

R-98-19

Jämförelse mellan våt och torr lagring av använt kärnbränsle

Erik Söderman

ES-konsult AB

Juni 1998

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co
Box 5864

SE-102 40 Stockholm Sweden

Tel 08-459 84 00

+46 8 459 84 00

Fax 08-661 57 19

+46 8 661 57 19



Jämförelse mellan våt och torr lagring av använt kärnbränsle

Erik Söderman

ES-konsult AB

Juni 1998

ANVÄNT KÄRNBRÄNSLE I VÅTT OCH TORRT

1 BAKGRUND

I samband med SKB:s projekt att bygga ut den svenska anläggningen för mellanlagring av använt kärnbränsle för att klara behovet av det svenska programmet fram till år 2010 har fråga från externa intressenter uppkommit om den teknik för våt lagring av bränslet är den mest optimala.

Föreliggande rapport syftar till att belysa de olika tekniker som idag tillämpas på olika håll i världen och de tekniska och ekonomiska för- och nackdelar som vidlåder de olika principerna. Värderingen avser bränslelagring utanför kraftverkens egna förvaringsbassänger.

2 HISTORIK

Då utnyttjandet av fredlig kärnenergi inleddes under 1950-talet var all uppmärksamhet koncentrerad på utformningen av kärnkraftanläggningarna och ganska ringa intresse ägnades långsiktiga frågor om omhändertagande av avfallet. Generellt såg man framför sig upparbetning av utbränt bränsle, återutnyttjande av utvunnet fissilt material och slutlagring av det högaktiva avfallet, främst i förglasad form. Några detaljkoncept fanns inte utarbetade.

Kärnkraftverken försågs med bränslebassänger som en del i hanteringen av bränslet. Kapacitet fanns i dessa för lagring av bränslet för åtminstone fem års drift. Denna kapacitet kunde sedermera utvidgas till längre tid, bl.a. genom att bränsleställen i bassängerna ersattes av s.k. kompaktställ. Dessa innehöll ofta borplåtar, varigenom bränslet kunde packas tätare i bassängerna utan att risk för kriticitet uppstod.

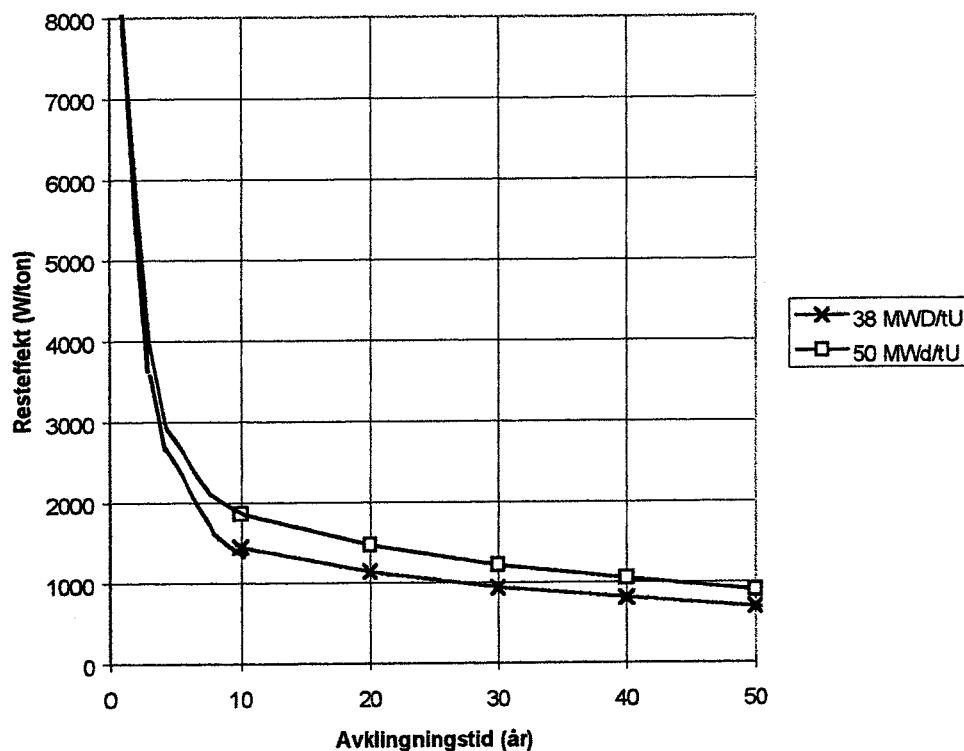
Under 1970-talet övergavs i Sverige tanken på upparbetning av bränslet och koncept utarbetades för slutlagring av bränslet i stabilt berg, KBS-projekten. Dessa innebar att bränslet skulle mellanlagras i en för svenska verk gemensam anläggning för att resteffekten i bränslet skulle klinga av. Senare skulle bränslet kapslas in och slutförvaras.

