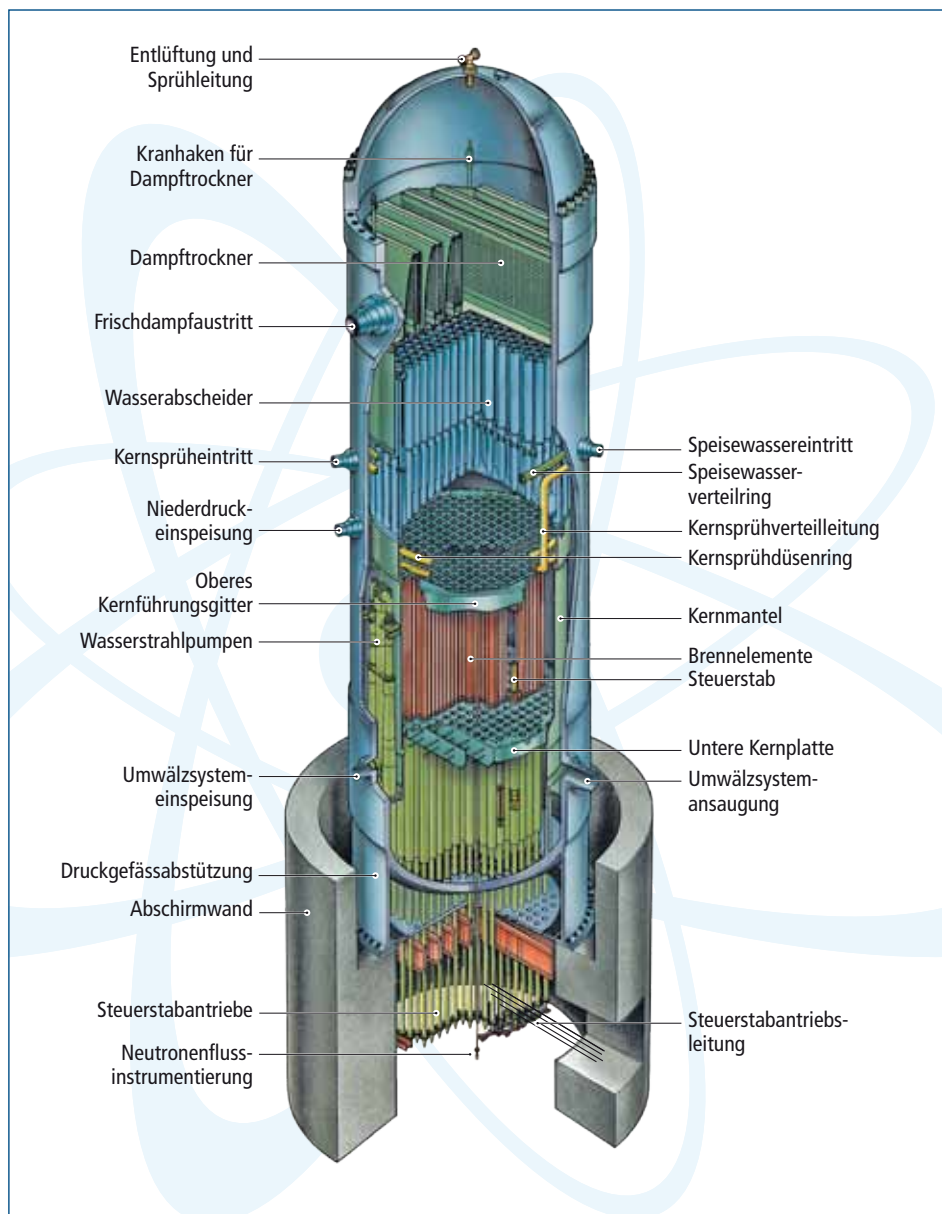




Foto: Daniel Schläfli

Bei Revisionsarbeiten macht das aufblasbare Krokodil den Wasserspiegel des kristallklaren Reaktorwassers gut sichtbar – eine einfache und wirksame Sicherheitsmassnahme.

torkern in das Umwälzsystem zurückgeführt und wieder zurück in den Kern gepumpt. Der aus dem Wasserabscheider austretende Dampf wird im Dampftrockner getrocknet und über die Frischdampfleitungen den Turbinen zugeführt.

Dieser Dampf ist leicht radioaktiv. Deshalb ist der Turbinenbereich während des Betriebs nicht zugänglich. Nach Abschalten des Reaktors baut sich die Strahlung jedoch innerhalb weniger Minuten ab.

Kernspaltung als Wärmequelle

Durch die Spaltung von Atomkernen wird im Reaktor Energie erzeugt. Trifft ein Neutron auf den Kern des Uran-235, so zerfällt dieser unter Abgabe von Wärme und Radioaktivität in zwei oder mehrere Teile. Dabei werden auch zwei bis drei Neutronen aus dem Atomkern geschleudert, die weitere Spaltungen auslösen können. Folgt jeder Kernspaltung eine neue, so spricht man von einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion. Das Wasser im Reaktor funktioniert auch als sogenannter Moderator: Es bremst die bei der Kernspaltung freigesetzten schnellen Neutronen von 20 000 km/s (in 2 s um die Erde) auf 3 km/s ab. Nur verlangsamte (thermische) Neutronen können weitere Kernspaltungen auslösen.

■ Reaktorregelung

Die Reaktorleistung lässt sich durch Veränderung der Wasserumwälzmenge und das Ein- und Ausfahren der 149 Steuerstäbe regeln. Sie werden von unten hydraulisch in den Reaktorkern eingefahren und können nach einem festgelegten Fahrprogramm einzeln oder gruppenweise bewegt werden. Das Borcarbid in den Steuerstäben bindet thermische Neutronen. Je weiter die Stäbe in den Reaktorkern einfahren, umso mehr Neutronen werden absorbiert und umso weniger Kernspaltungen ausgelöst. Die Leistung sinkt. Zieht man hingegen die Steuerstäbe aus dem Reaktorkern, können mehr Neutronen Spaltungen auslösen und die Leistung steigt.

Die zwei aussenliegenden Umwälzpumpen treiben über die 20 Strahlpumpen im Inneren das Wasser durch den Reaktorkern. Bis zu 11 m³ Wasser werden so pro Sekunde umgewälzt. Bei hoher Umwälzung entstehen weniger Dampfblasen, die zudem rascher aus dem Reaktorkern ausgetragen werden. Moderation und Leistung steigen mit. Umgekehrt sinkt die Leistung, wenn sich bei geringer Umwälzung vermehrt Blasen bilden, in denen keine Moderation stattfinden kann, da Dampf die Neutronen nicht abbremst.

Ein dreikanaliger elektronischer Druckregler beeinflusst die Stellung der Turbineneinlassventile und sorgt für konstanten Reaktordruck. Sollte der Reaktor beim Anfahren der Turbine und Abstellen der Anlage mehr Dampf produzieren, als die Turbine aufzunehmen vermag, regelt ein Bypass-System den Reaktordruck. Es drosselt den Frischdampf auf die Turbine und leitet ihn in

Zur Prävention gegen Spannungsrisskorrosion am Reaktordruckgefäß wird seit 2008 Wasserstoff in Verbindung mit dem Edelmetall Platin ins Reaktorwasser eingespeist. Vergleichbar mit einer Schutzimpfung trägt dies dazu bei, die Lebensdauer des Reaktordruckgefäßes zu verlängern. Dadurch kann die gesamte Anlage über mindestens 60 Jahre sicher in Betrieb bleiben.

den Kondensator. Dieser Bypass, der für 70 % der normalen Frischdampfmenge ausgelegt ist, vermag kurzfristig 110 % aufzunehmen. So kann die Turbine bei Bedarf augenblicklich und ohne Schnellabschaltung des Reaktors entlastet werden (beispielsweise bei einem Netzausfall). Da der Reaktor in Betrieb bleibt, kann die Anlage danach schnell wieder ans Netz geschaltet werden.

■ Schnellabschaltung

Ein automatisches System für die Schnellabschaltung des Reaktors schützt die Anlage vor unzulässiger Beanspruchung. Es vermindert die Auswirkungen von Betriebsstörungen auf ein ungefährliches Mass und hilft, Schäden an Komponenten – wie beispielsweise Brennstoff-Hüllrohren – zu vermeiden. Zahllose Instrumente überwachen die Anlage: Bei Erreichen vorgegebener Grenzwerte leitet das System ein schnelles, vollautomatisches Abschalten des Reaktors (Scram) ein. Dabei werden die Regelstäbe innert zwei Sekunden in den Reaktorkern eingeschossen, was die Kernspaltung sofort unterbricht. Jeder Stabantrieb hat dazu einen Stickstoff-Druckspeicher als Energiereserve. Nach dem Scram werden die Turbinen abgeschaltet und der Generator vom Netz getrennt. Der Reaktor wird weiter gekühlt und die Nachzerfallwärme abgeführt, welche die Spaltprodukte in den Brennstäben erzeugen. Er befindet sich so in einem sicheren Zustand.

Das Reaktorschutzsystem umfasst eine eigene Spannungsversorgung, die Messumformer und die Auslöselogik für das Schnelleinfahren der Steuerstäbe. Vier voneinander unabhängige Auslösekanäle stellen sicher, dass der Reaktor stets, selbst bei Stromausfall, sicher abgeschaltet werden kann. Ein Scram kann auch von Hand ausgelöst werden.

Beim Blick in den geöffneten Reaktor sind die glänzenden, neuen Brennelemente gut sichtbar.

