



Strålsäkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Pär Ljustell
Jan Wåle

Forskning

2014:31

Degradering i betong och
armering med avseende på
bestrålning och korrosion

SSM perspektiv

Bakgrund

De primära egenskaperna för betongstrukturer i ett kärnkraftverk är dess strukturella styrka och möjlighet att avskärma joniserande strålning. Skade- och belastningsbilden kan komma att påverkas av genomförda och planerade effekthöjningar samt planerade driftsförlängningar av de svenska reaktorerna. Kunskap om huruvida betongen i kärnkraftverk degraderas av bl.a. bestrålning och korrosion är av stor vikt. Strålningsintensitet, typ av strålning, exponeringstid och betongens sammansättning är exempel på parametrar som kan påverka betongens mekaniska egenskaper. Även kunskap om strålningens eventuella inverkan på armeringens mekaniska egenskaper är av intresse. Vetskap om eventuell korrosion i ingjutna stålkonstruktioner i betong orsakad av läckströmmar och elektriska fält är av vikt när betongstrukturens strukturella integritet ska bedömas.

Forskningsarbetet har finansierats av SSM.

Syfte

Syftet med projektet är att genom en litteraturstudie kartlägga och sammanställa känd kunskap rörande degradering av betongstrukturer i kärnkraftverk med fokus på bestrålningseffekter samt korrosion orsakad av läckströmmar och elektriska fält.

Resultat

Rapporten beskriver bl.a. följande:

- Materialet betong och dess degraderingsmekanismer
- Läckströmskorrosion på armering
- Allmänt om strålning och avskärmning
- Exponeringsnivåer i reaktorinneslutning, biologisk skärm och basängar för lagring av högaktivt material
- Strålningsinducerad degradering i betong

Framtaget underlag kommer att bidra till att öka kunskapen inom betongområdet speciellt med avseende på degraderingsfrågor. Denna kunskap kan komma SSM till nytta vid bl.a. granskning av återkommande säkerhetsprovningar (PSR) av kärnkraftsanläggningar.

Behov av ytterligare forskning

Mer forskning behövs inom aktuellt område där svar på huruvida frågan om strålningsinducerad degradering i betong kan bli ett problem vid bl.a. förlängd drift av ett kärnkraftverk.

Projekt information

Kontaktperson SSM: Sofia Lillhök

Referens: SSM 2012-2590



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Pär Ljustell och Jan Wåle
Inspecta Nuclear AB

2014:31

Degradering i betong och
armering med avseende på
bestrålning och korrosion

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarens/författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

Innehållsförteckning

1. Sammanfattning	3
2. Beteckningar	5
3. Inledning	7
Syfte och uppdrag	8
Avgränsningar	8
Omfattning, inriktning och definition	8
Underlag	9
4. Betong.....	11
Mikrostruktur hos cement	11
Mikrostruktur hos ballast.....	11
Ingående komponenter i betong samt hydratisering	12
Betongkonstruktioner utsatta för strålning i svenska kärnkraftsanläggningar.....	13
Betong i kärnkraftverk.....	15
Degraderingsmekanismer inom betong.....	16
Miljöbetingad degradering av betong	17
5. Läckströmskorrosion på armering – allmän beskrivning	21
Läckströmskorrosion i armerade betongstrukturer	24
Erfarenheter från LSK i armering i betong och rörledningar.....	27
6. Strålningsenergi och definitioner	29
7. Exponeringsnivåer i reaktorinneslutning, biologisk skärm och bassänger för lagring av högaktivt material.....	31
Gränsvärden för joniserande strålning i normer och standarder för betong	38
8. Strålningsinducerad degradering i betong.....	41
Interaktion mellan neutronstrålning och material.....	41
Interaktion mellan γ -strålning och material.....	42
Strålningsinducerad degradering i ballast och cement – kemiska processer.....	43
Strålningsinducerad degradering i betong – mekaniska egenskaper på kontinuumnivå	49
Strålningsinducerad degradering i armering – skademekanismer och mekaniska egenskaper.....	60
9. Internationella program: strålningsinducerad degradering av betong	61
10. Slutsatser	65
11. Rekommendationer & förslag till fortsatta insatser.....	69
12. Erkännanden	71
13. Referenser	73

1. Sammanfattning

Denna litteraturstudie sammanställer aktuell kunskap angående strålningsinducerad degradering i betong och speciellt dess effekt på betongens hållfasthet. Gränser givna i standarder och normer är baserad på kunskap som togs fram under 1960- och 1970-talet. Denna kunskap har under 00-talet visat sig till stor del vara baserad på experiment vilka inte motsvarar den miljö som råder, och inte heller de typer av betong som används, i lättvatten reaktorinneslutningar. På grund av denna brist pågår således nu flera nationella och internationella projekt som har delmålet att kartlägga föreliggande område.

Den betongstruktur som sitter närmast reaktortanken är den biologiska skärmen. Biologiska skärmen är den del av reaktorinneslutningen som exponeras för högst nivåer av joniserande strålning (neutron- och γ -strålning). Rapporten beskriver neutron- och γ -strålning och dess interaktion med, och påverkan på betongen. Effekten av bestrålning på drag- och tryckhållfasthet redovisas. Vidare anges gränser givna i standarder och normer.

Joniserande strålning visar sig även verka katalyserande på alkalikiselreaktionen och på karbonatiseringsprocessen. Forskningsresultat visar att joniserande strålning ökar reaktiviteten i ballasten med konsekvensen att betong vilken traditionellt ansetts som säker kan bli reaktiv för alkalikiselreaktionen. Karbonatiseringsprocessen, kan även accelereras av joniserande strålning. De kemiska reaktionerna kan då ske djup inne i betongen vilket försvårar upptäckt av degraderingsprocessen.

Då flödet av joniserande strålning utanför reaktortanken är högre hos tryckvattenreaktorer jämfört med kokarvattenreaktorer kan eventuell strålningsinducerad degradering förväntas uppkomma först i tryckvattenreaktorers biologiska skärmar. Konsensus inom publicerade rapporter pekar på att bestrålningen av betongstrukturer inte förväntas bli något problem under initialt avsedd drifttid, 40 år. Dock råder för närvarande osäkerhet kring bestrålningens effekter på betong vid förlängd drift upp mot en total drifttid på 60 år till 80 år. Emellertid ökar naturligtvis risken för strålningsinducerad degradering, speciellt om en samtidig effekthöjning sker i samband med förlängd drift.

Slutligen rekommenderas en fortsatt bevakning av pågående internationella projekt inom vilka strålningsinducerad degradering kartläggs. Huruvida strålningsinducerad degradering i betong kommer bli ett reellt problem, i första hand för biologiska skärmen, vid förlängd drift av ett kärnkraftverk kan förväntas besvaras inom en 5-års period baserat på redovisad planering för projekten.

2. Beteckningar

AMP	Aging management program
ASR	Alkalisilikatreaktion
BWR	Boiling water reactor
CF	Capacity factor
DOE	Department of Energy
EFPY	Effective full power years
EPRI	Electric power research institute
GD	γ -dos
IN	Intermediära neutroner
KN	Kalla neutroner
LH-cement	Långsamt härdande cement
LSK	Läckströmskorrosion
LTO	Long term operation
LWR	Light water reactor
LWRS	Light water reactor sustainability
NRC	Nuclear regulatory commission
PWR	Pressurized water reactor
SLR	Subsequent license renewal
SN	Snabba neutroner
SRS	Savannah River Site
TH	Tillståndshavare
TN	Termiska neutroner

3. Inledning

Majoriteten av befintliga kärnkraftverk, internationellt och i Sverige, konstruerades och uppfördes under 1960, 1970- och 1980-talet. Dessa konstruerades för en drifttid på 40 år och följaktligen har ett antal kärnkraftverk internationellt uppnått sin initiala avsedda drifttid. I Sverige finns både den äldsta och yngsta reaktorn i Oskarshamn samt i Forsmark. Äldsta reaktorn, Oskarshamn 1 (O1), byggdes åren 1966 – 1968 och togs i drift 1972. Därmed uppnådde O1 sin avsedda drifttid år 2012. De yngsta reaktorerna är Oskarshamn 3 (O3) och Forsmark 3 (F3) vilka uppfördes under åren 1981 – 1983 (O3) samt 1977 – 1985 (F3), där båda togs i drift 1985. Dessa uppnår sin initialt avsedda drifttid år 2025.

I samband med att kärnkraftverken blivit äldre och närmar sig avsedd drifttid har dess ägare, s.k. tillståndshavare (TH), ställts inför valet att projektera avveckling och nedläggning eller att uppgradera och ansöka om tillstånd för fortsatt drift och därmed utökad drifttid, s.k. förlängd drift (*eng.* long term operation (LTO)). Hittills har samtliga TH i Sverige valt att projektera för utökad drifttid och även i ett flertal fall samtidigt uppgraderat kärnkraftverken för ökat effektuttag. Således har det i Sverige under de senaste 20 åren pågått omfattande projekt med syfte att säkerställa fortsatt säker drift vid kärnkraftsanläggningarna under ökat effektuttag samt förlängd drifttid. Avsedd ytterligare drifttid är 20 år, det vill säga en total drifttid på 60 år vid slutet på det förlängda drifttillståndet. Internationellt pågår liknande processer där till exempel amerikanska strålsäkerhetsmyndigheten (U.S.NRC) givit fler än 70 anläggningar tillstånd för drift upp till 60 år de senaste 15 åren [1]. Pågående diskussioner idag mellan amerikanska TH och U.S.NRC gäller ytterligare förlängning av drifttiden med 20 år (*eng.* subsequent license renewal (SLR)), det vill säga en total drifttid på 80 år. Naturligtvis ökar kraven på TH att säkerställa kärnkraftsanläggningarnas integritet vid dessa långa drifttider varför omfattande program för hantering av åldrande system, strukturer och komponenter (s.k. aging management programs (AMPs)) har initierats och kommer att pågå under anläggningarnas återstående drifttid. Som en del i dessa AMPs ingår att värdera eventuell degraderande effekt av joniserande strålning på betongens mekaniska egenskaper.

I samband med uppgradering av kärnkraftverken för förlängd drifttid, beräknas och kontrolleras samtliga konstruktionsdelar vilka kan påverkas av eventuella nya driftparametrar under fortsatt drift. Det innebär till exempel att vissa konstruktionsdelar byts ut där det anses nödvändigt för att säkerställa att gällande krav uppfylls. Emellertid är vissa delar i en kärnkraftsanläggning inte praktiskt möjliga eller ekonomiskt försvarbara att byta ut. Däri ingår till exempel vissa delar av reaktorbyggnaden vilken till stor del utgörs av betong. Här krävs istället omfattande kontroller samt kunskap om hur betong påverkas av lokala miljöfaktorer under långa tider.

Den viktigaste betongkonstruktionen i en reaktorbyggnad är reaktorinneslutningen vilken har den primära uppgiften att skydda omgivningen från strålning både under normal drift men också vid extrema situationer så som vid till exempel rörbrott. Reaktorinneslutningen är således en lastbärande del av konstruktionen varför den måste tåla förhöjt inre tryck och förhöjd temperatur med bibehållen integritet. Andra betongkonstruktioner i en reaktorbyggnad är bassänger för uttjänt kärnbränsle och övrigt strålände avfall. Gemensamt för dessa betongkonstruktioner är dess funktion att verka som en barriär mot joniserande strålning. För betongen är miljöbetingelserna för vissa delar av en reaktorbyggnads betongkonstruktion likartade de som råder för reaktortanken. Dock har eventuell påverkan med avseende på främst strålningens degraderande egenskaper på betong baserats på experiment vilka inte är representativa för de miljöbetingelser och typer av betong som finns i lättvattenreaktorinnes-

lutningar (*eng.* light water reactor (LWR)). Denna brist upptäcktes under 00-talet varför det under senare år påbörjats forskningsprogram för att fylla dessa kunskapsluckor.