Valet av lagringsmetod i CLAB var relativt lätt, eftersom det vid denna tidpunkt inte fanns principiellt andra metoder utvecklade i tillräcklig grad för att kunna licensieras. Lagringsmetoden i CLAB är i väsentliga delar samma som tillämpas för bränslet i bassängerna vid kraftverken.

3 ÖVERSIKT

3.1 RESTEFFEKT I BRÄNSLET

Det utbrända bränslet innehåller radioaktivitet, som innebär att värme måste kylas bort och att strålskärmning måste ske. Radioaktiviteten minskar med tiden och behoven av kylning varierar därmed i tiden. I Figur 1 visas avklingningen av värmeavgivningen för bränsle av den typ som används i Sverige.



Figur 1: Resteffekt som funktion av tiden för typiskt LWR-bränsle (enl. Decay/Origen)

Kylningsbehovet varierar alltså kraftigt med tiden, särskilt de första åren efter bestrålningen i reaktorn. Detta påverkar också förutsättningarna för lagring av bränslet. Luft- eller gaskylning kan inte ske på ett praktiskt sätt förrän efter fem till tio års avklingning med vattenkylning. För lättvattenreaktorbränsle med hög utbränning gäller den längre tiden

3.2 KORTTIDSLAGRING VID KRAFTVERKET

Innan använt kärnbränsle flyttas lagras det i kärnkraftverkens egna bränslebassänger. Under denna tid avklingar en stor del av de radioaktiva ämnen som bildats i bränslet under driften (från c:a 75.000 W/ton 5 dygn efter avstängning av reaktorn till 8.000 W/ton efter ett år). Ju längre bränslet lagras i kraftverkets bassäng, desto lättare är det att kyla vid transport och lagring i senare skeden.

För transport till våt lagring, som i CLAB, kan denna ske efter c:a nio månaders avklingning. För torr lagring måste avklingning ske under längre tid, fem till tio år.

3.3 MELLANLAGRING UTANFÖR KRAFTVERKET

Från kärnkraftverkens bränslebassänger transporteras bränslet till ett mellanlager där det lagras i ytterligare 30-40 år. Mellanlagringen kan ske antingen i direkt anslutning till verket eller, som i Sverige, i ett för flera kraftverk gemensamt lager.

Efter mellanlagringen i 30-40 år har radioaktiviteten minskat med ytterligare 90%, men bränslet måste fortfarande strålskärmas. Resteffekten är då tillräckligt låg för att bränslet skall kunna kapslas in för slutlagring.

Våtlagring är det hittills vanligaste sättet att mellanlagra använt kärnbränsle. Det dominerar helt för lättvattenbränsle (LWR-bränsle). En betydande del av de ungefär 50.000 ton lättvattenbränsle som 1996 lagrades i världen finns i bassånger vid kraftverken.

I torrlager fanns 1996 c:a 5.000 ton, främst från kanadensiska CANDU-reaktorer (tungvatten) och engelska Magnoxreaktorer (gaskylda), båda typerna med väsentligt lägre utbränningsgrad än lättvattenreaktorer, och därmed med lägre resteffekt och strålninsintensitet.

I USA och Tyskland har våtlager hittills varit den vanligaste metoden, men på senare tid, då kraftverkens bassånger börjar vara fyllda, börjar också torrlager komma till större användning även för lättvattenreaktorbränsle. Lagringsvolymerna var 1996 ännu små, c:a 1000 ton i USA och 20 ton i Tyskland.

3.4 SLUTLAGRING

Slutlagring av det utbrända bränslet kommer i Sverige, enligt nuvarande planer, att ske i stabilt berg enligt den s.k. KBS 3-metoden. Denna metod utvecklas fortfarande bl.a. i Äsöplaboratoriet i närheten av Oskarshamnverket.