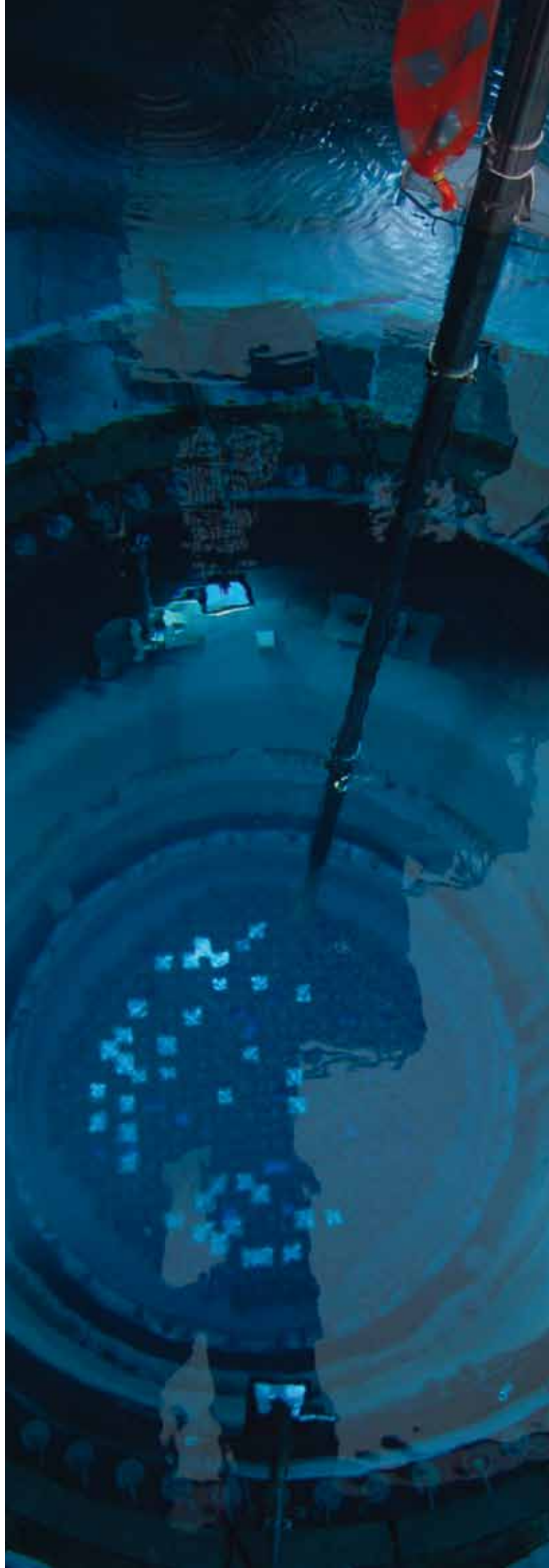




Foto: Palma Fiacco

Mit dem Spezialkran wird bei der Jahreshauptrevision der Deckel des Reaktordruckgefäßes abgehoben.

■ Brennelemente

Im Reaktor verwendet man den Brennstoff Uran in Form von Urandioxid (UO_2). Es wird in Brennstofftabletten, sogenannte Pellets, gepresst, gebrannt und in lange, dünne Hüllrohre aus Zirkaloy abgefüllt. Diese Zirkoniumlegierung ist auch bei hohen Temperaturen sehr formstabil und ermöglicht einen hohen Neutronenfluss. Rund hundert solcher Brennstäbe bilden als Bündel ein Brennelement. Der gesamte Reaktorkern wiederum enthält 648 Brennelemente. Jedes davon ist rund 4,5 m lang und 300 kg schwer.

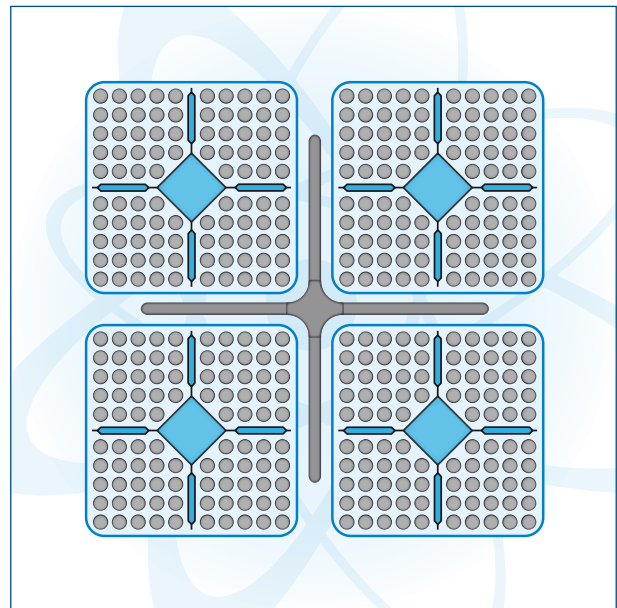
Neue Brennelemente werden in konventionellen Transportkisten vom Herstellerwerk ins KKL geliefert.

Da die Brennelemente vor dem Einsatz im Reaktor nicht strahlen, braucht es dazu keine besonderen Strahlenschutzmassnahmen. Im KKL werden die Brennelemente auf allfällige Transportschäden geprüft.

Alljährlich im Sommer, wenn die Stromnachfrage am tiefsten ist, findet der Brennelementwechsel statt. Dazu wird der Reaktor abgeschaltet. Im Rahmen der drei bis fünf Wochen dauernden Jahreshauptrevision sind etwa

ein Fünftel der 648 Brennelemente durch neue zu ersetzen. Die andern werden für einen optimalen und gleichmässigen Abbrand umplatziert. Gleichzeitig wird eine Vielzahl von Instandsetzungsarbeiten, Inspektionen und Erneuerungen an der gesamten Anlage durchgeführt.

Vor dem Brennelementwechsel demontiert man den Deckel des Reaktor Druckgefässes. Dampftrockner und Wasserabscheider werden ausgebaut und unter Wasser gelagert. Dann ziehen Teleskopgreifer die abgebrannten Brennelemente aus dem Reaktor und transferieren sie, stets unter Wasser, ins Brennelementbecken. Dort lagern die Brennelemente über mehrere Jahre. Wenn ihre Strahlung und die Nachzerfallswärme genügend abgeklungen sind, werden sie in speziellen Behältern ins nahegelegene Zwischenlager nach Würenlingen transportiert. Bis zum zehnjährigen Moratorium, das Mitte 2006 in Kraft trat, wurden sie auch der Wiederaufarbeitung zugeführt.



Vier Brennelemente werden jeweils von einem Steuerstab zusammengefasst. Im Querschnitt sind die rhombenförmigen Wasserkanäle im Brennelement zu sehen. Wasser fließt auch zwischen den Brennstäben und allen Brennelementen im Reaktorkern.



Foto: Daniel Schläfli

Mit dem Greifarm lassen sich Brennelemente im Lagerbecken bewegen.



■ Hilfsanlagen

Der nukleare Teil der Anlage wird durch verschiedene Hilfseinrichtungen ergänzt. Im Reaktor-Hilfsgebäude sind alle Einrichtungen untergebracht, die zur Aufrechterhaltung des Kühlbetriebs bei abgeschaltetem Reaktor nötig sind. Dazu gehören auch drei voneinander unabhängige Notsteuerstellen.

Im Brennelement-Lagergebäude befindet sich das Abklingbecken, in dem die verbrauchten Brennelemente in Wasser gelagert werden. Eine spezielle Anlage sorgt für die Reinigung und Kühlung des Wassers. Im selben Becken lagern auch die verbrauchten Steuerstäbe. Nach der Abklingzeit werden sie unter Wasser mechanisch zerlegt, in endlagerfähige Gebinde verpackt und wie die Brennelemente ins Zwischenlager in Würenlingen verbracht.

Ein spezielles Transportsystem für Brennelemente verbindet das Brennelement-Becken und das Containment. Mithilfe dieses Transferrohrs werden die Brennelemente aus dem Reaktorkern ins Abklingbecken und neue Brennelemente in den Reaktor transportiert.

Im Aufbereitungsgebäude befindet sich die Anlage zur Aufarbeitung und Konditionierung von festen und flüssigen radioaktiven Stoffen. Hier werden schwach- und mittelaktive Abfälle aus dem Betrieb für die fachgerechte Entsorgung vorbereitet und in Fässern gelagert. Dazu stehen neben der Verpressungs- auch eine Verfestigungs- und Wasserreinigungsanlage zur Verfügung. Die Abwasserstrasse filtert strahlenbelastetes Wasser mit geringem Feststoffgehalt, damit es nach der Laborprüfung in der Anlage wieder verwendet werden kann. Im Aufbereitungsgebäude befinden sich auch die Umkleidezone und die Zugangskontrolle zum Reaktorbereich sowie die Zu- und Abluftanlagen für den gesamten Kontrollbereich.

Arbeitsmaterial, Geräte und kleinere Komponenten werden in der Dekontaminationsanlage von radioaktiven Partikeln gereinigt, sodass die Personendosis bei Instandhaltungsarbeiten klein bleibt und das Material bei Bedarf aus der kontrollierten Zone gebracht werden kann. Eine Aktivwerkstatt dient zur Pflege oder Reparatur leicht radioaktiver Teile. Im Mock-up-Gebäude wird die Arbeit an Anlagekomponenten vorbereitet und trainiert. So lässt sich die Aufenthaltszeit in der sogenannten kontrollierten Zone und damit die Strahlenbelastung bei der effektiven Arbeit sehr gering halten.