Under ogynnsamma förhållanden kan även läckströmmar vara potentiellt skadliga för armeringen i betong. Främst genom att strömmarna skapar potentialskillnader vilka kan leda till accelererad elektrokemisk korrosion, s.k. läckströmskorrosion. Detta fenomen har observerats i konventionella system och strukturer och ofta mycket lokalt. Den elektrokemiska korrosionen leder i förlängningen till att funktionen för systemet fallerar då till exempel täthet i rör upphör eller att den lastbärande förmågan hos armerad betong reduceras kraftigt på grund av korrosion i armeringen.

Syfte och uppdrag

Syftet med föreliggande litteraturstudie är att sammanställa aktuell och relevant kunskap relaterat till läckströmskorrosion med avseende på armering i betong samt strålningsinducerad degradering av armerade betongkonstruktioner i kärnkraftverk.

Avgränsningar

Föreliggande rapport är en litteraturstudie, således har ingen forskning eller utveckling bedrivits inom studien. Rapportens fokus ligger på beskrivningen av de degraderingsmekanismer i betong som kan antas vara kopplade till strålning från reaktorhärden samt från läckströmmar. Övriga degraderingsmekanismer orsakade av andra mekanismer beskrivs enbart översiktligt.

Omfattning, inriktning och definition

Föreliggande rapport omfattar följande:

- Sammanställa aktuellt kunskapsläge relaterat till strålningsinducerad degradering i betong och armering.
- Sammanställa aktuellt kunskapsläge kopplat till degradering av armering på grund av läckströmskorrosion.
- Beskrivning av mikrostrukturen i betong och dess ingående huvudkomponenter.
- Redovisning av gränsvärden för ackumulerad joniserande stråldos givna i standarder och normer.
- Översiktlig beskrivning av joniserande strålning och dess interaktion med atomstrukturen i betongen.
- Sammanfattning av aktuella internationella forskningsprogram inom vilka strålningsinducerad degradering i betong studeras.

Föreliggande rapport riktar in sig mot att beskriva de faktorer, mekanismer, material, kemiska reaktioner, fysikaliska förändringar vilka påverkar betongens mekaniska egenskaper när det exponeras för joniserande strålning eller verkar som ledare för läckströmmar.

Med ordet betong avses endast betongen, i annat fall benämns betongen som armerad betong.

Underlag

Föreliggande rapport har i huvudsak baserats på följande underlag:

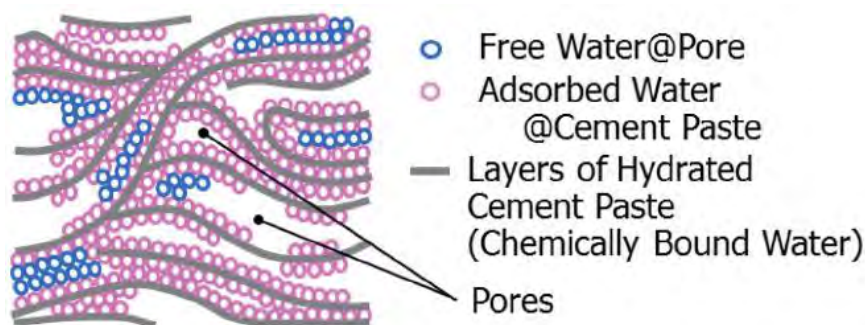
- Forskningsresultat publicerade i internationella vetenskapliga tidskrifter eller som konferensartiklar/presentationer på internationella konferenser.
- Uppdragsfinansierad forskning publicerad genom forskningsinstitut och finansierad av amerikanska strålsäkerhets- (U.S.NRC) och energimyndigheten (DOE).
- Utredningar och forskningsrapporter publicerade i svenska strålsäkerhetsmyndighetens (SSM/SKI) samt ELFORSKs regi.
- Examensarbeten samt nyhetsbrev publicerade inom pågående projekt eller av myndigheter.

4. Betong

Betong och armerad betong är i särklass det vanligaste konstruktionsmaterialet inom kärnkraftsbyggnad i Sverige och internationellt. Orsaken till detta är dess goda hållfasthetsegenskaper tillsammans med dess beständighet mot miljöbetingad påverkan under mycket långa tider. Det finns många varianter av betong beroende på valet av proportionerna mellan huvudkomponenterna och eventuella tillsatser. Detta gör det möjligt att designa materialet utifrån krav på till exempel hållfasthet, densitet, kemisk beständighet och strålningsdämpande egenskaper.

Mikrostruktur hos cement

Den specifika ytarean hos härdad cement anses vara $200 \text{ m}^2/\text{g}$ [2] och beskrivs ofta med hjälp av en modell med flera lager av härdad cement, se Figur 1. Avståndet mellan lagren är i storleksordningen nanometer. I fullt härdad cementpasta utgör porerna ca 20 % av dess totala volym.



Figur 1. Modell av härdad cementpasta. Källa Kontani et al. [3] med referens till Taylor [2].

Vattnet i cementpastan kan förenklat delas in i tre grupper beroende på hur starkt bundna vattenmolekylerna är till hydratiseringsprodukterna [2]. Första gruppen utgörs av fritt vatten vilket existerar i kapillära porer och har egenskaper som bulkvatten. Det fria vattnet kan på ett eller annat sätt frigöras från cementen. Den andra gruppen utgörs av vatten bundet till ytan av hydratiserade föreningar och har konsistensen av gel. Genom torkning i till exempel en ugn kan gel-vattnet och det fria vattnet frigöras från cementen. Den tredje gruppen utgörs av kemiskt bundet vatten, hårt bundet till hydratiseringsprodukterna. Det kemiskt bundna vattnet kan inte frigöras från cementen, genom till exempel torkning i ugn. Således kan vattnet i cementpastan klassificeras baserat på om det kan förångas eller inte; där fritt vatten och gel-vatten kan förångas medans kemiskt bundet vatten inte kan förångas.

Mikrostruktur hos ballast

Till skillnad från cementpasta utgörs ballast normalt av kristallstrukturerade mineraler. Ballasten innehåller även vatten, både som kan förångas samt kemiskt bundet vatten, men mängden vatten är givetvis mindre än hos cementpastan. Vatten som kan förångas kallas *absorberat vatten* och vatten som inte kan förångas kallas *kristallvatten*.

Ingående komponenter i betong samt hydratisering

Betong är en komposit bestående av i huvudsak tre olika komponenter, s.k. huvudkomponenter: *ballast*, *cement*, *vatten* och en jämförelsevis avsevärt mindre del *tillsatssämnen* bortsett ifrån armeringen. Nedan beskrivs de i betongen ingående huvudkomponenterna.

Ballast är krossat bergmaterial (sand, grus och sten) men även naturgrus används som fyllnadsmaterial. Krossballasten utgör oftast grovballasten och naturgrus utgör oftast finballasten. Dock råder det i allmänhet brist på naturgrus i Sverige och utvecklingen går mot en ersättning till krossprodukter även för finballasten [4]. Krossballasten består i Sverige oftast av granit vilken innehåller bergarterna kvarts, fältspat och glimmer. Storleken på ballastmaterialet ligger vanligtvis från ett 10-tal mm ner till tiondelar av en millimeter. Ofta tas ballasten ifrån en till byggnadsplatsen lokalt närliggande plats. Därför varierar betongens sammansättning på nationell nivå och ofta finns en koppling till lokala bergarter vid byggarbetsplatsen. Ballasten kan främst inverka på betongens egenskaper genom sin storleksfördelning med vilken framförallt betongens vattenbehov, bearbetbarhet och stabilitet påverkas. Det är viktigt att en jämn storleksfördelning av ballasten används för att få en optimal utfyllnad av betongen. Därigenom påverkas också betongen hållfasthet.

Cement består i huvudsak av finmalen kalksten, lera och en mindre del gips. Cement fungerar som ett hydrauliskt bindemedel eller ”lim”, det vill säga det hårdnar genom en reaktion med vatten, s.k. hydratisering, och bildar en mycket hård matris/bindemedel mellan ballasten. Kemiskt består cement av blandning mellan silikater (kemisk förening mellan kisel, syre, en eller flera metaller samt ibland väte) och oxider såsom aluminiumoxid, kalciumoxid, kalciumhydroxid och järnoxid.

Vatten tillsätts till torr cement och bildar en flytande formbar massa, s.k. cementpasta. Denna cementpasta fyller upp utrymmet mellan grus och stenar (ballasten) och får även denna att flyta mer obehindrat under fyllnadsprocessen under ifyllnad av gjutformar. Hållfastheten hos betongen är starkt beroende av förhållandet mellan mängden vatten och cement. Detta värde kallas vattencementtalet (vct). Mindre andel vatten ger ökad hållfasthet och ökad hållbarhet/slitstyrka. Nackdelen med lågt vct är att betongen blir en mer svårbearbetad produkt. Förklaringen till ökad hållfasthet och slitstyrka är att en större del av vattnet blir bundet till cementpastan och andelen fritt porvatten minskar. Vatten som inte reagerar med cementen bildar porer av fritt vatten och med högre porositet minskar hållfastheten i betongen.

Härdprocessen i betongen kan pågå i många år efter gjuttillfället vilket gör att en ökning av hållfastheten kan observeras långt efter att betongen stelnat. Under hela denna process behövs vatten för att hydratiseringen ska fortsätta. Efter 28 dagar har en större del av betongens hållfasthet erhållits varför man normalt brukar ange betongens hållfasthetsegenskaper vid just 28 dagar.

Under härdprocessen krymper cementpastan. Detta leder under ogynnsamma förhållanden till sprickbildning av ung betong då hållfastheten fortfarande är låg. Motverkande åtgärder för att minska risken för krympsprickor är att hålla betongen fuktig under initiala härdtiden. Sprickorna uppkommer på grund av inre spänningar då betongen torkar snabbare vid ytan jämfört med mer centrala delar av snitten.

Tillsatsämnen tillsätts för att erhålla önskvärda egenskaper. Vanligtvis delas dessa upp i tillsatsmedel och tillsatsmaterial.

Tillsatsmaterial kan bland annat vara flygaska och silikastoft. Flygaska är en restprodukt från kolpulvereldade kraftverk och består till största del av aluminiumsilikatglas. Flygaskan används delvis som en ersättningsprodukt för cement för att få en billigare och miljövänligare produkt. Silikastoft förbättrar betongens stabilitet och sammanhållning. Dock krävs en ökad vattenmängd vilket medför att olika tillsatsmedel kan behövas för att uppnå materialkraven, Burström [5].