4 TEKNIKER FÖR MELLANLAGRING

4.1 VÅT LAGRING

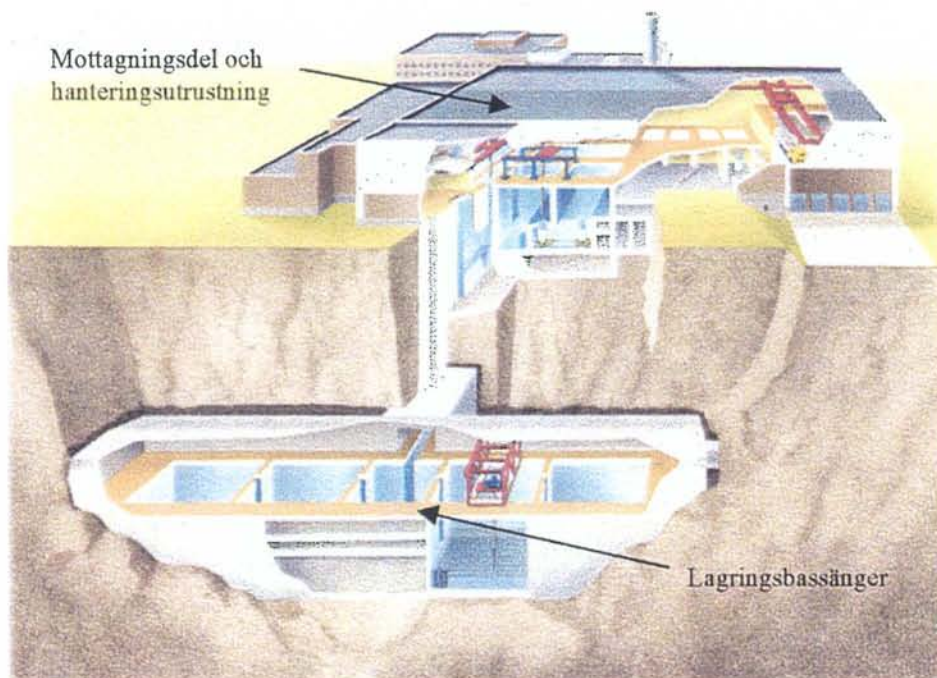
Kärnbränslet lagras i vattenfyllda bassånger där vattnet verkar både som kylmedel och strålskärm. Vattnet är effektivt som kylmedel och bränslet kan hållas vid rumstemperatur. Med god vattenkvalitet kan bränslet lagras på detta sätt under mycket lång tid utan att påverkas av korrosion. Vid lagringen i vatten är bränslet tillgängligt för inspektion. Forskning om bränslets uppförande under långtidslagring har pågått i hela världen. Den har samordnats och rapporterats i en internationell arbetsgrupp under IAEA:s ledning BEFAST-gruppen [ref. 1 och 2]. Forskningen och erfarenheter av upp till 30 års lagring visar inga egentliga begränsningar i möjlig lagringstid. I Sverige har man visat [ref. 3] att långtidslagring i CLAB kan ske under mycket lång tid (mer än 100 år) utan påtagliga risker för omgivningen.

Även själva lagret och dess system kan med planerad tillsyn och underhållsåtgärder bibehållas i säker funktion under motsvarande tid

Tekniken är således väl beprövad och tillförlitlig, men den kräver aktiva system för att fungera. Vattnet måste cirkuleras genom renings- och jonbytesfilter för att bibehålla renheten och för att inte bli korrosivt. Bränslets resteffekt måste också kylas bort av ett aktivt kylsystem. Detta medför att en viss personal krävs liksom elektricitet till de aktiva systemen.

En våtlagringsanläggning måste vara relativt stor för att bära investeringskostnaden för hanterings- och hjälpsystem och för bassänger som inte heller kan utföras ekonomiskt i alltför små moduler.

CLAB (centralt mellanlager för använt kärnbränsle) (Figur 2) invid Oskarshamnsverket är ett typexempel på våtlagring. Anläggningen är byggd för 5.000 ton bränsle, vilket motsvarar de svenska verkens behov fram till c:a år 2004.



Figur 2: CLAB i genomskärning (från <http://www.skb.se/pres/forvarin/saforvar/clabrv.htm>)

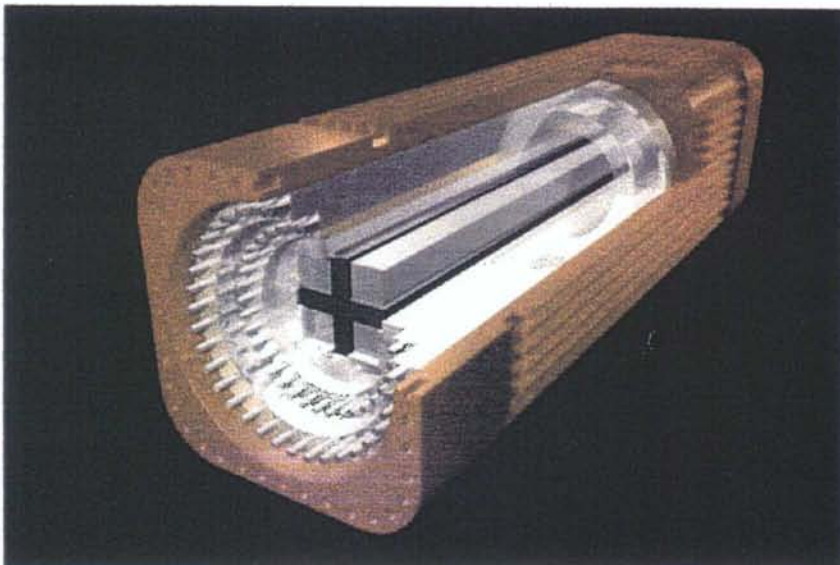
4.2 TORR LAGRING

Efter ett antal års lagring i vatten har bränslets resteffekt minskat så långt att det kan förvaras i luft- eller gasatmosfär, utan att temperaturen stiger alltför högt. Temperaturgränsen bestäms dels av risken för korrosion i luft, dels av risken för att kapslingen på bränslet skadas genom krypning i materialet. Krypningen beror på att bränslestavarna invändigt är trycksatta med gas, vars tryck ju ökar med ökande temperatur.