Eine der drei Speisewasserpumpen, von denen jeweils zwei 50 Prozent des Speisewassers fördern.

Eine Vollentsalzungsanlage stellt sogenanntes Deionat her, Reinstwasser für das Zusatzwasser der Reaktor- und Turbinenanlage sowie deren Hilfssysteme, aber auch für die Kleiderwaschanlage. Die Reaktorwasser-Reinigungsanlage filtert und entsalzt laufend das Reinstwasser im Primärkreislauf und entfernt so aktivierte Korrosionsprodukte und Abriebpartikel. Diese würden sich sonst auf den Brennelementen ablagern und – einem verkalkten Wasserkocher gleich – den Wärmeübergang zum Wasser verschlechtern.

Auch die Wäscherei ist auf Kernkraftwerksbetrieb spezialisiert. Im Normalbetrieb bewältigt sie täglich an die 200 kg Schutzbekleidung und Schuhe der Mitarbeiter in der kontrollierten Zone, in der Jahreshauptrevision sind es bis zu 2,7 t. Mit dem Kleiderwechsel wird sichergestellt, dass keine radioaktiven Stoffe aus der kontrollierten Zone herausgetragen werden. Das Waschwasser wird gereinigt, im Labor geprüft und erst dann für die Rückführung in den Rhein freigegeben. Kontaminierte Rückstände werden als schwachaktiver Abfall fachgerecht entsorgt.

Foto: Ivo Stalder



Radioaktiv kontaminierte Gegenstände werden mit entsprechender Schutzbekleidung gereinigt.

Näharbeiten an Zonenoveralls werden betriebsintern erledigt.

Foto: Palma Fiacco



Foto: Palma Fiacco



So viel Zonenwäsche erfordert starke Waschmaschinen.





ndo-

Generator

Block-
transformator

Freiluft-
schaltanlage

Der konventionelle Teil

Der Hauptwärmekreislauf

Der Frischdampf tritt mit einer Temperatur von 286 °C aus dem Reaktor aus. Vier Frischdampfleitungen führen an die 2000 kg Dampf pro Sekunde vom Reaktor zur Hochdruckturbine. Vor der Turbine befinden sich beidseitig je zwei kombinierte Abschluss- und Regelventile.

Der Dampf gelangt mit 64 bar Druck in die Hochdruckturbine, wo er auf 11,6 bar expandiert und auf 186°C abkühlt. Darauf strömt er in die zwei Wasserabscheider-Zwischenüberhitzer. Dort wird er getrocknet und wieder auf eine Temperatur von 263°C gebracht. Dazu verwendet man 8,5% des Frischdampfs aus dem Reaktor. Der überhitzte Dampf wird dann auf die drei Niederdruckturbinen geleitet, entspannt dort auf 0,1 bis 0,2 bar und schlägt anschliessend im Kondensator nieder. Sowohl das in den Wasserabscheidern ausgeschiedene Wasser, als auch das in den Zwischenüberhitzern ausgeschiedene Kondensat werden in das Speisewasser eingeleitet, um die noch enthaltene Restwärme auszunutzen.

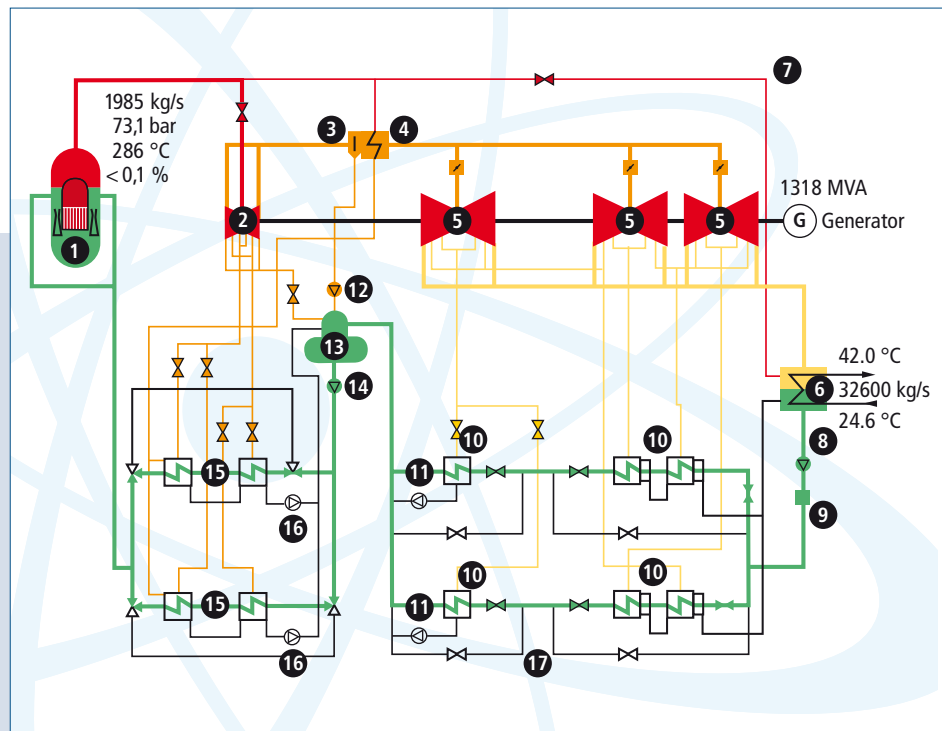
Der Teilbündelkondensator liegt quer zur Turbinenachse. Er wird vom Hauptkühlwasser durchströmt und weist vier voneinander getrennte Wasserkammern auf.

Diese Bauweise ermöglicht es, eventuell auftretende Leckagen zu lokalisieren, den entsprechenden Kondensatorteil zu isolieren und die Turbinen mit reduzierter Leistung weiterzubetreiben.

Der Druck von 0,1–0,2 bar im Kondensator liegt 0,8–0,9 bar unter dem Umgebungsdruck. Dadurch verbessert sich der Wirkungsgrad der Anlage. Im Falle einer Kondensatorleckage kann zudem keine Radioaktivität aus dem Dampf des Primärkreislaufs in das Kühlwasser gelangen.

Zwei Hauptkondensat-Pumpen – eine dritte steht als Reserve bereit – fördern das Kondensat durch eine Reinigungsanlage. Sie entfernt Verunreinigungen wie Chloride und Korrosionsrückstände und sorgt so für die erforderliche hohe Reinheit des Kondensates. Dann wird dieses durch zwei Niederdruckvorwärmer in den Speisewasserbehälter weitergepumpt. Diese dreistufigen Niederdruckvorwärmer arbeiten mit Heizdampf aus der Niederdruckturbine. Das anfallende Heizkondensat der ersten beiden Vorwärmstufen wird in den Kondensator

- 1 Siedewasserreaktor
- 2 Hochdruckturbine
- 3 Wasserabscheider
- 4 Zwischenüberhitzer
- 5 Niederdruckturbine
- 6 Kondensator
- 7 Turbinen-Bypassleitungen
- 8 Hauptkondensatpumpen
- 9 Kondensatreinigung
- 10 Niederdruckvorwärmer 1–3
- 11 Niederdruckvorwärmerspume
- 12 Wasserabscheiderpumpe
- 13 Speisewasserbehälter
- 14 Speisewasserpumpe
- 15 Hochdruckvorwärmer 5+6
- 16 Hochdruckvorwärmerspume
- 17 Vorwärmer-Bypassleitung



Das Wärmeschaltbild zeigt den Weg des Frischdampfs über den Kondensator und zurück in den Reaktor. Von der Turbine wird Dampf entnommen, um die Speisewasser-Vorwärmer zu heizen.

zurückgeführt, jenes aus der dritten Stufe in den Speisewasserbehälter gepumpt. Der Speisewasserbehälter dient als Mischvorwärmer und wird mit Hochdruck-Abdampf beheizt sowie mit der Restwärme der Kondensate von Wasserabscheidern und Hochdruckvorwärmern. Dann fördern Speisewasserpumpen das Speisewasser durch zwei Hochdruckvorwärmer in das Reaktorgefäß. Der Heizdampf für diese zweistufigen Vorwärmer kommt aus der Hochdruckturbine; das Heizkondensat geht in den Speisewasserbehälter. Bei Normalbetrieb laufen zwei Speisepumpen, die je 50 % fördern, während die dritte in Reserve bleibt.

Die nicht kondensierbaren Gase, die sich während des Betriebes im Reaktor bilden und im Kondensator ansammeln, werden mit Dampfstrahlsaugern in die Abgasreinigungsanlage geführt.