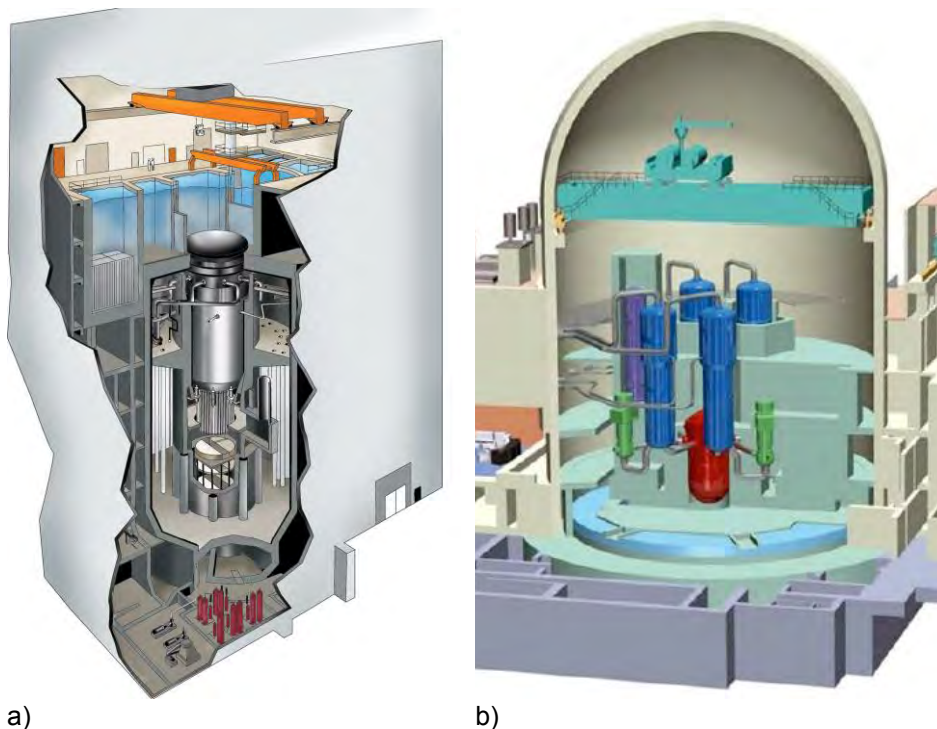
Tillsatsmedel kan ändra betongens egenskaper kraftigt vilket ger relativt goda möjlighet att styra härdprocessen och slutgiltiga materialegenskaper efter erforderliga krav. Accelererande/retarderande tillsatser påverkar härdtiden och därmed också hållfastheten. Krympreducerande tillsatser minskar cementpastans krympning under härdning och minskar således risken för krympsprickor. Luftporbildande tillsatser tillsätts för att erhålla frostbeständighet, dock på bekostnad av hållfasthet. Flyttillsatsmedel tillsätts för att göra betongen mer smidig samt lättare att kompaktera då vct är lågt.

Hydratisering/härdprocessen omfattar de kemiska processer som tar sin början när cement löses i vatten och slutligen stelnar till en hård stenliknande substans. När koncentrationen av cement i vattnet blir tillräcklig bildas en cementgel i fast fas vilken består av en förening mellan kalciumoxid, kiseldioxid och vatten s.k. kalciumsilikathydrat samt fri kalciumhydroxid (släckt kalk), Thomas och Jennings [6]. Med ökad mängd cementgel desto tätare blir betongen vilket får konsekvensen att vattentransporten till icke reagerat cement försvåras varvid processens aktivitet avtar med tiden. Därför sker hydratiseringen med hög hastighet initialt och fortsätter under avtagande hastighet varvid en utdragen process erhålls under vilken betongens mekaniska egenskaper utvecklas. Cementpastans hållfasthet, styvhet och krymp-egenskaper, bestäms främst av vattnets bindning till kalciumsilikathydraten (cementgelen), Naus [7].

Betongkonstruktioner utsatta för strålning i svenska kärnkraftsanläggningar

Informationen under denna rubrik är i sin helhet hämtade från SKI Rapport 02:58 [8] och SKI Rapport 02:59 [9].

De svenska kärnkraftverken har särskilda inneslutningskonstruktioner vars uppgift är att säkerställa täthet och förslutning vid skador och olyckor. Inneslutningen omger reaktortanken och närliggande konstruktioner som innehåller radioaktiva ämnen, se Figur 2. Vidare utgör inneslutningen den tredje och sista barriären för biologiskt strålskydd mot radioaktivitet. De ytterligare två barriärerna är bränslet och bränslestavarna, och därefter reaktortanken.



a) b)
 Figur 2. Översiktsbild av reaktorbyggnad samt reaktorinneslutning. a) BWR.
 b) PWR. Källa KSU.

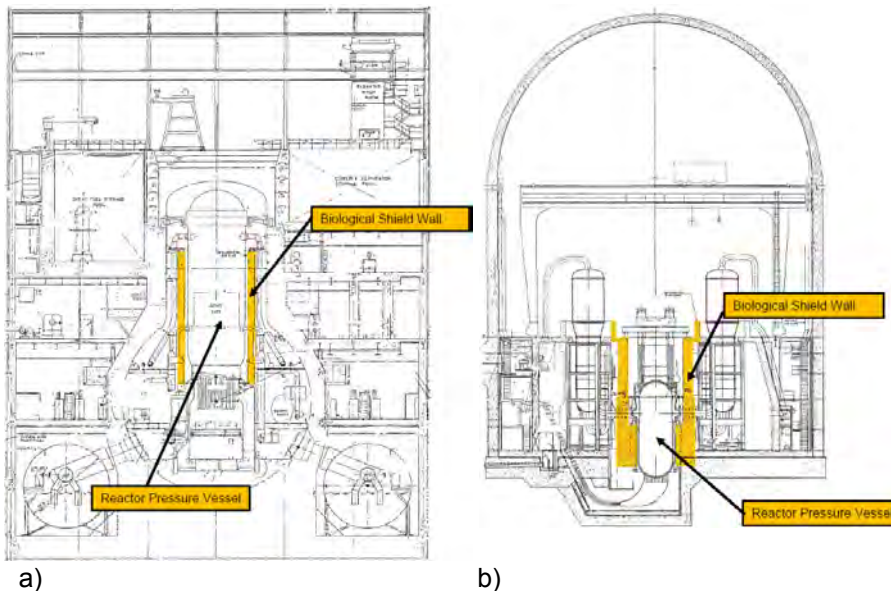
Utredningen [9] påpekar att det vid tidpunkten för uppförandet av kärnkraftsanläggningarna fanns i Sverige en mycket god samlad kunskap kring hur man utformar och bygger grova betongkonstruktioner. Samtliga svenska reaktorinneslutningar har gemensamma konstruktionsprinciper vilka sammanfattats enligt:

- Reaktorinneslutningen har en cylindrisk form med en diameter mellan 19 m – 25 m och står på en bottenplatta. Cylinderns övre del är täckt av en kupolformad eller koniskt formad del. Utformningen av överdelen och anslutningen mot bottenplattan skiljer mellan anläggningarna. Inneslutningarnas cylindriska vägg är gjutna i två koncentriska delar med en total tjocklek mellan 1.0 m – 1.5 m. Den inre koncentriska delen har en tjocklek på 0.2 m – 0.3 m och utgör ett missilskydd (inre missilskyddet) samt korrosionsskydd för tätplåten, vilken sitter ingjuten mellan den inre och yttre koncentriska delen. Den inre betongväggen har ingen lastbärande funktion, dock finns krav på att den ska klara det inre övertryck som kan uppstå vid haveri. Lastbärande enhet för inre övertryck vid haveri utgörs av den yttre betongkonstruktionen vilken är utformad för att klara laster i storleksordningen 0.5 MPa (5 bar). Den yttre betongkonstruktionen ansluter med sin inre sida direkt mot tätplåten.
- Samtliga inneslutningar i de svenska kärnkraftsanläggningarna består av efterspänd betong. Spännarmeringens uppgift är att förhindra dragspänningar i betongen vid haveri. Spännarmeringen ligger i horisontal- och vertikalled. Spännarmeringen i R2 – R4 och F1 – F3 ligger i foderrör som är injekterade med fettliknande produkter eller är torrluftsventilerade. Hos de övriga inneslutningarna O1 – O3 samt R1, ligger spännarmeringen i foderrör vilka är cementinjekterade. R1 har dock 18 stycken spännkablar på utsidan av inneslutningen som extra förstärkning då defekter upptäcks vid inspektion av betongen. Samtliga inneslutningar innehåller även slakarmering i hori-

sontal- och vertikal led.

- Tätplåten, vilken finns i alla inneslutningar, har till uppgift att förhindra utsläpp från inneslutningen vid ett haveri. Tätplåtens tjocklek är 4 mm – 8 mm och består av vanligt kolstål men i vissa fall förekommer även rostfritt stål. Tätplåten i kokarvattenreaktorernas (*eng.* boiling water reactor (BWR)) bottenplatta ligger på botten av kondensationsbassängen och är fritt exponerad. I R1 och O1 är även tätplåten fritt exponerad i de övre delarna av inneslutningen. Likaså gäller även det för tryckkokarvattenreaktorernas (*eng.* pressurized water reactor (PWR)) inneslutningar. Tätplåten mellan mantel och bottenplatta är sammanfogade via svets.

Närmast reaktortanken innanför inneslutningen sitter den s.k. biologiska skärmen vars funktion är att hindra spridningen av joniserande strålning, se Figur 3. Den biologiska skärmen är den del av reaktorinneslutningens betongkonstruktion som utsätts för högst exponeringsnivå. I flera av de svenska kärnkraftsanläggningarna delar reaktortanken och biologiska skärmen samma fundament.



a) b)
Figur 3. Översigtsbild av reaktorbyggnad samt reaktorinneslutning med tillhörande biologisk strålskärm. a) BWR. b) PWR. Källa Esselman och Bruck [38].

Betong i kärnkraftverk

Betongkvaliteter, vattencementtal, ballastens bergarter etc. för de svenska kärnkraftverken finns sammanställt i [9]. Typen av cement som använts för de flesta grova betongkonstruktioner i dessa anläggningar är långsamt hårdnade cement (LH-cement). Skälet till att LH-cement användes var att dess värmeutveckling är lägre än standardcement. Därmed minskade risken för sprickbildning på grund av temperaturdifferenser i betongen. LH-cementet hade mycket goda egenskaper vid tidpunkten för byggandet av kärnkraftverk, till och med bättre än vad som fanns tillgång till vid tidpunkten för utredningen [9]. För de senare byggda kärnkraftsanläggningarna användes andra betongkvaliteter och cement. Dock komprimerade man delvis detta genom val av högre nominella kvaliteter enligt [9].

Reaktorinneslutningarna i de svenska kärnkraftverken har olika specifikationer för betongen där även specifikationen varierar inom en anläggnings olika konstruktionsdelar såsom mellan reaktorinneslutningens tak, väggar och bottenplatta. Skillnaderna är emellertid relativt små inom och mellan anläggningarna. Tabell 1 sammanfattar översiktligt specifikationerna för betongen i de svenska reaktorinneslutningarna. Se [9] för en utförlig beskrivning av de svenska reaktorinneslutningarna, betongsammansättning, betongkvalitéer och armering.

Tabell 1. Sammanställning av betongspecifikationer för svenska reaktorinneslutningar. För specifika anläggningsdata, se SKI Rapport 02:59 [9].

	K30 – K40 för bottenplatta
Betongkvalitet	K40 – K55 för inre inneslutningsvägg
	K40 – K50 för yttre inneslutningsvägg
	K40 – K50 för tak
Cementtyp	LH Limhamn, LH Gullhögen, STD
Cementinnehåll / kg/m ³	Limhamn
Max stenstorlek / mm	250 – 470
Ballastens bergarter	32 (64)
Grus/Sand / kg/m ³	Gnejs, Uppsalaåsen, Naturgrus från lokalt sidotag
Sten / kg/m ³	530 – 1085
Vatten / kg/m ³	840 – 1170
Vct	135 – 250
28 dagars tryckhållfasthet / MPa	0.41 – 0.60
	32 – 71

En önskvärd egenskap hos reaktorinneslutningens betongkonstruktion samt hos den biologiska skärmen är hög absorptions- och spridningsförmåga, det vill säga moderering av neutronernas kinetiska energi. Hög absorption kan åstadkommas genom tillsättande av isotopen ¹⁰B (Boron 10) till betongen. Utredningarna [8] och [9] nämner inte något om eventuella tillsatser i betongen för ökad absorbering av strålning i de svenska kärnkraftsanläggningarna.