Utomlands har metoder utvecklats för lagring av bränsle i torrt tillstånd. Här finns tre principiellt skilda metoder:

- Lagring i gastäta, strålskärmande metallbehållare av stål eller segjärn, som även tjänar som transportbehållare.
- Lagring i betongbehållare, där bränslet kyls med luft genom själv-cirkulation.
- lagring i strålskärmande betongmoduler, där bränslet kyls med luft genom själv-cirkulation.

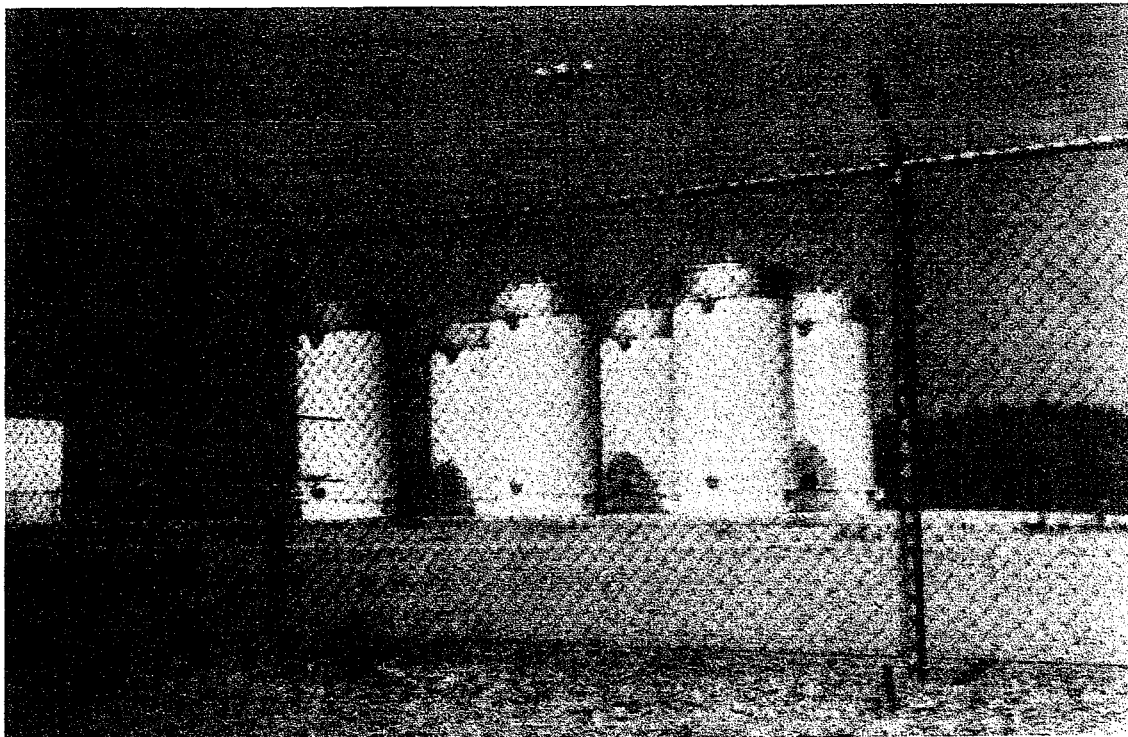
Strålskärmande metallbehållare, Figur 3, är i princip utformade på samma sätt som transportbehållare för bränsle; dock av i vissa avseenden enklare och billigare utförande. En behållare rymmer 5-10 ton bränsle, är tätsvetsad och normalt fylld med helium eller annan täckgas. Restvärmen gör att bränsletemperaturen kommer att ligga vid 250 – 400 °C. Via gasen överförs värmen till stålbehållaren som i sin tur kyls av omgivande luft. För att minska neutronstrålningen till omgivningen innehåller behållaren också neutronbromsande plastmaterial.



Figur 3: CASTOR behållare – en lagrings- och transportbehållare (från http://ticino.cunet.ch/peterhans/tec_07.html)

Behållaren fylls med bränsleelement samt vakuomtorkas och försluts med dubbla tätningar i kraftverket. Det kan sedan lagras, utan vidare omlastningar, i enkla lagerbyggnader eller t.o.m. utomhus.