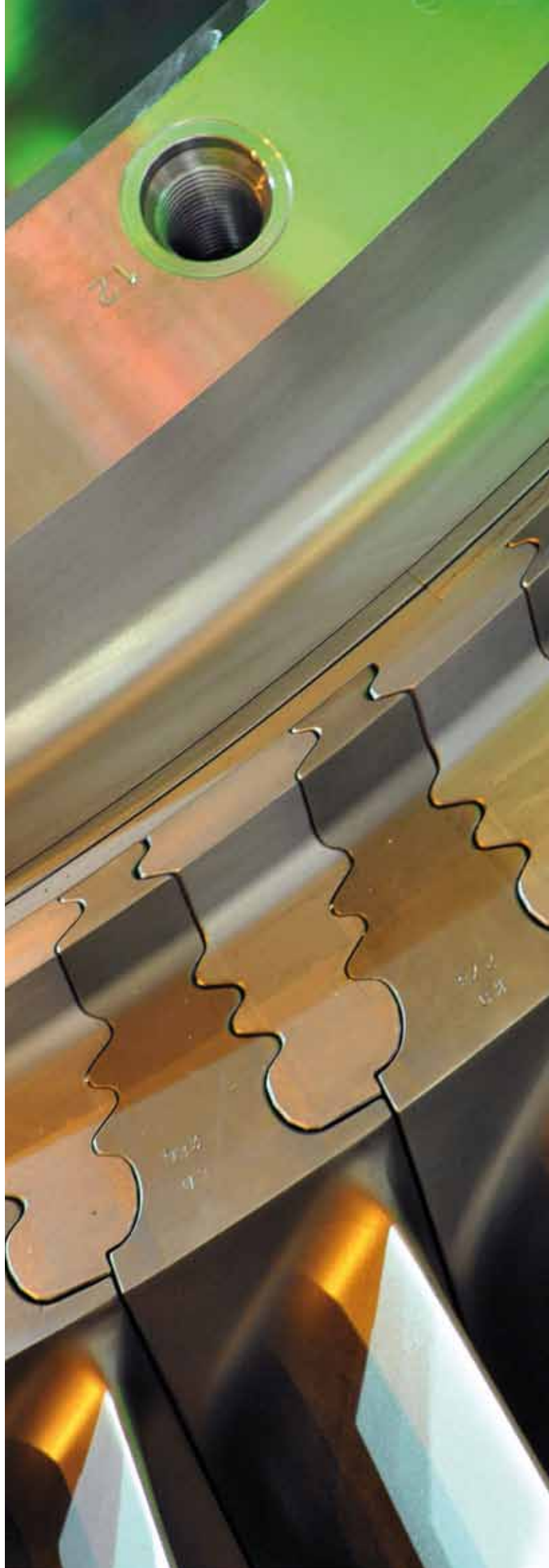
■ Turbinengruppe

Die Turbinengruppe besteht aus einer Hochdruckturbine und drei Niederdruckturbinen des französischen Unternehmens Alstom. Die Hochdruckturbine erzeugt 40 % der Gesamtleistung des KKL, die drei Niederdruckturbinen liefern zusammen weitere 60 % der Gesamtleistung.

Die Turbinengruppe ist doppelflutig ausgelegt. Der Hochdruckteil weist neun Stufen auf, jede Niederdruckturbine je sechs Stufen. Das Axiallager zwischen der Hochdruck- und der ersten Niederdruckturbine fixiert die 33 m lange Turbinenwelle in horizontaler Richtung. Zwischen den Gehäusen der Niederdruckrotoren befindet sich jeweils ein Radiallager, auf dem die Welle läuft. Insgesamt sieben Radiallager stützen die Welle, die als gesamte Einheit einschliesslich des Generatorrotors 52 m lang ist.

Unter Wärme dehnt sich der Turbinenrotor um max. 38 mm aus. Inaktiver Sperrdampf aus separaten Dampfumformern dichtet den Rotor gegen das Turbinengehäuse ab. Dieses Sperrdampfsystem verhindert, dass radioaktiver Dampf an Rotordichtungen oder Ventilspindeln ins Maschinenhaus austreten kann.

Die Turbine muss höchste Präzisions- und Qualitätsanforderungen erfüllen.



An verschiedenen Stellen der Turbinengehäuse wird Dampf zur Heizung der Speisewasser-Vorwärmer abgezapft. Ein Bypass-System erlaubt, die gesamte Dampfmenge kurzzeitig vom Reaktor direkt in den Kondensator zu leiten.

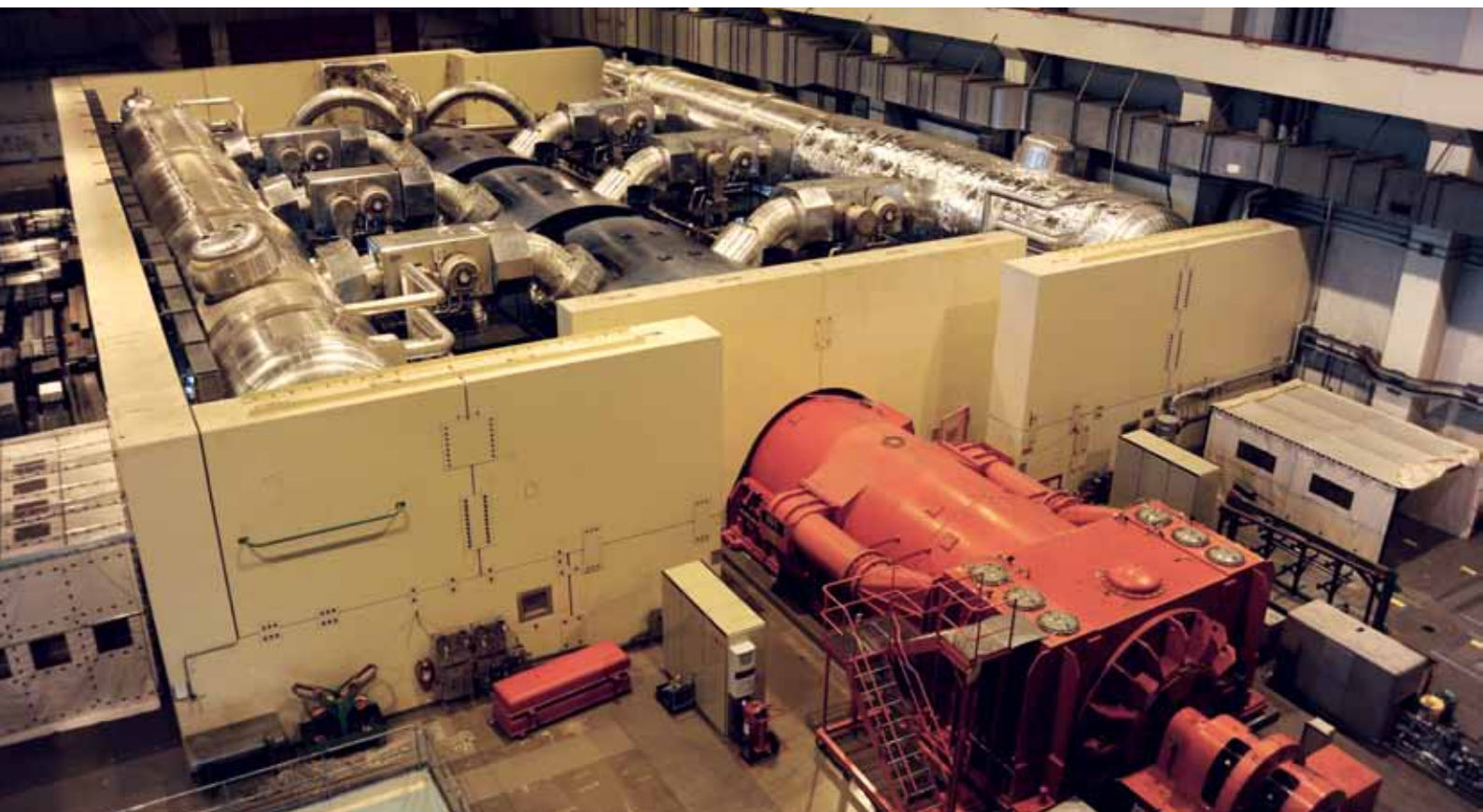
■ Generator

Der zweipolige Generator ist starr an den Niederdruckteil der Turbine gekoppelt. Die mechanische Leistung der KKL-Turbinen (1,7 Mio. PS) ist gigantisch. Sie wird durch Drehung der Turbinenwelle auf die Generatorwelle übertragen, welche mit 50 Umdrehungen pro Sekunde rotiert. In dem vier Meter hohen und zehn Meter langen

Generatorgehäuse verbirgt sich ein acht Meter langer Stator von 520 t Gewicht. Der Rotor wiegt zusätzliche 95 t. Bei einer Klemmenspannung von 27 kV erbringt der Generator eine Nennscheinleistung von 1318 MVA.

Während des Betriebs muss der Generator gekühlt werden. Dazu wird eine für Grossgeneratoren übliche gemischte Kühlung angewandt: Rotorwicklung, Luftspalt und Statorblechpaket werden mit Wasserstoffgas gekühlt und Statorwicklung sowie Ableitungen mit Wasser. Zur Erregung und Regelung des Generators dient ein statisches System mit Thyristoren genannten Halbleiterbauelementen. Die Erregerleistung wird über einen Anpasstransformator direkt an den Generatorableitungen abgenommen. Drei luftgekühlte Stromleitungen transportieren den Strom vom Generator zum Blocktransformator.

Foto: Palma Fiacco



Die Hoch- und Niederdruckturbinen liegen mit Generator auf einer Achse, rechts und links die Wasserabscheider-Zwischenüberhitzer.



Foto: Archiv KKL

Bei ausgebautem Rotor zeigt der Blick in den Generator den Wicklungskopf mit den Anschlüssen für die Wasserkühlung.



Foto: Archiv KKL

Nach der Wartung wird das Schaufelträgergehäuse wieder auf die Niederdruckturbine montiert.



Foto: Peter Graf

Der ausgebaut Rotor einer Niederdruckturbine zeigt deutliche Korrosionspuren vom Gebrauch.