Degraderingsmekanismer inom betong

Alla material och så även betong bryts ner i ett längre tidsperspektiv. Hastigheten för degradingen är kraftigt beroende av miljön materialet befinner sig i men även vilka belastningar det utsätts för. Vidare är det en förutsättning att betongkonstruktionen är anpassad i dess sammansättning och håller en god kvalitet efter färdigställandet av konstruktionen. Till exempel utgör krympsprickor transportkanaler för nedbrytande ämnen vilka kan påverka betongen och armeringen.

De degraderingsmekanismer som förekommer i en betongkonstruktion samverkar vanligtvis med varandra och det kan vara svårt att avgöra kausaliteten dem emellan. Normalt delas degraderingsmekanismerna upp i *funktionsbetingad degradering* och *miljöbetingad degradering*. Funktionsbetingad degradering har sitt ursprung i de laster konstruktionen är designad för att bära. För reaktorinneslutningar vilka är konstruerade för mycket större laster än de vardagliga blir den funktionsbetingade degradingen sannolikt mer relaterat till tvång hos konstruktionen i samband med

termisk expansion på grund av naturliga temperaturvariationer och förändring i driftstemperatur i anläggningen.

För en mer fullständig beskrivning av degraderingsmekanismer och dess fysikaliska och kemiska processer hänvisas läsare till [10, 11].

Miljöbetingad degradering av betong

Miljöbetingad degradering, det vill säga degradering på grund av miljöfaktorer kan delas in i tre huvudkategorier, se nedan. Enligt [9] avses oftast korrosion av armering och andra korrosionskänsliga detaljer när man talar om degradering av betong. Majoriteten av de aktuella problemen handlar om samverkan eller brist på samverkan mellan betong, armering och ingjutningsgods. Betong i sig är mycket resistent mot miljöbetingad nedbrytning [9]. Nedan beskrivs de tre huvudkategorierna och ingående faktorer:

- *Fysikalisk nedbrytning* vilken i sin tur delas in i följande faktorer:
 - *Frostsprängning* vilket innebär att vatten tränger in i kaviteter, till exempel sprickor och andra hålrum, och sen expanderar när vattnet fryser till is. Förutsättningar för att denna mekanism ska vara aktuell är befintliga sprickor/hålrum samt att temperaturen i betongen sjunker under noll grader Celsius.
 - *Frysning och upptining* påverkar betongen genom att betongen alltid innehåller en delmängd porvatten. Vattnet kan innehålla salter och andra ämnen. Vid cyklisk temperaturskiftning kring noll grader Celsius vandrar vattnet mellan flytande fas och fast fas. Under denna process sker olika fysikaliska och kemiska reaktioner i betongen vilken under de första ca 10 cyklerna ökar hållfastheten men därefter minskar hållfastheten.

Motverkande åtgärder mot frostsador är att se till att betongen blir tät och att det bildas luftporer i betongen.
 - *Saltkristallisation* kan uppkomma i konstruktioner stående i vatten, särskilt i områden med stora tidvattenskillnader och i skvalpzoner. När vattennivån sjunker lämnas salt kvar i ytskiktet av konstruktionen. Saltet bildar sedan kristaller vid avdunstning av vattnet vilka växer och kan leda till spricktillväxt/spjälkning.
 - *Höga temperaturer* (> 180°C) ger förändringar i de mekaniska egenskaperna hos betong och därmed dess förmåga att bära last. Detta beror framförallt på att mängden porvatten och gel-vatten minskar vid ökande temperatur samt accelererande nedbrytning av ballast och cement (speciellt när stora skillnader föreligger i längdutvidgningskoefficienterna för ballast och cement). Se Naus [12] för sammanställning av experimentella resultat relaterat till temperaturökningar.
- *Kemisk nedbrytning* innebär alltid en samverkan mellan betongen och omgivande miljö eller mellan ingående komponenter i betong. Således är denna miljöfaktor beroende av de i betongen ingående kemiska ämnen.

Kemisk nedbrytning delas in i följande faktorer:

- *Karbonatisering* innebär att kalciumhydroxiden (kalk) i betongen reagerar med den i luften omgivande koldioxiden och bildar kalciumkarbonat. Denna process innebär ingen förlust av hållfastheten och är en naturlig åldringsprocess hos betong. Dock påverkas betongens förmåga att skydda armeringen från korrosion när karbonatiseringsfronten når in till armeringen. Det alkaliska porvattnet ($\text{pH} > 9.5$) ger armeringsjärnet ett stabilt skyddande oxidskikt och kalciumkarbonaten verkar neutraliserade på porvattnet. Därmed sjunker pH-värdet under 9 och varvid oxidskiktet bryts ner och korrosionsprocessen initieras. Vid korrosion bildas bland annat röd-brun rost vilken har 6 – 7 gånger större volym än metalliskt järn. Följden blir sprickbildning och spjälkskador och därmed påverkas hållfastheten.

Karboniseringshastigheten är mycket långsam i betong med vct lägre än 0.4 och normalt utsätts inte armeringen för korrosion. Vid vct högre än 0.7 går processen snabbare och sprickbildning/spjälkning kan uppstå redan efter 5 år vid tunna täckskikt. De svenska inneslutningarna har vct i omfånget 0.41 – 0.53 med ett undantag, bottenplattan i R1 har vct 0.6 [9].

- *Kloridangrepp* innebär att kloridjoner tränger in och förändrar den kemiska miljön i betongen. Klorider finns naturligt i klorerat vatten, vägsalter och luftburna salter. Det området med störst risk för angrepp är skvalpzonen där blandning av salter, vatten och luft är optimal [13]. Värt att nämna är att klorider utgör en katalysator i korrosionsprocessen, det vill säga de förbrukas inte utan fortsätter bryta ner stålets passiverade ytskikt och bidra till korrosion.
- *Alkalikiselreaktionen* (eng. ASR alt. AAR) är kemiska reaktioner mellan kalciumhydroxiden som finns i cement och kiselföreningar som finns i ballasten. Risken för denna typ av skadefaktor är störst för vissa sorter av ballast (till exempel opal, flinta, porfyr eller mylonit) som numera inte används för kvalificerade anläggningskonstruktioner i Sverige. De kemiska reaktionerna leder till en hård gel. Gelen har en större volym än de ingående substanserna vilket ger spricktillväxt. Karakteristiskt uppstår ett krackeleringsmönster på betongens yta. Sprickorna i betongen öppnar upp för andra degraderingsmekanismer vilket medför risk för minskad hållfasthet på sikt. Denna typ av skador finns rapporterade från svenska kärnkraftverk, dock ej från inneslutningskonstruktioner [9].
- *Sulfatangrepp* är den allvarligaste formen av saltangrepp. Sulfat kan förekomma i höga koncentrationer i vissa jordmåner. Sulfat tillsammans med vatten och kalciumhydroxid reagerar och bildar gips vilken i sin tur kombinerat med hydratiserad kalciumaluminat bildar ettringit. Ettringit har stor volym och skapar sprickor i betongen. Denna miljöbetingade faktor beror på lokala miljön, det vill säga om det förekommer sulfatrika miljöer i närmiljön. Ett vanligt exempel där sulfatangrepp förekommer är avloppsrör i betong, Clifton [14]. I Sverige används normalt endast s.k. sulfatresistent cement.

- *Urlakning* innebär att kalciumföreningar i cementpastan reagerar med olika ämnen som finns i direkt kontakt med betongen. Utfällningar bildas vilka tydligast kan ses i anslutning till sprickor. Störst risk för urlakning kan förväntas vid vattenfyllda rör och behållare, till exempel kyltornsbehållare.
- Ytterligare degraderingsmekanismer vilka kan förekomma i kärnkraftverkens inneslutningar är:
 - *Strålning* är en degraderingsmekanism vilken har potential att skapa kemiska förändringar i betongen. Det råder emellertid en osäkerhet inom vetenskapen kring vilka stråldoser som krävs för en mätbar effekt på hållfastheten. Experimentella resultat visar i vissa fall signifikanta förändringar av hållfastheten, i andra fall fås ingen eller ringa påverkan. Skademekanismen beskrivs i detalj under kapitel 8.
 - *Dehydrering* innebär en sänkning av betongens vatteninnehåll. Orsaken till dehydrering är till exempel en förhöjd temperatur eller ökad exponeringsyta. En accelererad dehydrering stärker hållfastheten hos betongen medan fukttransport och olika längdutvidgningskoefficienter mellan cement och ballast orsakar inre spänningar. Vid ofördelaktig kombination av ballast och cement kan således mikrosprickor uppstå. Måttlig temperaturhöjning, upp till ca 100°C, påverkar inte tryckhållfastheten nämnvärt jämfört med elasticitetsmodulen som sjunker [15].

Tabell 2 och Tabell 3 sammanställer ett antal miljöbetingade degraderingsprocesser och hur de primärt visar sig i betongen. Tabell 2 visar fysikaliska skademekanismer och Tabell 3 visar kemiska skademekanismer.

Tabell 2. Fysikaliska skademekanismer och dess primära manifestering. Källa Naus [11].

Fysikalisk nedbrytning – process	Primär manifestering
Saltkristallisering	Sprickor
Nedfrysning och tining	Sprickor, ytskador, vittring
Nötning, erosion	Ytskador, sektionsförluster
Termisk överlast, termisk cykling	Sprickor, ytsplittning
Joniserande strålning	Volymändring, sprickor
Utmattningsvibrationer	Sprickor
Sättning	Sprickor, förskjutningar, ytsplittning

Tabell 3. Kemiska skademekanismer och dess primära manifestering. Källa Naus [11].

Kemisk nedbrytning – process	Primär manifestering
Urlakning	Ökad porositet
Sulfatangrepp	Volymändring, sprickor
Försenad ettringitbildning	Volymändring, sprickor
Syror, baser	Vittring
Alkaliskreaktioner	Sprickor, vittring
Fosfatangrepp	Utfällning på ytan
Biologiskt angrepp	Ökad porositet, erosion

Tabell 2 och Tabell 3 visar att flera av skademekanismerna leder till sprickinitiering och spricktillväxt. Spricktillväxt är mycket vanligt förekommande i betongstrukturer och ca 75 % av upptäckt degradering består av sprickor, Naus [12]. Oberoende av

orsakerna till sprickorna så ökar risken för att salter, fukt och andra substanser tränger in i betongen och därmed uppstår en accelererad degradering av betongen, Kuhl et al. [16] och Bangert et al. [17].

5. Läckströmskorrosion på armering – allmän beskrivning

Läckströmskorrosion (LSK) definieras enligt Terminologicentrum [18] som en typ av elektrokemisk korrosion orsakad av läckström från elektrisk anläggning, till exempel nät för elenergiöverföring eller elektrisk bananläggning med någon del ansluten till jord. Utifrån denna definition kan en slutsats dras om att tre faktorer krävs för LSK ska uppstå:

1. *Fukt/vattenfas* är en förutsättning för elektrokemisk korrosion.
2. *Strömkälla*, det vill säga en elektrisk anläggning måste finnas.
3. *Elektrisk kontakt* via jord mellan strömkällan och det korroderande föremålet.

En mer pragmatisk definition av LSK ges av Metals Handbook [19]. Där definieras LSK som elektrokemisk korrosion orsakad av likström som väljer en annan väg än den avsedda.

De vanligaste miljöerna där LSK utvecklas är hos föremål nedsänkta i vatten eller i fuktig jord. Exempel på föremål i vatten är fritidsbåtar, där angrepp genom LSK förutsätter kortslutning eller jordfel i den elektriska utrustningen på båten [20]. Det vanligaste exemplet på LSK i fuktig jord är markförlagda rörledning som ligger nära och parallella med spårbunden trafik som drivs med likström.

Arten av ström som kan orsaka LSK kan delas in i tre grupper [21]:

- *Likström* är den vanligaste strömkällan som orsakar LSK, främst på grund av att polariteten är konstant i tiden.
- *Växelström* är en mer ovanlig källa till LSK. Vid växelström växlar polariteten vilket medför väsentligt långsammare korrosionshastighet.
- *Tellurisk ström* kommer från jordens magnetfält och uppstår vid transient geomagnetisk aktivitet. Sådan är normalt för kortvarig för att leda till LSK, men kan i undantagsfall påskynda korrosionsförlopp.