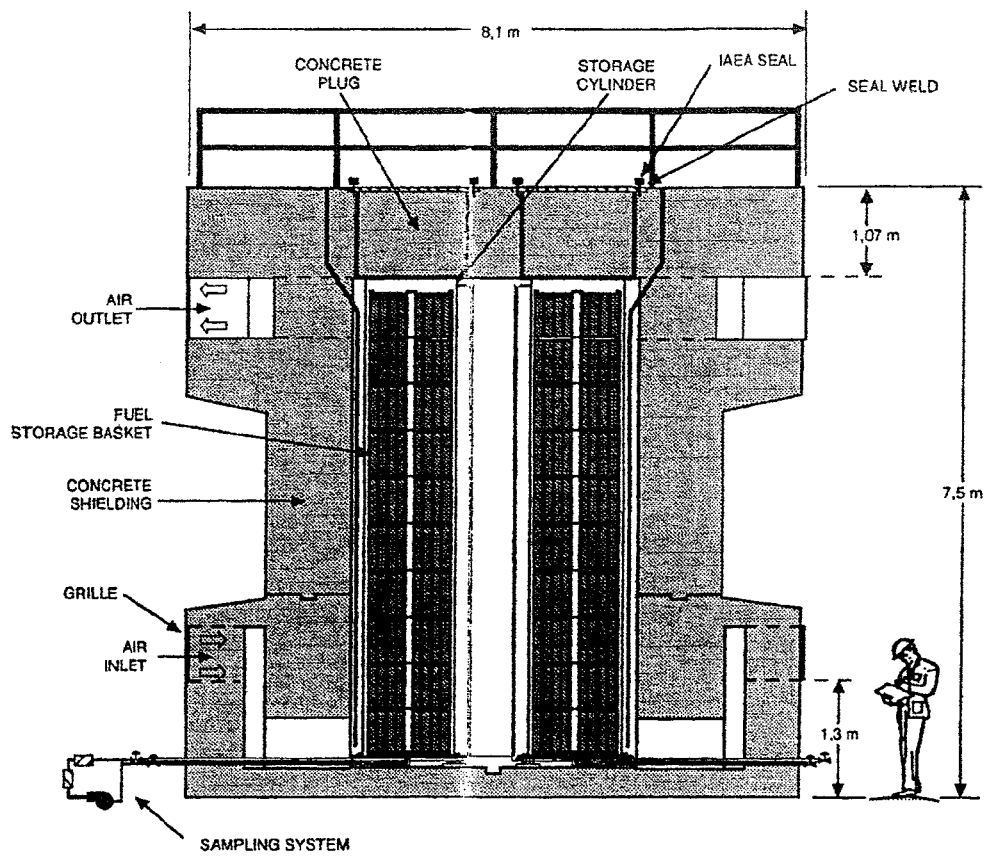
Denna lagringsmetod lämpar sig för enstaka kraftverk, där fortsatt lagring kan ske vid kraftverket. Initialinvesteringen är låg, eftersom ingen stor och dyrbar lageranläggning behöver byggas och behovet av driftövervakning är begränsad. Figur 4 visar ett torrlager i anslutning till kraftstationen Surry. Torrlager utvecklas nu också för ryska och litauiska RBMK-anläggningar.