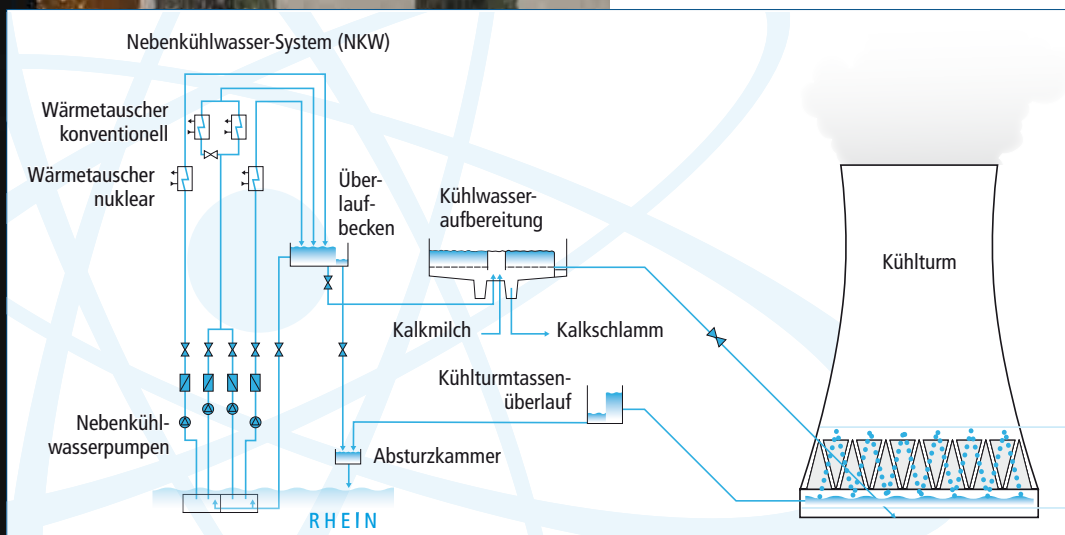
Die Kühlsysteme

■ Hauptkühlwassersystem

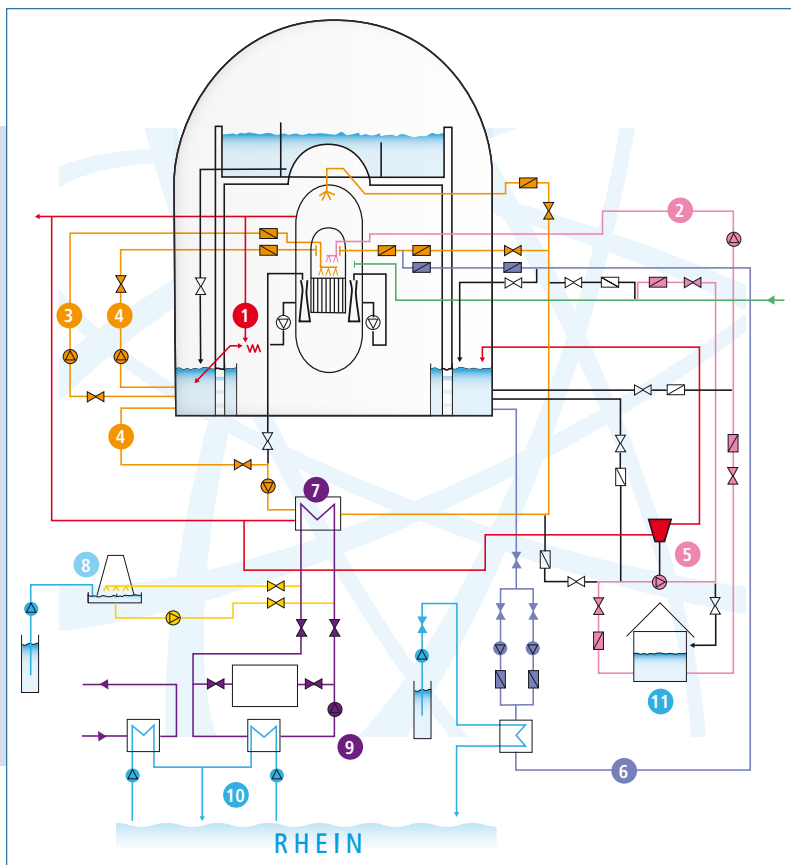
Der 144 m hohe Kühlturm ist der auffälligste Teil des sekundären Wasserkreislaufes, welcher der Kühlung des Kondensators dient. Vier Hauptkühlwasserpumpen (vier Mal 25 % Leistungsanteil) saugen das Kühlwasser (33 m³/s) aus dem Kühlturmbecken an. Sie fördern es durch unterirdische Rohrleitungen zum Kondensator im Maschinenhaus, wo es sich auf gut 45 °C erwärmt. Von dort fließt das Wasser zurück in den Kühlturm. Es wird über ein fein verteiltes Kanalsystem auf die Rieselplatten verteilt und regnet ab. Der starke aufsteigende Luftstrom kühlt es dabei auf rund 30 °C ab. Er nimmt zudem einen Teil des Wassers auf und bildet eine Wolke aus reinem Wasserdunst über dem Turm. Form und Größe dieser Wolke sind von den jeweiligen Wetterbedingungen abhängig. Ein solcher Naturzug-Kühlturm kommt ohne Ventilatoren oder andere technische Mittel aus. Die Kühlleistung beträgt etwa 2350 MW.

Die Verdunstungsverluste im Kühlturm betragen im Mittel 720 kg/s. Dieses Wasser muss ersetzt werden. Dazu werden durchschnittlich 915 kg/s dem Rhein entnommen. Das Rheinwasser muss aufbereitet werden, damit es als Kühlwasser trotz Eindickung durch Verdunstung den Kondensator nicht verschmutzt. Überschüssiges Wasser (ca. 200 kg/s) wird unter Einhaltung der Gewässerschutzbedingungen in den Rhein zurückgeleitet. Bei der Aufbereitung des Rheinwassers werden die Schwebstoffe durch Zugabe von Flockungsmittel ausgeschieden. Darauf wird das Wasser durch Beimischen von Kalkmilch langsam entkarbonisiert. Der ausgeschiedene Kalkschlamm – nach Trocknung etwa 30 t pro Tag – wird zurzeit von lokalen Bauern verwendet und auf Felder des Südschwarzwaldes zur Verbesserung der Bodenchemie ausgebracht.

Das Kühlwasser regnet als glitzernder Vorhang in die Kühlturmtasse ab.



Zur Kühlung der Zwischenkühlkreisläufe der Anlage und zur Ergänzung des verdunsteten Wassers im Kühlturm wird Rheinwasser verwendet. Dies sind insgesamt höchstens 4 m³ pro Sekunde. Zum Vergleich: Der Rhein führt rund 1000 m³ Wasser pro Sekunde.



- 1 Automatisches Druckabbausystem (ADS)
- 2 Hochdruckkernsprühsystem (HPCS)
- 3 Niederdruckkernsprühsystem (LPCS)
- 4 Niederdruckflutsystem (LPCI)
- 5 Kernisolationskühlsystem (RCIC)
- 6 Notfallkühlsystem (SEHR)
- 7 Nachzerfallswärmeabfuhrsystem (RHR)
- 8 Notkühlwasser (ESW)
- 9 Zwischenkühlwasser (ZKW)
- 10 Nebenkühlwasser (NKW)
- 11 Kaltkondensatbehälter (KAKO)

Mehrfach redundante, d.h. zusätzlich einsetzbare Systeme stellen sicher, dass der Reaktorkern auch in Notsituationen gekühlt werden kann.

■ Nebenkühlwassersystem

Der weitere Bedarf an Kühlwasser für den Kraftwerkbetrieb wird mit dem Nebenkühlwassersystem gedeckt. Dieses versorgt über zwei getrennte Stränge die Zwischenkühler im Reaktor-Hilfsgebäude und im Maschinenhaus. Über die geschlossenen Zwischenkreisläufe wird u. a. die Wärme der Raumkühlung, der Generatorkühlung und diverser Pumpen, des Brennelementbeckens sowie die Nachwärme des Reaktors in abgestelltem Zustand abgeführt (Residual Heat Removal System RHR). Die Kühlleistung des Nebenkühlwassersystems beträgt 50 MW. Dafür verwendet man rund 2500 kg/s Rheinwasser.

Ein Teil des erwärmten Rücklaufs wird vom gemeinsamen Überlaufbecken als Zusatzwasser zur Kühlturmwasseraufbereitung geleitet. Der Rest fließt über die Absturzkammer in den Rhein zurück. Die Rückgabetemperatur darf 30°C nicht überschreiten.

■ Notkühlsysteme

Kann nicht auf Rheinwasser zugegriffen werden, beispielsweise weil kein Strom für die Pumpen verfügbar ist, steht die Notkühlwasserversorgung mit drei eigenen Notkühltürmen zur Verfügung. Sie übernimmt in Notsituationen die Funktion des Nebenkühlwassersystems und führt über das RHR-System die Nachwärme aus

dem Reaktor ab. Die Wasserleitungen zu den kühlenden Aggregaten sowie die elektrischen Steuerleitungen sind entsprechend sicher verlegt und geschützt. Das Wasser wird dem Grundwasser entnommen und mit Pumpen gefördert, deren Stromversorgung fünf voneinander unabhängige, schnellstartende Notstrom-Dieselmotoren sicherstellen.

Für den Fall eines Kühlmittelverlusts im Dampferzeugersystem stehen mehrere voneinander unabhängige Systeme bereit, die automatisch in Aktion treten, um den Reaktorkern mit Wasser zu versorgen und zu kühlen: das Hochdruck-Kernsprühsystem HPCS, das Niederdruck-Kernsprühsystem LPCS und das dreifach redundante Niederdruck-Kernflutsystem LPCI. Die Notkühlsysteme verfügen über eine unabhängige, erdbeben- und überflutungssichere Stromversorgung, Notkühltürme und Rückkühlung durch Grundwasser.