Vanliga strömkällor som kan leda till LSK är enligt [22]:

- *Spårbunden trafik* driven med likström, se exempel nedan i Figur 7.
- *Katodiska skydd* som kan generera läckströmmar från strömkällan.
- *Svetsarbete* som kan generera höga läckströmmar men normalt under begränsad tid.
- *Högspänningsledningar* som genererar läckströmmar genom elektromagnetisk induktion.

I de fall strömmen orsakas av elektromagnetisk induktion är de styrande faktorerna enligt [22]:

- Avstånd till primär och sekundära strömförande ledare.
- Orientering och position till primär och sekundära ledare.

Läckströmskorrosion är besläktat med galvanisk korrosion men förutsätter en strömkälla, inte bara kontakt med en annan metall. Normalt är skadorna lokala och koncentrerade till området där strömmen går ut ur komponenten. Vid höga strömmar kan allvarliga skador utvecklas inom några timmar till ett par veckor. Normalt krävs flera månader för att annan korrosion skall medföra några väsentliga skador. Exempel på typiskt utseende och snabba förlopp hos LSK visas nedan i Figur 4 – 5.



Figur 4. Exempel på LSK på rostfri propelleraxel som utvecklats inom 8 timmar. Jämför med opåverkat material i bildens övre högra hörn. Källa [21].



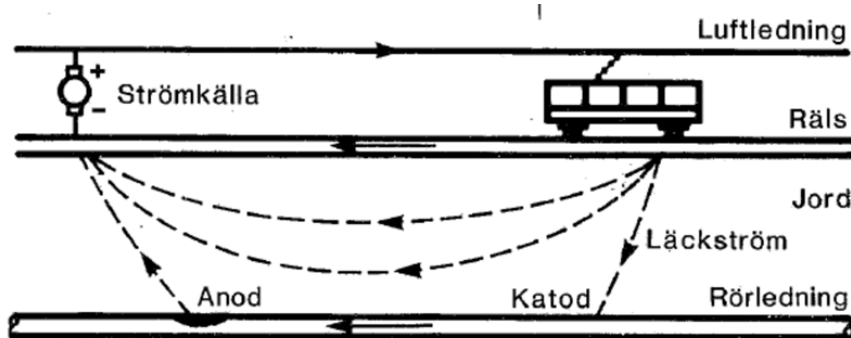
Figur 5. Exempel på utseende hos angrepp genom LSK på ett olegerat stål. Notera den lokala utbredningen. Källa [23].



Figur 6. Exempel på utseende hos angrepp genom LSK på ett rostfritt stål. Notera det lokala området med ett flertal gropar med släta ytor och snäcklikande form. Källa [20].

Läckströmskorrosion orsakas av strömmar som läcker ut i jord eller vatten från en ledare. Ett vanligt exempel på LSK återfinns i metallkonstruktioner som är belägna i närheten av, och som är parallella med, spårbunden trafik som drivs med likström i skenorna, se Figur 7. När ström leds i skenorna kan inte kontakt med omgivande mark helt förhindras. Den fuktiga jorden kommer då att transportera en del av strömmen mellan basstationer och jordningspunkter. Jord har hög resistans vilket

innebär att metalliska föremål nedgrävda i marken nära spåren kommer att fungera som en bättre ledare och transporterar huvuddelen av den ström som läcker ut i jorden. Korrosionsangrepp uppträder i det metalliska föremålet där strömmen lämnar objektet för att återgå till spåren. Där strömmen lämnar föremålet utvecklas en anodyta och korrosionshastigheten kan i ett sådant område bli hög. Denna yta är ofta begränsad vilket innebär att LSK normalt ger upphov till lokala angrepp och läckage inom korta tidsperioder [22, 24]. I Figur 8 finns en annan principskiss över LSK vid likströmsbana, men där det finns armerad betong i omgivningen.



Figur 7. Principskiss över LSK vid likströmsbana. Korrosionsangreppet sker vid anoden. Källa [24].

Styrande faktorer i detta exempel, men även för LSK generellt, är:

- *Kraften hos det elektriska fältet.* Korrosionshastigheten ökar med ökande kraft.
- *Avståndet mellan jordningspunkter.* Läckströmmar minskar med minskade avstånd mellan jordningspunkter.
- *Typ av jordning.* Effektiv jordning minskar risken för LSK.
- *Resistensen hos skenorna,* som i sin tur bestäms av tvärsnittet och strömöverföringen mellan skensektioner. Exempelvis erbjuder helsvetsade banor låg resistans. Risken för LSK minskar med minskande resistens hos skenorna.
- *Resistens mellan skenor och jord.* Ökande resistens leder till minskande andel läckströmmar i omgivande jord.

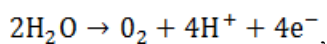
Läckströmskorrosion i armerade betongstrukturer

För att armering i betong skall angripas av LSK är följande förutsättningar nödvändiga enligt [25, 26]:

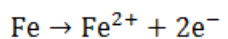
- Det måste finnas en tillräckligt kraftfull strömkälla.
- För armering som är helt ingjuten i betong måste tillräckligt mycket fukt finnas i porerna i betongen så att ström kan ledas in till armeringen.

- I de fall där strömmar i armering bildas genom induktion från elektriska magnetfält är fukt endast nödvändig vid anoden där strömmen leds ut ur armeringen.
- I de fall fukt är nödvändig är betongens grad av porositet en viktig faktor utom i de fall där betongen innehåller sprickor ned till armeringen. I de fall strömmen leds via fukt i porerna behöver det finnas sammanhängande porkanaler från ytan ned till armeringen. LSK förutsätter att läckströmmar kan nå armeringen via sammanhängande porsystem eller sprickor i betongen. Därför är en kritisk parameter betongens porositet vilken påverkas av vct där lägre vct ger minskad porositet [27].

Vad som talar emot LSK i armering i frisk betong är det starka passivskikt som utvecklas på armeringen därför att alkalisk och kloridfri betongen har ett högt pH-värde, $\text{pH} > 9$. Det krävs ett starkt elektriskt fält som verkar under lång tid för att bryta ner passivskiktet. Det elektriska fältet behöver generera en potentialskillnad av minst +600 mV, ofta +700 mV – 800 mV. Vid potentialer över +600 mV kommer anodreaktionen inledningsvis att generera syrgas och vätejoner enligt



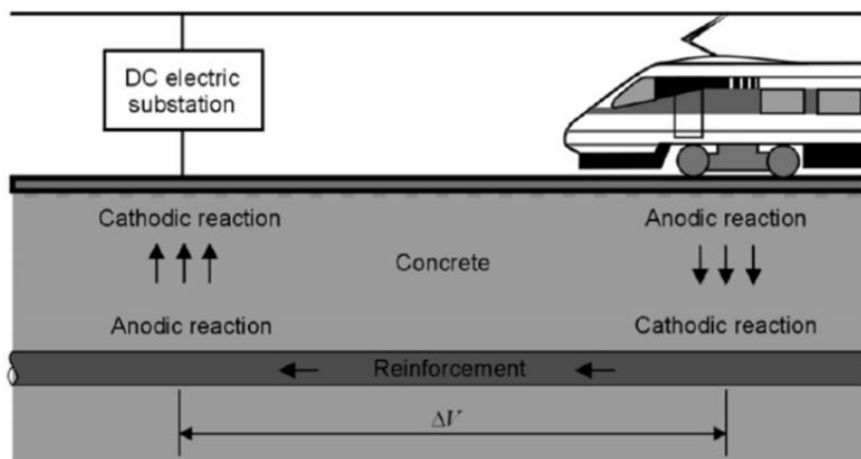
vilket inte innebär något korrosionsangrepp på metallen. Efter tillräckligt låg tid kommer emellertid pH-värdet vid anodytan att bli så lågt att anodreaktionen byter till upplösning av järn enligt



Normalt pH-värde i ”frisk” betong är 12 – 13. Betongens skyddande effekt kan försämrans av två mekanismer:

- *Karbonatisering* innebär att betongens pH-värde sjunker på grund av en reaktion med koldioxid i luften som leder till att hydroxid övergår till karbonat.
- *Kloridjoner* innebär att passivskiktet försvagas, vilket medverkar till angrepp genom både punktkorrosion och LSK.

I betong med låg alkalinitet eller som är förorenad av klorider behövs inte lika höga strömmar för att orsaka LSK [28].



Figur 8. Principskiss över LSK vid likströms-bana. Denna skiss motsvarar Figur 7 men här illustreras principen i armerad betong. Källa [28].

I svåra fall med starka strömkällor kan avskärmning av läckströmmar rekommenderas. I fall där detta inte låter sig göras rekommenderas övervakning med elektrokemisk mätteknik [29].

En icke försumbar strömkälla som omnämns i litteraturen är kraftöverföringen från Forsmark till Finland, den s.k. Fenno-Skan 1. Det är ett monopolärt system med en kapacitet av 550 MW vid en spänning av 400 kV, som skapar ett permanent och förhållandevis stort gradientfält i delar av Norra Uppland. Den kan förväntas generera läckströmmar i omgivande jord och vatten. Det finns påvisade korrosionsskador på komponenter i rostfritt stål som anses orsakade av LSK från Fenno-Skan 1 [30].

Flera källor hävdar att LSK från växelströmskällor i de flesta fall kan försummas. Erfarenhetsmässigt vet man att i andra korrosionsmedier krävs strömtätheter på ca 30 A/m² för att korrosion ska uppstå. Vattenmättad betong har uppskattningsvis en resistivitet på 100 mΩ vilket ger ett övergångsmotstånd på ca 30 Ω för en kvadratmeter stål i betong. Detta medför att stålets växelströmspotential måste uppgå till ca 900 V för att tillräcklig strömtäthet ska uppnås. Denna typ av spänningssättning av armeringen kan utslutas [31]. I [25] hävdas att den nödvändiga strömtätheten är 20 A/m² – 100 A/m². Det kan alltså behövas ännu högre strömtäthet än vad som anges i [31].

Kraftigt polarisering kan leda till så omfattande korrosion att armeringen sväller och därmed skadar omgivande betong [32]. Armering i kontakt med komponenter som har ett katodiskt skydd av påtryckt ström skyddas generellt mot korrosion. Undantaget är armering som inte står i metallisk kontakt med övrig armering. Sådana kan drabbas av accelererad korrosion genom läckströmmar som genereras genom elektromagnetisk induktion [27]. Läckströmmar kan generera väteförspredning vid katoden hos armering i höghållfast stål [25].

Om man rangordnar sannolikhet för LSK avseende omgivningen och alltså bortser från betongens kondition, fås följande rangordning med avtagande sannolikhet.

1. Armerade betongkonstruktioner under mark, det vill säga omgivet av jord.
2. Armerade betongkonstruktioner i vatten.
3. Armerade betongkonstruktioner i torr luft.

I fall 3 är LSK mycket osannolik även om den utsätts för läckströmmar.

För att göra en bedömning om risk för LSK finns i en specifik betongkonstruktions armering behöver följande faktorer klarläggas i nedanstående ordning:

1. Finns en strömkälla som kan ge tillräckligt höga strömmar direkt eller induktivt, för att påskynda ett korrosionsförlopp genom LSK?
2. Är betongen i god kondition avseende karbonatisering (pH-värde) och frihet från klorider?
3. Har betongen tillräcklig porositet för att leda ström från ytan in till armeringen?