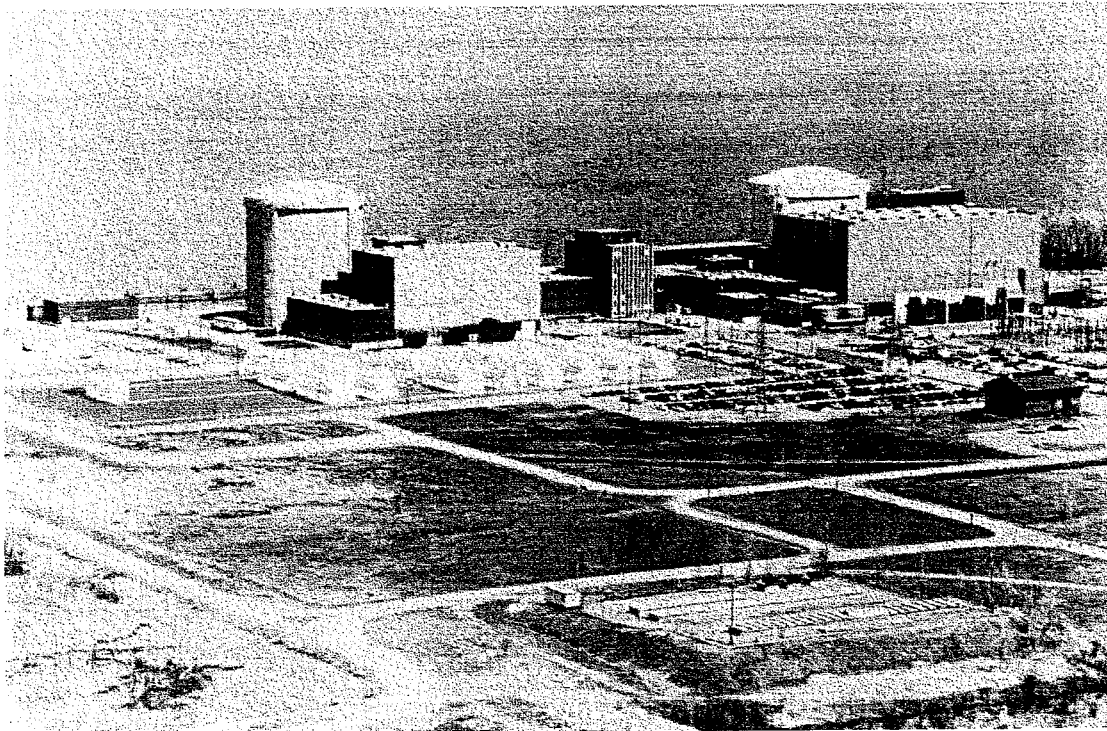
Figur 4: CASTOR storage casks at Surry

Kanadensarna har för bränslet från sina CANDU-reaktorer, vattenkylda kanalreaktorer modererade med tungt vatten, valt torr lagring. Först utvecklades betongbehållare, invändigt klädda med rostfritt stål och kylda med luft genom självcirkulation. Sådana behållare svarade 1996 för 90% av Kanadas torrlager. Karakteristiskt för CANDU-bränslet är låg utbränning och även låg neutronstrålning i förhållande till bränsle från lättvattenreaktorer.

Man har nu utvecklat betongmoduler, Figur 5 (från ref. 4). I detta lager fylls lagringsbehållare av stål med bränsle. Behållarna transporteras sedan i blyskärmade transportbehållare till lagret, som består av strålskärmande betongmoduler, konstruerade så att luftgenomströmning kyler bränslebehållarna. Varje modul kan rymma 20 behållare och således möjliggöra stegvis utbyggnad av lagret. Figur 6 visar ett sådant modullager vid kraftstationen Gentilly 2.



Figur 5: Genomsnitt av en betongmodul med ventilation (från ref. 4)



Figur 6: AECL concrete storage modules at Gentilly-2

Utöver modullagret kan torrlager givetvis byggas i större skala i former, som hanteringsmässigt liknar våtlager. Franska SGN erbjuder en sådan lösning, som emellertid hittills inte realiserats. Även i denna lösning kyls lagret med luft i självcirkulation.

5 JÄMFÖRELSE MELLAN LAGRINGSMETODER

Jämförelserna nedan avser anläggningar för mellanlagring utanför själva kraftverket. I kraftverket är våtlagren helt förhärskande, eftersom de används även för korttidslagring då reseffekten är för hög för torr lagring.

5.1 SÄKERHET

VÅT LAGRING

Genom lagringen under vatten hålls bränslet väl kylt och strålskärmat. Bortfall av yttre kylning leder till att bassängvattnet värms upp. Detta går emellertid långsamt och alla säkerhetsmarginaler är goda.

En förutsättning för säkerheten är emellertid att anläggningen övervakas så att vattnets kvalitet upprätthålls. I annat fall kan korrosion uppträda och så småningom leda till bränsleskador och utsläpp till bassängvattnet av radioaktiva ämnen.

Den lösning som valts för CLAB, med bassängerna placerade i berggrum och med bassängerna dimensionerade för jordbävningsspåkänningar, skyddar också lagret mot även mycket osannolik yttre påverkan och t.ex. störande flygplan. Graden av säkerhet i dessa avseenden varierar mycket mellan olika länder.

TORR LAGRING

Vid torr lagring utgörs barriärerna mot omgivningspåverkan i stället av behållarna med dubbelbarriär, som skyddar mot utläckage och av strålskärmarna som också ger ett betydande mekaniskt skydd. Metallbehållarna utgör begränsat skydd mot neutronstrålning. Särskilt för högt utbränt bränsle måste behållarna därför också innehålla neutronbromsande material.

Säkerheten tillgodoses för metallbehållarna genom tätheten hos behållarna och genom att dimensioneringen skett på sådant sätt att temperaturen hos bränslet begränsas. Torrlager i inert atmosfär (heliumfyllda behållare) för lättvattenreaktorbränsle finns licensierade för temperaturer upp till 410°C i Tyskland och 380°C i USA. I luftatmosfär finns licensierade anläggningar i Kanada och Korea för temperaturer upp till 160°C. [ref. 2]. Acceptabel temperatur begränsas dels av risken för korrosion (i luft), dels av risken för krypning i kapslingsmaterialet, som påverkas av temperaturen och av det inre övertryck som finns i bränslestavarna (och av tiden som bränslet har hög temperatur).