Als weiteres Notkühlsystem dient das SEHR-System (Special Emergency Heat Removal). Es besteht aus zwei redundanten Systemketten und geht im Anforderungsfall automatisch in Betrieb. Das SEHR-System gewährleistet, dass sich der Reaktor ohne Eingriff der Betriebsmannschaft während Stunden sicher kühlen lässt. Zum Schutz gegen Einwirken von aussen ist das SEHR-System unterirdisch angelegt.

Das Kühlwasser für praktisch alle Notkühlsysteme wird der Wasserkammer des Druckabbausystems entnommen.

Elektrische Anlagen

■ Blocktransformator

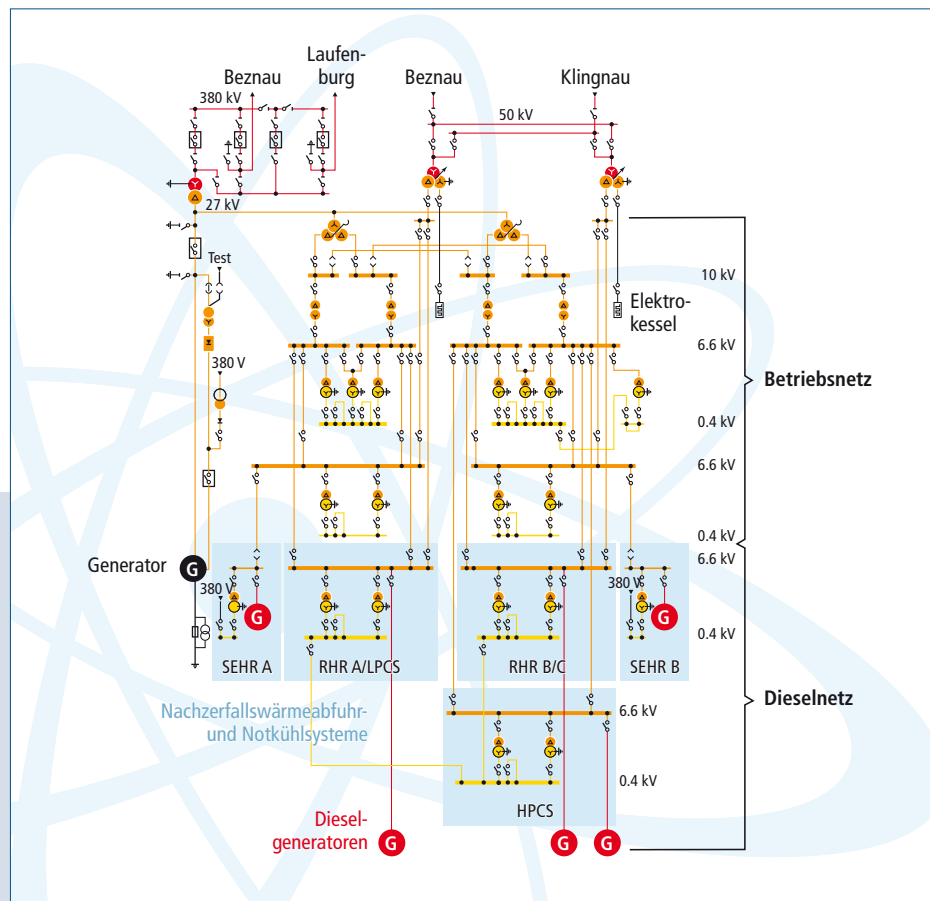
Der vom Generator erzeugte Strom wird über den Generatorschalter in den Blocktransformator von der niederländischen Firma SMIT geleitet. Jeder der drei einphasigen, rund 320 t schweren Transformatoren hat eine Nennleistung von 500 MVA und transformiert die Spannung von 27 auf 380 kV. Ein vierter Transformator dient als Reserve. Von den Transformatoren wird der Strom zur Freiluftschaltanlage geführt. Über diese Anlage ist das KKL durch je eine Freileitung mit der Schaltanlage der nahegelegenen europäischen Netzleitstelle Laufenburg, dem Herzstück der Schweizer Stromversorgung, sowie mit der Schaltanlage in Beznau an das 380 kV-Höchstspannungsnetz angeschlossen.

Hunderte von Instrumenten überwachen permanent den Anlagezustand.

■ Eigenbedarf

Rund 55 MW seiner elektrischen Leistung braucht das KKL im Betrieb für die eigene Energieversorgung – 35 MW alleine für die Pumpen in den Speisewasser-, Kondensat- und Kühlwassersystemen. Dieser Eigenbedarf wird mit zwei voneinander unabhängigen Systemen, sogenannten Divisionen, gedeckt. Jede wird über einen eigenen Dreiphasentransformator (27 kV auf 10 kV) angespeist.

Steht der Generator still, wird der Eigenbedarf durch Fremdeinspeisung aus dem 380 kV-Netz gedeckt. Sollte die 380 kV-Schaltanlage für Instandhaltungsarbeiten abgeschaltet sein oder Netzstörungen auftreten, stellen zwei voneinander unabhängige 50 kV-Leitungen mit ei-



Das Schema stellt die Eigenbedarfsversorgung des KKL und den Netzanschluss an das Hochspannungsnetz (380 kV) dar.

genen Transformatoren die Eigenversorgung sicher. Die eine Leitung führt direkt in die Schaltanlage des Wasserkraftwerks Klingnau, die andere ist an die bestehende 50 kV-Leitung Beznau-Klingnau angeschlossen. Dank dieser 50 kV-Einspeisungen kann auch bei Ausfall des 380 kV-Netzes die Turbinengruppe unbeschädigt abgestellt werden.

■ Notstromversorgung

Bei einem Ausfall der externen Stromversorgung gewährleisten voneinander unabhängige Notstromanlagen die Spannungsversorgung des Werkes. Drei grosse turbo-geladene V20-Zylinder-Dieselmotoren der deutschen Firma MTU erlauben jederzeit das sichere Abfahren und Nachkühlen des Reaktors. Jeder hat eine Dauerleistung von 4595 kW (6250 PS). Zusätzlich stehen zwei kleinere V12-Zylinder-Notstromdiesel im gebunkerten SEHR-System zur Verfügung. Diese haben je eine Leistung von 2200 kW (3000 PS).

Alle Notstrom-Dieselmotoren sind ständig vorge-wärmt und benötigen nur wenige Sekunden vom Start bis zur Vollast. Sie werden monatlich auf ihre volle Funktionstüchtigkeit getestet.

Wichtige Gleichstromverbraucher wie beispielsweise die Steuerelektronik, Messinstrumentierung, spezielle Pumpenantriebe, Schieber und die Notbeleuchtung müssen auch bei Netzausfall unterbrochlos weiter gespeist werden. Sie sind deshalb auch an fünf unabhängige 220 V-Batteriesysteme angeschlossen. Die leittechnischen Einrichtungen beziehen ihre Energie aus sieben getrennten 24 V-Batterieanlagen.

Foto: Ruth Schmid



Drei Transformatoren bilden den Blocktransformator, ein vierter steht links als Reserve bereit.

■ Notsteuerstellen

Alle für den Kraftwerksbetrieb notwendigen Systeme werden automatisch, wahlweise auch manuell, vom Hauptkommandoraum aus gesteuert. Falls dieser ausfallen sollte, können die im Reaktor-Hilfsgebäude befindlichen Notsteuerstellen benutzt werden. Das SEHR-Notstandssystem hat nochmals eigene Steuerstellen und läuft vollautomatisch und autonom.

Foto: Palma Fiacco



Der 20-Zylinder-Motor eines Notstrom-Dieselmotors.

Der Brennstoff des KKL



Foto: US NRC

Uran wird als gelbes oder auch schwarzes Pulver (U_3O_8) gehandelt.

■ Brennstoffbeschaffung

Der Brennstoff des KKL wird von der Axpo AG, welche auch die Geschäftsleitung der KKL AG inne hat, für das KKL eingekauft. Zurzeit stammt das Uran des KKL aus Russland, während die Brennelemente in Westeuropa gefertigt werden. Die Brennstoffversorgung wird auf Jahre hinaus vertraglich gesichert. KKL erwartet von Lieferanten und Unterauftragnehmern gleich grosse Anstrengungen bezüglich nuklearer Sicherheit wie von sich selber. So wird darauf geachtet, dass auch in der Brennstoffbeschaffung alle Partner unter behördlicher Aufsicht stehen. Ausserdem wird gefordert, dass die Produzenten eine fortschrittliche Umweltpolitik pflegen (ISO 14001 oder äquivalent), internationale Arbeitssicherheitsstandards einhalten (OHSAS 18001 oder äquivalent) sowie sich zu internationalen Menschenrechtsnormen (UN, ILO) verpflichten

■ Brennstoffverbrauch

Um Uran im KKL-Reaktor verwenden zu können, muss der Anteil von U-235 von 0,7 % auf durchschnittlich 4,25 % erhöht werden. Dieses sogenannte angereicherte Uran wird als Urandioxid (UO_2) in den Brennelementen eingesetzt. KKL verbraucht jährlich rund 128 Brennelemente, wovon jedes rund 205 kg des angereicherten Urandioxids enthält. Dieser Jahresverbrauch von insgesamt gut 26 t Urandioxid wird aus rund 190 t Natururan

Das Schwermetall Uran kommt in der Natur in drei Arten vor, sogenannten Isotopen. Sie unterscheiden sich durch die Anzahl Neutronen im Atomkern: Uran-234 (92 Protonen + 142 Neutronen = 234 Kernteilchen), Uran-235 (143 Neutronen). Natururan enthält nur Spuren von Uran-234 und rund 0,7 % Uran-235. Der grösste Teil besteht aus Uran-238 (rund 99,3 %). Lediglich Uran-235 ist leicht spaltbar.

gewonnen und entspricht 980 kg des spaltbaren U-235. Uran ist sehr schwer und energiedicht. Die 26 t des KKL-Jahresbedarfs an Urandioxid haben ein Volumen von nur rund 2,5 m³ und hätten leicht im Stauraum eines kleinen Lieferwagens Platz. Aus dieser kleinen Menge Brennstoff macht das KKL jedes Jahr Strom für mehr als eine Million Menschen!