Den mest effektiva åtgärden för att förhindra angrepp genom LSK i armering är att försäkra sig om att omgivande betong har ett högt pH-värde, och inte är förorenad av klorider. Om båda dessa kriterier är uppfyllda är sannolikheten för LSK liten även om konstruktionen utsätts för läckströmmar [25]. Efter en genomgång av data från litteratur över korrosion på armering är kloridinducerad korrosion den i särklass vanligaste följt av karbonatisering på en klar andraplats. Övriga korrosionstyper, till exempel LSK, är ovanliga.

Erfarenheter från LSK i armering i betong och rörledningar

En genomgång av litteraturen visar att majoriteten av dokumenterade korrosionsskador genom LSK har inträffat på rörledningar. Exempel på redovisade skador på armering i betong i den öppna litteraturen är mycket begränsad. Ett exempel från litteraturen är ett fall av läckage som inträffade i en markförlagd rörledning omgiven av spännarmerad betong. En utredning visade att armeringen var kraftigt angripen av korrosion. En medverkande faktor till skadan bedömdes vara LSK. Strömkällor var en kraftledning som korsar rörledningen där läckaget inträffat [33]. Ett annat exempel från litteraturen är ett fall av upprepade läckage från en markförlagd rörledning för brandvatten. Detta föranledde en omfattande utredning av orsaken. Elektrokemiska mätningar under längre tid visade onormalt stor potentialskillnad mellan rör och jord under vissa perioder. För övrigt påvisades normala egenskaper hos materialet i ledningen och inga korrosiva förhållanden i omgivande jord. Utredning visade att korrosionsangreppen orsakats av LSK. De oregelbundna topparna av hög potential kunde härledas till aktivitet från ett närliggande batteri för reservkraft [34].

6. Strålningsenergi och definitioner

Enheten elektronvolt (eV) är en vanligt förekommande enhet inom partikelfysik. Definitionen baseras på den energi eller arbete som åtgår för att föra 1 elektron genom en potentialdifferens på 1 volt (V). Elektronens laddning är 1.602×10^{-19} coulomb (C) och således blir $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} \equiv 1.602 \times 10^{-19} \text{ joule (J)}$.

Vid fission avges neutroner med ett spektrum av olika energinivåer; där energinivåer avser neutronernas kinetiska energi. Spektrumets komposition, när det når utanför reaktortanken och modereras av betongen i reaktorinneslutningen, beror av en mängd olika faktorer så som typ av kärnbränsle, typ av reaktor, materialval hos interndelar och reaktortank, modererande medium i reaktortanken, sammansättningen hos betongen etc. Konsekvensen blir således att kompositionen hos neutronspektrumet vid en viss punkt utanför reaktortanken är relativt individberoende, det vill säga olika för olika kärnkraftsanläggningar.

I litteraturen delas neutronstrålning normalt upp i tre grupper baserat på dess kinetiska energi. Detta tre grupper är; (1) *termiska neutroner* (TN), vilka har en energinivå lägre än 0.5 elektronvolt (eV); (2) *intermediära neutroner* (IN) med energinivå omkring 0.05 MeV; (3) *snabba neutroner* (SN), vilka har en kinetisk energi större än 0.5 MeV, Kaplan [35]. Störst inverkan på betongen genom strålningsinducerad degradering har kategori (2) och (3), det vill säga IN och SN. I studier av degraderingen hos betong refereras oftast till de snabba neutronerna och ibland till de intermediära neutronerna; termiska neutroner anses inte kunna bidra till förändring i atomstrukturen. Gränserna för dessa tre grupper är inte definitiva, det vill säga de kan variera mellan olika studier. Mycket vanligt förekommande är också att definiera SN vid energinivån 0.1 MeV.

Definitionsmässigt skiljs neutronflödet från dess fluens där flödet har enheten $n/(\text{cm}^2\text{s})$, det vill säga antal neutroner per area- och tidsenhet. Fluens är ackumulerat flöde över tiden, det vill säga flödet integrerat över tiden, enhet n/cm^2 . Kopplat till strålningsinducerad degradering i betong används neutronfluens som begrepp för att beskriva total stråldos med vilken betongen blivit utsatt för.

För att beskriva absorberad dos γ -strålning används i dag SI-enheten Gray (Gy). 1 Gy motsvarar en absorberad energi av storleken 1 J/kg. SI-enheten Gy har ersatt den äldre enheten rad med sambandet $1 \text{ Gy} \equiv 100 \text{ rad}$.

7. Exponeringsnivåer i reaktorinneslutning, biologisk skärm och bassänger för lagring av högaktivt material

Huruvida strålningssinducerad degradering är eller kommer bli en degraderingsmekanism nödvändig att beakta styrs dels av nivån hos strålfödet och dess ackumulerade fluens under avsedd drifttid, dels av eventuell definierbar tröskelnivå/gräns (*eng.* cutoff energy) för energinivån i strålningen över vilken degradering kan förväntas/mätas, [1]. Ett fåtal rapporter summerar data med syftet att uttolka en generell nivå på neutronfluensen och dos av γ -strålning med vilka biologiska skärmen samt bassängerna utsätts för, Mirhosseini [36] och Fillmore [37]. Gemensamt för rapporterna [36, 37] är svårigheten att hitta en absolut nivå på grund av stor spridning mellan olika kärnkraftsanläggningar. Orsaken till denna spridning är att strålspektrumet är beroende av ett flertal faktorer (typ av kärnbränsle, typ av reaktor, materialval i interndelar och reaktortank, modererande medium i reaktortanken, betongsammansättning etc.) vilket gör spektrumet relativt unikt för varje kärnkraftsanläggning. Dock, en sammanställande rapport har nyligen publicerats angående de amerikanska kärnkraftverken, se Esselman och Bruck [38].

Information kring neutronfluens och dos av γ -strålning i de svenska reaktorinneslutningarna eller bassängerna för kärnbränsle och avfall har inte gått att finna i litteraturen. Således redovisas här data från internationella rapporter.

Generellt och gemensamt för samtliga kärnkraftsanläggningar är att biologiska skärmen är den betongkonstruktion som är närmast reaktorhärden och därmed exponeras den för de högsta nivåerna av neutron- och γ -strålning. Acevedo och Serrato [39], se Figur 2 och Figur 3. Bassängernas betongkonstruktion utsätts inte för någon nämnvärd nivå av neutronstrålning då liten eller ingen fission pågår här, Naus [40]. Emellertid, exponeras betongen i bassängerna fortfarande för signifikanta nivåer av γ -strålning och därtill kopplad uppvärmning. Redovisade data för doser av γ -strålning är i princip obefintlig i litteraturen vilket stöds av [40]. Dock faller det sig naturligt att exponeringsnivåerna av joniserande strålning är lägre än de doser biologiska skärmen exponeras för, [39, 40]. Tabell 4 redovisar exponeringsnivåer kopplade till bassänger i Savannah River Site (SRS). Fluensen har beräknats med antagande om konstant flöde av γ -strålning. På grund av de lägre exponeringsnivåerna i bassängerna har primärt fokus riktats mot biologiska skärmen.

Tabell 4. Exponeringsnivåer i bassänger för lagring av högaktivt material. Källa Acevedo och Serrato [39].

Anläggning	Flöde	Fluens (60 år)
Savannah River Site	< 0.001 Gy/h med lokala maxima om 0.75 Gy/h och 1.34 Gy/h.	< 526 Gy med lokala maxima om 3.94×10^5 Gy och 7.04×10^5 Gy.

Tabell 5 redovisar data för exponeringsnivåer kopplade till reaktorinneslutning och biologiska skärmen. Kolumn 4 och 5 redovisar en extrapolering av neutronfluensen och total dos γ -strålning för 60 års respektive 80 års drifttid med antagande om konstant strålföde; dessa möjliggör en jämförelse mellan olika refererade data. I de fall ingen anläggning refereras till återger angivna data rapportens uttryck för vad som är en generell ackumulerad exponeringsnivå. I vissa fall uppges inte om BWR eller PWR avses.

Tabell 5. Exponeringsnivåer för biologiska skärmen i reaktorinneslutningen. Intermediära neutroner (IN), snabba neutroner (SN), γ -dos (GD).

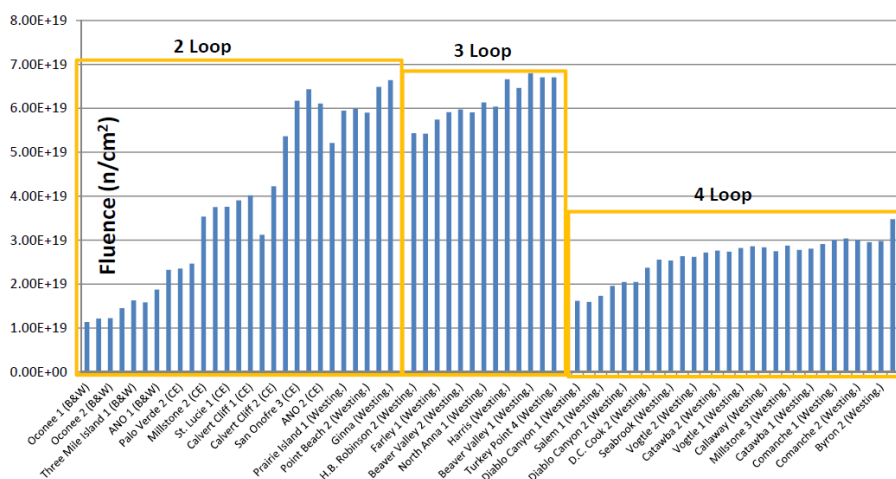
Anläggning	Flöde $n/(cm^2s)$	Fluens / (år) n/cm^2 alt. Gy	Fluens 60 år n/cm^2 alt. Gy	Fluens 80 år n/cm^2 alt. Gy	Ref. -
-	-	$> 5 \times 10^{19}$ / (40)	$> 7.5 \times 10^{19}$	$> 1 \times 10^{20}$	[41]
-	-	IN 6×10^{19} / (30) SN 3×10^{19} / (30) GD 10^9 / (30)	IN 12×10^{19} SN 6×10^{19} GD 2×10^9	IN 16×10^{19} SN 8×10^{19} GD 2.7×10^9	[42]
BEPO, England (grafitmodererad luftkyld reaktor)	3×10^{11}	3.8×10^{20} / (40)	5.7×10^{20}	7.6×10^{20}	[43]
PWR, Temelin Tjeckien	7.22×10^{-4} Gy/s	GD 3.5×10^5 / (40)	GD 5.5×10^5 SN 3×10^{18} (E > 0.1 MeV)	GD 7.3×10^5	[44]
Generellt BWR	-	-	-	-	[45]
Generellt PWR	SN 3.17×10^{10} (E > 0.1 MeV) 0.63 Gy/s	SN 4×10^{19} / (40) GD 8×10^8 / (40)	SN 6×10^{19} GD 1.2×10^9	SN 8×10^{19} GD 1.6×10^9	[46]

Naus et al. [11] redovisar uppskattade strålningsfluenser utförda av Electric Power Research Institute (EPRI) gällande både BWR och PWR med 80 % kapacitetsutnyttjande (*eng.* capacity factor (CF)) antaget, se Tabell 6. Fluenserna är övre skattade nivåer varför dessa sannolikt inte nås i en verklig inneslutningsmiljö, där luftspalter, isolering etc. finns mellan reaktortank och betongstrukturen enligt [11].