De dimensionerande temperaturerna uppstår kort efter inlagringen av bränslet. Då resteffekten minskar avtar också temperaturen på bränslet. För bränsle, som lagrats länge före inplacering i torrlager, blir den dimensione-

rande temperaturen lägre, eftersom den höga temperaturen kommer att bestå under längre tid.

Vid lagring i större betongmoduler placeras bränsleelementen i tätsvetsade kassetter som i sin tur kyls av luft, som genom själv-cirkulation, d.v.s. värmen från bränslekassetterna driver luften genom modulerna.

5.2 MILJÖ

Bränslekapslingen är dimensionerad för förhållandena under reaktordrift och är under lagringen, särskilt vid våtlagring, mycket lågt påkänd i förhållande till dimensioneringen. Den förblir tät under lagringen och radioaktivt material kommer således inte ut från bränslet.

I våtlagret utgör vattnet den sekundära barriären, i det torra lagret den dubbeltätade behållaren eller den tätsvetsade kassetten.

Radioaktiva partiklar som i kraftverket kan ha fastnat på bränslets yta kan komma att avges till vattnet i våtlagret. Även från läckande bränsle kan mindre avgivning ske. Vattnet renas därför i jonbytare, som också bidrar till att upprätthålla en bra vattenkemi. De delar av filtren där radioaktivitet samlats gjuts in i betong för slutförvaring.

Den alldeles övervägande delen av aktivitet som hamnar i olika filter kommer från bränsle i anslutning till hanteringen av ankommande bränsle. Påverkan på omgivningen av lagringen är helt obetydlig, även vid förutsebara missöden.

Eftersom bränslet vid torr lagring förvaras i behållare med dubbla tätningar eller tätsvetsade kassetter sker inga utsläpp till omgivningen och miljöpåverkan blir minimal. Åter är förstas en förutsättning att behållarna eller kassetterna verkligen förblir täta. Den atmosfär som svarar för kylningen bör således vara relativt torr och fri från korrosiva ämnen, om lagringen skall pågå under lång tid.

Miljöpåverkan från båda typerna av lager är således minimal. Lagrens utformning kan skilja med avseende på miljöpåverkan av extrema yttre händelser.

5.3 TRANSPORTER

Transporterna sker i Sverige med båt, utomlands också på landsväg eller järnväg. Inom kraftverket sker transporterna med specialbyggda trailers. Vid transporterna används strålskärmande metallbehållare med mycket höga krav på mekanisk hållfasthet. De skall utan att skadas bl.a. tåla tågkollisioner och fall från förekommande lyfthöjder. Detta sker genom att behållarna förses med stötdämpare anpassade till hanteringen.

Hanteringen vid omlastning av bränslet mellan olika lagringsformer utgör de tillfällen då funktionsfel eller felhantering kan leda till bränsleskador eller frigörelse av aktivitet. I de större lagren finns system för omhändertagande av sådana händelser. Torrlagringen i stålbehållare, som samtidigt är transportbehållare, har emellertid fördelen att antalet omlastningar minskas.

5.4 ERFARENHETER

Erfarenhet av våtlagring finns från mer än 30 år tillbaka. Beträffande torr-lagring finns också erfarenhet, men i mindre omfattning, avseende bränsle från provreaktorer. Kraftverksbränsle har i Kanada lagrats torrt i 20 år.

Erfarenheterna sammanfattas i IAEAs BEFAST-rapport [ref. 2], som anger goda förutsättningar för båda metoderna att lagra bränslet under mycket lång tid utan påtaglig omgivningspåverkan.

5.5 EKONOMI

Kostnadsjämförelser mellan de olika lagringsmetoderna är vanskliga, eftersom tillgängliga uppgifter inte säkert är jämförbara. Kvalitetsnivån och säkerhetskraven som ställs på lagren kan också variera kraftigt mellan olika länder, vilket kan ha betydande inverkan på både anläggnings- och driftkostnader. IAEA har utarbetat riktlinjer (IAEA Safety Guides 116-118) för både anläggning och drift av lagringsanläggningar för använt bränsle. Dessa riktlinjer sammanfattar de grundläggande krav som bör ställas.

Våtlager, liknande CLAB, har hög anläggningskostnad, eftersom de kräver grundinvestering i lagervolym, hanteringsutrustning och hjälpsystem med kapacitet för ganska många års inlagring. Liknande, men möjligen något lägre, grundinvestering belastar de större torrlagren. Ytterligare lägre blir grundinvesteringen med betongmoduler, där modulerna kan byggas upp successivt. Lägst grundinvestering belastar stålbehållarna, där emellertid anskaffningskostnaden för behållarna är högre och vid stora lagringsvolymer minskar den ekonomiska fördelen eller t.o.m. vänds till en nackdel.

Stålbehållarna har också en ekonomisk fördel i minskad hantering och obetydliga driftkostnader för övervakning och tillsyn.