■ Wiederaufarbeitung

Bis zum Inkrafttreten des zehnjährigen Moratoriums Mitte 2006 gab das KKL einen Teil der verbrauchten Brennelemente, in denen sich noch nützlich Plutonium sowie noch zirka 0,6 % unverbrauchtes U-235 befindet, in die Wiederaufarbeitung. In diesem Rezyklierungsprozess werden die Wertstoffe von den Abfällen getrennt. Das dabei gewonnene Uran kann in sogenannte ERU-Brennelementen (enriched reprocessed Uranium – angereichertes wiederaufbereitetes Uran), das Plutonium in sogenannten Mischoxid-Brennelementen (MOX) erneut eingesetzt werden. Sämtliche Abfälle werden behandelt und zurück ans KKL, beziehungsweise ins vom KKL mitfinanzierte Zwiilag transportiert. Dazu werden die hochaktiven Abfallteile wie Spaltprodukte (kurzlebige radioaktive Nebenprodukte des Spaltprozesses) und Aktiniden (langlebige radioaktive Isotope, die durch Neutroneneinfang und anschliessenden Zerfall entstehen) in der Wiederaufarbeitungsanlage verglast und in Stahlfässer gegossen. Das Volumen und die langfristige Radiotoxizität der hochradioaktiven Abfälle nehmen durch Wiederaufarbeitung deutlich ab.

Das KKL verwendete bislang keinen rezyklierten Brennstoff aus der Wiederaufarbeitung eigener Brennelemente. Das Plutonium aus dem verbrauchten KKL-Brennstoff wurde bereits als MOX im Kernkraftwerk Beznau eingesetzt. Das wiederaufbereitete Uran kann ebenfalls dort oder auch im KKL eingesetzt werden.

Abfall

■ Hochaktiver Abfall

Die verbrauchten Brennelemente sind hoch radioaktiv. Sie weisen eine bedeutende Wärmeentwicklung auf und müssen bis zum Transport ins Zwischenlager für einige Jahre im Abklingbecken auskühlen.

Heute muss das KKL jährlich 12 m³ verbrauchter Brennelemente entsorgen. Das ist ein Drittel weniger im Verhältnis zur produzierten Menge Strom als zu Betriebsbeginn. Denn die Effizienz des Kernbrennstoffs und damit auch des Kraftwerks wurde durch technische Entwicklungen bedeutend gesteigert. Die Lebensdauer jedes Brennelementes konnte um ein Drittel erhöht werden, und obwohl die Reaktorleistung um 15 % stieg, reduzierte sich der Materialverbrauch bei den Brennelementen (Uran, Zirkonium). So kann aus noch weniger Uran noch mehr Strom gewonnen werden.

■ Schwach- und mittelaktiver Abfall

Betriebsabfälle sind schwach- und mittelaktive Abfälle. Dazu gehören Putzklappen, Folien, Zonenbekleidung, Abdeckungen, Verpackungen und anderes Instandhaltungsmaterial. Ein Teil dieser Abfälle wird im Werk



Foto: Ivo Stalder

Die gelben Fässer sind für schwach- und mittelaktive Betriebsabfälle.

komprimiert und in 200-Liter-Fässer abgefüllt. Nach dem Transport ins Zwischenlager in Würenlingen (Zwiilag) werden diese Abfälle im dortigen Plasmaofen verschmolzen und in Kokillen abgefüllt. Die Schlacke in den Kokillen wird in Fässern einzementiert. Andere prozessbedingte Abfälle wie Harze, Konzentrate, Schlämme und Abluftfilter werden direkt im KKL in Fässer einbetoniert. Schwach- und mittelaktive Abfälle entwickeln keine bis unbedeutende Wärme.

Auch diese schwach- und mittelaktiven Abfälle gingen durch Anlageoptimierungen, Mitarbeiter-Schulungen und Minimierungskonzepte im Verlauf der Jahre deutlich zurück. So fallen heute pro Jahr insgesamt rund 40 m³ schwach- und mittelaktive, endkonditionierte Abfälle an – rund 30% weniger als noch vor 20 Jahren.

All diese Verbesserungen kommen den Forderungen der nachhaltigen Entwicklung weiter entgegen. Denn sie schonen die natürlichen Ressourcen und helfen, die radioaktiven Abfälle und die Auswirkungen auf die Umwelt auf ein Minimum zu reduzieren.

■ Transport- und Lagerbehälter

Um verbrauchte Brennelemente ins Zwiilag transportieren zu können, müssen sie in spezielle Behälter verpackt werden, die zugleich auch für die Lagerung dienen. Jeder Behälter fasst gegen 70 Brennelemente und misst gut sechs Meter in der Länge und rund drei Meter im Durchmesser. Diese komplexen, extrem dickwandigen und soliden Behälter entsprechen der IAEA-Norm, bieten besten Schutz gegen Strahlung und widerstehen hohen Stürzen, Feuer und selbst dem Absturz eines Militärjets. Beim Transport ins Zwiilag ist das Personal einer kleineren Strahlung ausgesetzt als Piloten bei einem Transatlantikflug.

In extrem soliden Behältern transportiert und lagert man verbrauchte Brennelemente im Zwischenlager bis zur Entsorgung im geologischen Tiefenlager.



Foto: Ivo Stalder

Sicherheit im KKL

Der Betrieb von Kernkraftwerken erfordert ein Höchstmass an Reaktorsicherheit und Strahlenschutz. Ziel der nuklearen Sicherheitstechnik sind deshalb möglichst zuverlässige und störfallsichere Einrichtungen und Anlagen, die einen sicheren Betrieb gewährleisten. Eine permanente Überwachung und vorbeugende Instandhaltung der Anlage ist dafür grundlegend. Im Vordergrund der Sicherheitsmassnahmen steht der Schutz der Bevölkerung und der im Kernkraftwerk arbeitenden Menschen vor schädlichen radioaktiven Einflüssen. Der hohe Sicherheitsstandard des KKL gründet auf passiven, also zumeist baulichen, sowie aktiven mehrfachen technischen Sicherheitsbarrieren, die durch eine gelebte Sicherheitskultur ergänzt werden.

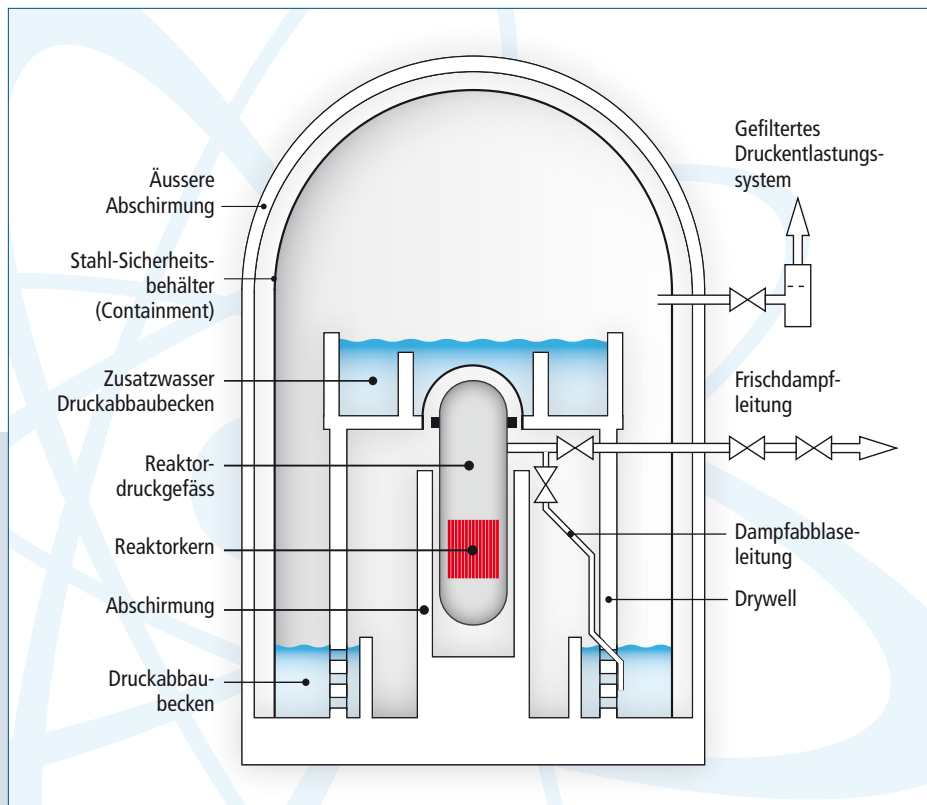
■ Schutz von Mensch, Umwelt und Anlage

Die Umwelt ist vor der Radioaktivität im nuklearen Dampferzeugungssystem des KKL durch mehrere bauliche Massnahmen nach einem Zwiebschalenprinzip geschützt. Der Brennstoff in Form von Uranpellets ist gesintert, d.h. in harte Keramikgitter gebrannt. Feste Stoffe können so nicht entweichen. Die Pellets wiederum sind in gasdichte Brennstabhüllrohre verschweisst, die gasförmige Spaltprodukte zurückhalten. Die Brenn-

elemente sind im Reaktor Druckgefäss eingeschlossen, einem 15 cm dicken Stahlbehälter, der einen Grossteil der Strahlung abschirmt. Das Reaktor Druckgefäss ist im Drywell eingeschlossen, einer 1,5 m dicken, armierten Betonmauer. Das Drywell ist wiederum ganz vom Containment umfasst, einem 3,8 cm dicken Stahlmantel. Dieser wird durch die Aussenmauer des Reaktor Gebäudes geschützt, einer stark armierten und 1,2 m dicken Stahlbetonmauer.