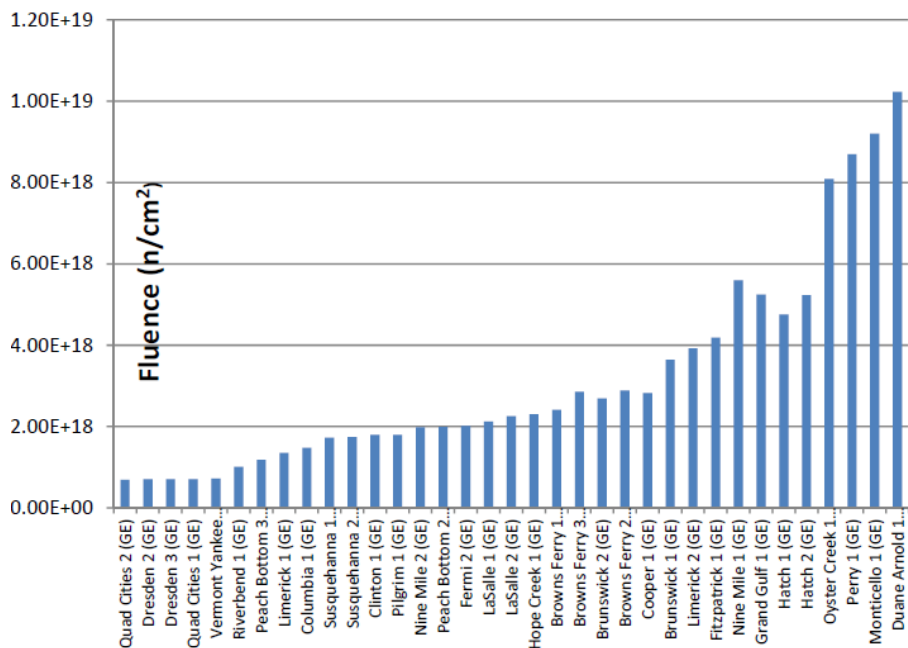
Tabell 6. Uppskattade strålningsfluenser direkt utanför reaktortanken. 80 % CF har antagits. Intermediära neutroner (IN), snabba neutroner (SN), γ -dos (GD). Källa Naus et al. [11].

	BWR			PWR		
	40 år	60 år	80 år	40 år	60 år	80 år
	32	48	64	32	48	64
	EFPY	EFPY	EPFY	EFPY	EFPY	EPFY
IN ($E < 1.0$ MeV) / n/cm^2	3.7×10^1 ₈	5.6×10^1 ₈	7.5×10^1 ₁₈	2.0×10^1 ₉	3.0×10^1 ₉	4.0×10^1 ₉
SN ($E > 1.0$ MeV) / n/cm^2	5.1×10^1 ₇	7.7×10^1 ₇	1.0×10^1 ₁₈	1.0×10^1 ₈	1.5×10^1 ₈	2.0×10^1 ₈
GD / Gy	1.6×10^8	2.4×10^8	3.2×10^8 ₈	4.7×10^7	7.0×10^7	9.3×10^7

PWR ger generellt ett högre strålningsflöde utanför reaktortanken jämfört med BWR, Busby [48] and Remec [49]. Inom gruppen PWR observeras de högsta strålningsnivåerna utanför reaktortanken hos system med två reaktorkylkretsar. Strålningsnivåerna sjunker med antalet reaktorkylkretsar och lägst nivåer observeras hos reaktorer med fyra reaktorkylkretsar [49]. Detta bekräftas också av den nyligen publicerade rapporten [38], se Figur 9 och Figur 10.



Figur 9. Sammanställning av extrapolerad exponeringsnivå på utsidan av reaktortanken hos amerikanska PWR vid 80 års drift (73.6 EPFY) med $E > 0.1$ MeV. Källa Esselman och Bruck [38].



Figur 10. Sammanställning av extrapolerad exponeringsnivå på utsidan av reaktortanken hos amerikanska BWR vid 80 års drift (73.6 EPFY) med $E > 0.1$ MeV. PWR. Källa Esselman och Bruck [38].

I [38] har exponeringsdata sammanställs från TH på insidan av reaktortanken och därefter extrapolerats i tiden till 80 års drift med antagande om 92 % CF och konstant strålföde, det vill säga 73.6 EPFY. Vidare beräknas exponeringsnivåerna på utsidan av reaktortanken och insidan av biologiska skärmen baserat på data från insidan av reaktortanken baserat på US Regulatory Guide 1.99 [50, 51]. Denna metod är verifierad analytiskt i rapporterna [49] och [52]. De svenska PWR reaktorer R2 – R4 har tre reaktorkylkretsar.

Enligt [48] förväntas endast PWR enheter vara potentiella för strålningsinducerad degradering till den grad att påverkan på hållfastheten kan förväntas/mätas. I USA misstänker man att det föreligger *risk* för påverkan av hållfastheten i fyra PWR anläggningar vid LTO och 80 års – 100 års drift [48].

Simuleringar av strålfödet genom reaktortankvägg, mellanliggande luftspalt samt betongvägg (biologiska skärmen) för PWR med två respektive tre kylkretsar har nyligen genomförts inom Oak Ridge National Laboratory (ORNL) [49]. Syftet är att undersöka nivån på neutronfluens och γ -dos med vilken betongen utsätts för under LTO upp till 80 år och längre. Tabell 7 redovisar neutron- och γ -flöden för betong och reaktortank i PWR med tre reaktorkylkretsar. I Tabell 7 och Tabell 8 definieras $SN > 1$ MeV, $IN > 0.1$ MeV samt $TN < 0.41$ eV.

Tabell 7 ger att neutronflödet av SN i biologiska skärmen är 70 % – 80 % av maximala flödet genom reaktortanken. Det maximala neutronflödet mäts normalt sett som en del i övervakningsprogrammet för reaktortanken [49]. Således kan redovisade data i Tabell 7 data användas som en konservativ uppskattning av exponering vilken betongen i biologiska skärmen utsätts för [1].

Tabell 7. Exponeringsnivåer för reaktortank och biologiska skärmen i reaktorrinneslutningen. Skuggad area anger data för PWR med tre reaktorkylkretsar, övriga gäller PWR med två reaktorkylkretsar. Källa Remec [49].

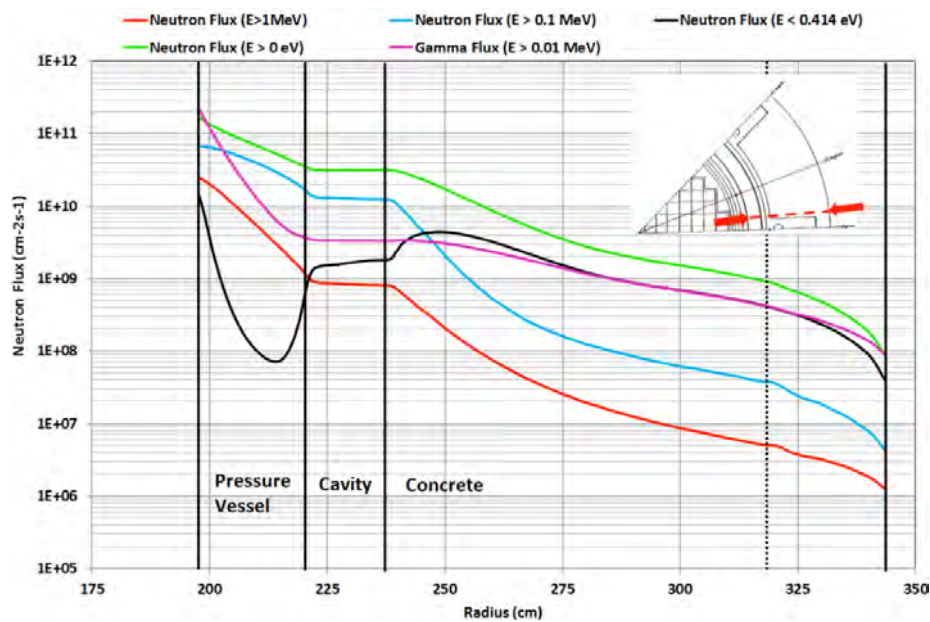
Tröskelnivå	Typ av PWR	Neutronflöde / n/(cm ² s)				γ-flöde / Gy	
		E > 1 MeV (SN)	E > 0.1 MeV (IN)	E < 0.41 eV (TN)	E > 0 eV	E > 0.01 MeV	
I reaktortanken eller i position med maxvärde.	Två kylkretsar	3.58×10 ⁹	3.04×10 ¹⁰	3.06×10 ⁹	6.77×10 ¹⁰	9.53×10 ⁹	
	Tre kylkretsar	1.04×10 ⁹	1.43×10 ¹⁰	1.08×10 ⁹	3.09×10 ¹⁰	3.29×10 ⁹	
I betongen i punkt med största temperaturökningen.	Två kylkretsar	2.79×10 ⁹	2.41×10 ¹⁰	4.64×10 ⁹	6.29×10 ¹⁰	9.08×10 ⁹	
	Tre kylkretsar	7.49×10 ⁸	1.13×10 ¹⁰	2.24×10 ⁹	3.10×10 ¹⁰	3.37×10 ⁹	
Kvot mellan data för reaktortank och betongen.	Två kylkretsar	0.78	0.79	1.52	0.93	0.95	
	Tre kylkretsar	0.72	0.79	2.08	1.00	1.02	

Tabell 8 visar antal möjliga år (kalenderår) tills en viss fluens uppnås i biologiska skärmen. Här har data från Tabell 7 använts samt 92 % CF antagits [49]. Förutom total neutronfluens (E > 0 eV) visar Tabell 8 antal kalenderår till ackumulerade fluens motsvarande kritiska nivåer för SN och IN. Här observeras att PWR med tre reaktorkylkretsar uppnår fluensen 1×10¹⁹ n/cm² efter 30 år och fluensen 5×10¹⁹ n/cm² efter 152 år då IN och SN beaktas. Används hela neutronspektrumet, det vill säga E > 0 eV, blir motsvarande drifttid 11 år respektive 56 år. För γ-strålning med E > 0.01 MeV blir drifttiden 172 år innan ackumulerad dos på 1×10⁸ Gy uppnås. Dessa resultat visar på betydelsen av att specificera en tröskel för strålningens energiinnehåll (cutoff energy) under vilken ingen degradering anses uppstå eller kan mätas. De kritiska nivåerna 1×10¹⁹ n/cm² för neutronfluens och 1×10⁸ Gy för dos av γ-strålning härrör från samlade data i litteraturstudien Hilsdorf et al. [41]. Under de kritiska nivåerna av ackumulerad strålning kunde ingen signifikant förändring av tryckhållfastheten observeras. Dessa nivåer [41] har under senare år dock ifrågasatts, se kapitel 8.

Tabell 8. Antal driftår (kalenderår) för att nå en viss ackumulerad fluens (92 % CF). Källa Remec [49].

Fluens eller dos	Typ av PWR	Tröskelvärde för neutronflöde			γ -dos E > 0.01 MeV
		E > 0 eV	E > 0.1 MeV	E > 1 MeV	
1×10^{19} n/cm ²	Två kylkretsar	5	14	123	
	Tre kylkretsar	11	30		
5×10^{19} n/cm ²	Två kylkretsar	27	71		
	Tre kylkretsar	56	152		
10×10^{19} n/cm ²	Två kylkretsar	55	143		
	Tre kylkretsar	111			
1×10^8 Gy	Två kylkretsar				70
	Tre kylkretsar				172

Fördelningen av neutronflödet och γ -strålningen genom reaktortank, luftspalt och betongen (biologisk skärm) visas i Figur 11. Figur 11 visar också nivåerna på neutronflödet med olika energinnehåll. Neutron- och γ -flödet avtar generellt med avståndet från insidan av reaktortanken. Notera dock den badkarsformade fördelningen av TN i reaktortankväggen samt det lokala maxima 8 – 10 cm in i biologiska skärmen. Lokalt maximum i betongen orsakas av en kraftig spridning/inbromsning av IN och SN varvid dessa övergår till TN [49].



Figur 11. Neutron och γ -flödesfördelningar vs avstånd från härden i radiell riktning i en PWR med tre reaktorkylkretsar. Infälld bild visar placering av snitt genom reaktortank och biologisk skärm plottade på ordinaten. De olika kurvorna visar flöden med olika energinivåer enligt parenteser överst i figuren. Källa Remec [49].