Torr lagring i betongkasuner eller betongmoduler kräver likaledes låga driftkostnader, medan den våta lagringen kräver underhåll och tillsyn av kyl- och reningssystem under hela lagringstiden.

Vid val av lagringsmetod utan tidigare bindningar förefaller idag torrlagringssystem i de flesta fall ha ekonomiska företräden. I de fall, som t.ex. i Sverige, då ett lager inklusive hanteringsutrustning och kylsystem redan finns, måste emellertid bedömningen göras utifrån dessa förutsättningar. Marginalinvesteringen i utbyggnad av den befintliga CLAB-anläggningen kan då väl vara den även ekonomiskt mest fördelaktiga lösningen.

6 SAMMANFATTNING OCH DISKUSSION

Båda metoderna har för- och nackdelar, någon allmän preferens har inte framkommit. Både torr- och våtlagring har goda erfarenheter vad gäller påverkan på miljö och hälsa. Båda metoderna är också reversibla, d.v.s. bränslet kan återtas och anpassning ske till ny kunskap och till olika metoder för slutlagring. Det som generellt skiljer teknikerna åt är investerings- och driftkostnad till torrlagrens fördel vid nyanläggning.

En utbyggnad av CLAB tillför dock ingen ny driftkostnad då ingen ny personal (som utgör merparten av driftkostnaden) behövs. Dessutom blir in-

vesteringskostnaden för att fördubbla lagringskapaciteten bara ca 700-800 Mkr., 20-25% av kostnaden för grundinvesteringen i CLAB. Detta eftersom det enda som ska byggas är några extra bassänger. Mottagningsdel med hjälpsystem för kylning, ventilation, etc. samt hanteringsutrustning finns redan.

Följande sammanställning av för- och nackdelar kan göras för de olika metoderna:

6.1 VÅT LAGRING

| Fördelar | Nackdelar |
|--|--|
| Bränslet tillgängligt för inspektion och tillsyn | Vattenkylning kräver kyl- och reningssystem |
| Hög säkerhet genom att vattenkvaliteten kan kontrolleras | Låg- och medelaktivt avfall måste omhändertas och lagras |
| Större erfarenhetsbakgrund både i tid och lagringsvolym | |
| Bränslet lagras vid rumstemperatur, liten risk för temperaturinducerade skador på kapslingen. | Hantering av bränslet ur och i transportflaskor, som används från kraftverk och till slutlig inkapsling. |
| Hanteringen kan anpassas till inkapsling | |
| Kan ta emot bränsle redan efter nio månaders kylning i kraftverkets bassänger, alltså minskad volym bränsle vid kraftverken. | Hög grundinvestering för våtlager. Även driftkostnader under hela lagringen högre än vid torrlager. |

6.2 TORR LAGRING I BEHÅLLARE

| Fördelar | Nackdelar |
|---|---|
| Samma behållare kan användas för transport och lagring | Bränslet måste lagras i vått tillstånd i fem till tio år. |
| Låg grundinvestering, lagerutrymmet kan göras ganska billigt. Kostnaden ligger i behållarna | Neutronstrålningen måste skärmas, problemet accentueras för bränsle med hög utbränning. |
| Sedan behållarna tillslutits är behovet av tillsyn minimalt. Kylning av behållarna sker genom ventilationen av lagringsutrymmet – kan ibland t.o.m. lagras utomhus. | Förhållandevis hög temperatur på själva bränslet ökar risken för kapslingskador |
| Anpassningsbart till enstaka kraftverk eller mindre program | Tillsyn av själva bränslet är inte möjlig utan omfattande åtgärder. |

6.3 TORR LAGRING I BETONGMODULER ELLER -BYGGNAD

| Fördelar | Nackdelar |
|---|--|
| Kylning genom självcirkulation av luft leder till minimalt tillsynsbehov. | Bränslet måste lagras i vått tillstånd i fem till tio år |
| Inget låg- och medelaktivt avfall bildas under lagringen | Förhållandevis hög temperatur på själva bränslet ökar risken för kapslingsskador |
| Låg driftkostnad | Tillsyn av själva bränslet är svår, eftersom det förvaras i slutna kapslar och rör. |
| | Relativt hög grundinvestering i lager och hanteringsutrustning jämfört med behållare |

7 REFERENSER

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; "Options, Experience and Trends in Spent Nuclear Fuel Management"; Technical Reports Series No. 378; IAEA; Vienna (1995)
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; "Further analysis of extended storage of spent fuel"; Technical Reports Series No. 944; IAEA; Vienna (1997)
- [3] E. Söderman; "Kontrollerad långtidslagring i CLAB"; SKB PM 97/40; Oktober 1997
- [4] Hydro-Quebec; "Irradiated Fuel Dry Storage at the Gentilly 2 Nuclear Power Plant." November 1993