Das Containment bietet optimale Sicherheit gegen den Austritt von Spaltprodukten und radioaktiv kontaminierter Materie – sowohl im Normalbetrieb wie bei einem sehr unwahrscheinlichen schweren Störfall. Im Raum zwischen dem Reaktor Gebäude und dem Stahl-Containment herrscht ein Unterdruck. Dies ermöglicht eine sichere Überwachung und verhindert, dass luftgetragene Radioaktivität ins Freie entweicht. Automatisch schliessende Absperrventile gewährleisten im Anforderungsfall die vollständige Trennung des Containments vom übrigen Teil der Anlage. Für den Fall eines übermässigen Druckanstieges im Containment besteht zusätzlich ein gefiltertes Druckentlastungssystem.

Um sich vor Einwirkung von aussen zu schützen, ist das KKL solide gebaut. So besteht beispielsweise die Mauer des Reaktor Gebäudes aus einem Spezialbeton, der doppelt so viel Zement enthält als beim Bau von Alpentunnels



Der Schnitt durch das Reaktor Gebäude zeigt das solide bauliche Barrierensystem. Es schützt den Reaktor vor äusseren Einwirkungen und die Umwelt vor Strahlung.



Foto: Ruth Schmid

Die klare Signalisation von Gefahren und Anweisungen ist grundlegend für die Sicherheit der Mitarbeitenden.

verwendet wird. Den Berechnungen der Gebäudestrukturen liegen die bei Kernkraftwerken üblichen Sicherheitskriterien zugrunde. Die vom Standort abhängigen Situationen wie Erdbeben, Überflutung und Flugzeugabsturz wurden in der Auslegung des Werks berücksichtigt. Beim Absturz eines modernen, grossen Verkehrsflugzeugs würde die äussere Gebäudehülle des Reaktor Gebäudes nur leicht beschädigt. Auf das Containment und seine Schutzfunktion hätte dies keine Auswirkungen.

■ Gelebte Sicherheitskultur

Durch die Optimierung des Zusammenspiels zwischen Mensch und Maschine wird die Sicherheit stetig verbessert. Die Kernkraftbranche tauscht sich dazu weltweit aus, sodass man voneinander aus Fehlern lernen kann. Sicherheit heisst zudem, dass die Anlage laufend erneuert und an den Stand der Technik angepasst wird. Das KKL ist eine moderne Anlage, die von gut geschultem und geprüfem Personal betrieben wird. So müssen beispielsweise Operateure mehrmals jährlich am Simulator verschiedene Betriebssituationen und Störfälle trainieren und, Flugzeugpiloten ähnlich, alle zwei Jahre ihre Zulassung erneuern. Ein technisches Qualitätsmanagementsystem unterstützt Arbeitsprozesse und das eigene Sicherheitscontrolling, periodische Sicherheitsüberprüfungen von behördlicher Stelle fördern die ständige Weiterentwicklung der Sicherheit.

Mit der **nuklearen Sicherheitscharta** verpflichtet sich das KKL selbst, beim Betrieb der Anlage und beim Strahlenschutz eigenverantwortlich Massnahmen zu treffen, um die Sicherheit kontinuierlich zu verbessern. Ausgangspunkt ist die Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen. Die Charta ist die Basis für alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des KKL bei der Erfüllung ihrer täglichen Aufgabe.

■ Behördliche Kontrolle

Neben baulichen Massnahmen und einer hohen Sicherheitskultur dient ein Regelwerk von Gesetzen und Vorschriften dem Schutz der Gesundheit von Bevölkerung, Mitarbeitern und Umwelt vor Radioaktivität. Denn das KKL gibt Radioaktivität ab. Allerdings liegt die Menge weit unter den gesetzlichen Vorschriften. Sie beträgt typischerweise maximal 10 % der gesetzlichen Grenzwerte. Diese Stoffe verursachen weniger als 1 % der natürlichen Strahlendosis. So ist in Leibstadt keinerlei erhöhte Strahlung messbar. Dank detaillierter Planung von Arbeiten und umfangreicher Strahlenschutzmassnahmen liegt auch die mittlere Jahresstrahlungs-dosis pro Mitarbeiter bei nur rund 0,5 mSv, während die höchste Einzeldosis in der Regel um 50 % des gesetzlichen Grenzwertes von 20 mSv liegt. Zum Vergleich: Die natürliche Strahlung im Schwarzwald (Kurort Menzenschwand) beträgt 20 mSv pro Person und Jahr.

Ein ganzes Netzwerk von Messstationen in der nahen und weiteren Umgebung der Anlage, einschliesslich des deutschen Grenzgebietes, überwacht laufend die Emissionen des Werks in Luft, Wasser und Erde sowie die Direktstrahlung. Kontrolliert werden diese Messwerte vom KKL selber, über das MADUK-Netz der nationalen Kontrollbehörde ENSI (aktuelle Messwerte im Teletext von SF DRS) und die NADAM-Sonden der Nationalen Alarmzentrale NAZ (aktuelle Messwerte unter www.naz.ch). Auch die Eidgenössische Anstalt für die Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (EA-WAG) und die Sektion Überwachung der Radioaktivität des Bundesamtes für Gesundheit (SUER) führen Messstationen.

Das Kernkraftwerk ist gegen unbefugtes Eindringen gesichert.



Foto: Ruth Schmid



Foto: Karin Gfeller

In der naturbelassenen Umgebung des KKL fühlen sich auch die Wanderfalken wohl, die seit vielen Jahren im Horst am Kühlturm des KKL brüten.

Umweltaspekte

■ Treibhausgase

Das KKL ist ein praktisch treibhausgasfreier Betrieb. Da keine fossilen Energieträger verbrannt werden, entsteht bei der Stromproduktion im Gegensatz zu allen andern thermischen Kraftwerken kein CO₂. Rechnet man auch alle dem KKL vor- und nachgelagerten Prozesse und Energieflüsse vom Uranabbau bis zur Entsorgung der Abfälle mit ein, so ist die Treibhausgasbilanz immer noch ausgezeichnet: Pro erzeugter Kilowattstunde Strom sind nur acht Gramm CO₂-Äquivalente zu verzeichnen. Im Vergleich dazu geben Braunkohlekraftwerke, wie sie beispielsweise in Deutschland noch zu finden sind, 1231 g CO₂-Äquivalente/kWh ab. Gaskraftwerke liegen bei 644 g CO₂-Äquivalenten/kWh, und selbst ein Gas-Kombikraftwerk schlägt noch mit 426 g CO₂/kWh zu Buche. .

Der heutige Schweizer Strom-Mix ist bezüglich Treibhausgasemissionen praktisch unschlagbar: Dank rund 40% Kernenergie und 55% ebenso klimafreundlicher Wasserkraft verursacht die Stromproduktion nur 2,3% der gesamten Schweizer Treibhausgasemissionen. Der globale Durchschnitt liegt hingegen bei rund 40%.

■ Emissionen in Luft und Wasser

Insgesamt weist das KKL kaum Emissionen in die Atmosphäre auf. Die gesamte Abluft aus der Anlage wird gefiltert und radioaktive Partikel (Aerosole) aufgefangen. Radioaktive Gase werden in einer Abgasreinigungsanlage behandelt, wo sie etwa 50 Tage verweilen, bis ihre

Radioaktivität weitgehend abgeklungen ist. Nur eine geringe Menge von Edelgasen (Krypton und Xenon) wird mitsamt der gefilterten Abluft aus der Anlage über den Abluftkamin abgegeben.

Alle radioaktiven Abgaben in Luft und Wasser betragen einen Bruchteil der behördlich genehmigten, tiefen Grenzwerte.

Im KKL fällt auch radioaktives Abwasser an. Dabei handelt es sich um Abwässer aus Apparate- und Bodenentwässerung, der betriebseigenen Wäscherei und Labors. Das gesamte Wasser aus der kontrollierten Zone wird verdampft oder mittels Zentrifugen gereinigt. Was als fester Stoff zurückbleibt, wird verfestigt und in Fässern gelagert. Das gereinigte Wasser wird geprüft, registriert und dann an den Rhein abgegeben. So gelangen nur geringe Mengen Radioaktivität in den Rhein.

Ein markantes Bauwerk

Um Temperatur und biologisches Gleichgewicht des Rheins in keiner Weise zu beeinträchtigen, wurde das KKL mit einem Naturzugkühlturm statt mit direkter Wasserkühlung gebaut. Auch haben weder Wärme noch Dampf aus dem Kühlturm Auswirkungen auf das lokale Klima. Allerdings wirft er aufgrund seiner Grösse je nach Wetterlage einen deutlichen Schatten.



Foto: Palma Fiacco

Kernkraftwerk Leibstadt AG, Informationszentrum, CH-5325 Leibstadt