Majoriteten TN skapas genom spridning/inbromsning av IN och SN där TN har ett nästan isotropt flöde till skillnad från IN och SN vilka har uttalad riktning för sin rörelse. Det vill säga sannolikheten att en TN rör sig i en specifik riktning är lika stor i alla riktningar. En delmängd av TN studsar därför tillbaka ut ur betongen och tränger in i reaktortankväggen genom utsidan vilket orsakar den badkarsliknade fördelningen. Samma fenomen kan observeras i bränslekutsarna.

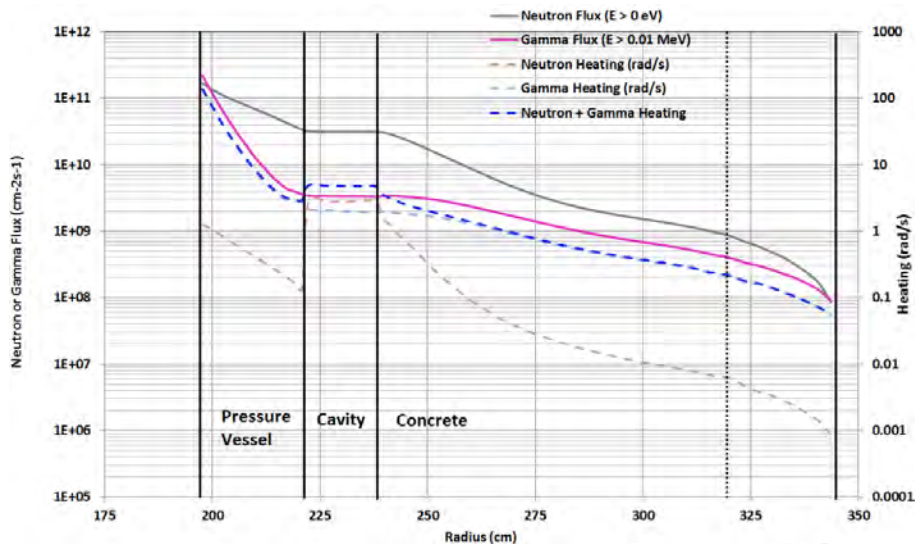
Figur 12 visar utvecklad värmeeffekt på grund av modereringen av neutron- och γ -strålning. Här ses bland annat en ökad avgiven värmeeffekt i luften från neutronflödet då luftmolekylerna är lättare jämfört med övriga omgivande material [49]. Avgiven värmeeffekt är även högre i betongen närmast reaktortanken jämfört med utsidan på reaktortanken, det vill säga temperaturen är lokalt högre i betongen jämfört med utsidan av reaktortanken.

Ett antal intressanta observationer och kommentarer görs i [49] gällande neutron- och γ -strålningens karakteristik i regionen reaktortank, kavitet och biologisk skärm gällande PWR. Nedan redovisas ett urval av observationerna:

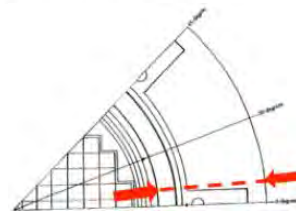
- SN och IN flöden på utsidan av reaktortanken är 20 % – 30 % högre än observerat flödesmaximum i biologiska skärmen. Dessa flödesnivåer är utvärderade vid punkten för maximalt flöde i reaktortanken och beskrivs typiskt i statusrapporter för övervakning av reaktortanken. Dessa data kan användas för konservativa uppskattningar av joniserande strålföden i biologiska skärmen.
- Variation i omkretsled hos det joniserande strålfödet beror kraftigt på utformningen av hård-reaktortank-biologiska-skärmgeometrin. Därför kan uppmätta exponeringsdata på olika positioner kring reaktortanken variera

kraftigt och korrigeringar kan vara nödvändiga. Dock är strålfördet relativt konstant i vertikalled, i centrala området, kring härden vilket minskar nödvändigheten att korrigera för vertikal position.

- Ingen information kan utvärderas från normaliserad neutronfluens för SN ifrån olika experiment om inte en detaljerad beskrivning av experimenten finns. Det vill säga för att kunna dra slutsatser ifrån jämförelser mellan olika experiment måste hänsyn tas till geometri, position för mätning, temperatur etc.



Figur 12. Radial variation hos avgiven värmeeffekt i en PWR med tre reaktorkylkretsar. Variationen är tagen i från position enligt bild till höger. Positionen motsvarar approximativt vinkeln för maximal avgiven värmeeffekt till betongen. Notera att värmeeffekten anges i enheten rad/s vilket motsvarar watt (W) [1 rad/s \equiv 0.01 W]. Källa Remec [49].



Gränsvärden för joniserande strålning i normer och standarder för betong

I de fall gränser för neutronfluens och ackumulerad dos av γ -strålning finns angivna i normer och standarder baseras dessa i huvudsak på resultaten som finns sammanställda och presenterade i litteraturstudien [41] publicerad år 1978. Gränserna sattes för att *reducera risken* för degradering av betongens egenskaper då forskningsresultaten inte var entydiga vilket kan observeras som något varierande gränsvärden i olika standarder, se även [36, 37].

- ASME *Pressure Vessel and Piping Code* (Section III, Division 2) (ASME 2010) föreskriver en gräns för neutronfluens på 1×10^{20} n/cm².

- American National Standards Institute (ANSI/ANS 2006a) föreskriver gränserna 1×10^{19} n/cm² för neutronfluens och 1×10^8 Gy (1×10^{10} rad) för ackumulerad dos γ -strålning. Över dessa nivåer sker en degradering av betongens tryckhållfasthet samt elasticitetsmodul, enligt ANSI/ANS 2006a.
- Den brittiska *Specification for Prestressed Concrete Pressure Vessels for Nuclear Reactors* (British Standard Institute 1973) påpekar att neutronfluenser under 5×10^{19} n/cm² sannolikt inte ger någon signifikant degradering i betong.

I Japan har nivåerna 1×10^{20} n/cm² för SN och 2×10^8 Gy (2×10^{10} rad) för GD använts som gränsvärden baserade på [41]. Betongstrukturer bestrålade under dessa gränser har betraktats som en struktur med bibehållen integritet [47].

8. Strålningsinducerad degradering i betong

Neutron- och γ -strålning är de två typerna av indirekt joniserande strålning vilka betongen i reaktorinneslutning har till uppgift att moderera och avskärma. Betong har effektiva egenskaper att verka som barriär för att begränsa strålningen.

En gemensam underliggande faktor för degraderingsmekanismer i betong är uppkomsten av volymförändring i ballast och cement. Volymförändringen leder till inre spänningar i betongen med resultatet att sprickor ofta bildas i betongen. Detta gäller även för strålningsinducerad degradering där det generellt observeras en krympning av cementfasen jämfört med ballasten som ökar i volym. Tiden för att bygga upp tillräckligt hög spänning för att driva en spricka genom materialet är i fallet strålningsinducerad degradering beroende av strålfödet. Högre strålföde ger en högre temperaturutveckling i betongen och en snabbare degraderingsprocess. Temperaturinducerad degradering redovisas inte i föreliggande rapport. Dock finns en nära koppling mellan moderering av strålning och värmeutveckling. Inte nödvändigtvis med avseende på de degraderingsmekanismer de orsakar men moderering av joniserande strålning implicerar temperaturutveckling per automatik. Detta har i flera fall orsakat problem vid experimentell verksamhet i tidiga studier då strålningsinducerad degradering, ofta accelererade experiment (det vill säga höga strålföden), ger hög/ökad temperatur vilken inte har uppmätts eller kontrollerats genom till exempel kylning. Resultater från experimentella data blir då mindre värdefulla på grund av svårigheterna med att separera effekten av de två degraderingsmekanismerna. En vidare följd blir också att temperaturen under experimenten inte överensstämmer med den miljöproven ska efterlikna. För vidare information om temperaturens påverkan på betong hänvisas till [7] och [15].

Här kan nämnas att maxtemperaturen med vilken betongen i en reaktorinneslutning får utsättas för enligt amerikanska ACI 349, vilken även används i Sverige, är 65°C under drift. Lokalt får dock temperaturen uppgå till 93°C, till exempel kring rörgenomföringar. Dessa gränser tillämpas även i Japan, [45].

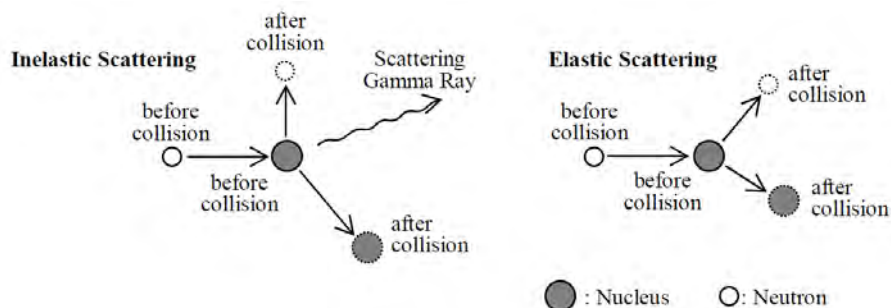
Inom ramen för U.S.NRC publicerades nyligen en litteraturstudie rörande strålningsinducerad degradering i betong [54]. Studien berör, förutom aktuella områden inom föreliggande rapport, områden såsom beräkningsmodeller för strålningsinducerad degradering samt teknik och metoder för bedömning av strålningsinducerad degradering. Rapporten [54] är framtagen som underlag för framtagandet av en ny föreskrift gällande bedömningar av strålningsinducerade skador i betong.

Interaktion mellan neutronstrålning och material

Moderering och avskärmning av neutronstrålning kan delas upp i två mekanismer hos en barriär; dessa två mekanismer är *spredning* och *absorption*. Figur 13 visar de två mekanismerna schematiskt.

När en snabb neutron (SN) kolliderar med en tyngre atomkärna förlorar neutronen en del av sin energi genom att den absorberas av den tyngre atomkärnan. Neutronen fortsätter sedan iväg från atomkärnan med en lägre kinetisk energi och betecknas

intermediär neutron (IN). Vid dessa kollisioner frigörs γ -strålning när atomkärnan deexciteras, efter den tidigare exciteringen vid kollisionen, och samtidigt flyttar sig den tyngre atomen en viss sträcka. Denna process kallas för in-elastisk spridning, Kontani et al. [53].



Figur 13. Visualisering av in-elastisk och elastisk kollision mellan en neutron och en atomkärna. Källa Kontani et al. [53].

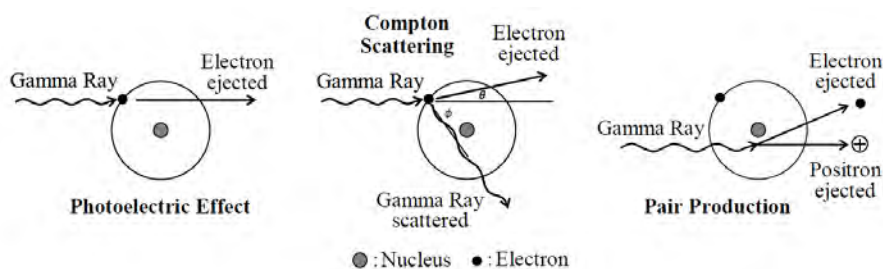
När IN kolliderar med lättare atomkärnor såsom väte, syre eller kol absorberas neutronen av atomkärnan och en ny neutron frigörs. Den nya neutronen har lägre energi och kallas termisk neutron (TN). Den nya neutronen har en rörelseriktning skild ifrån ursprunglig neutrons rörelseriktning och atomen kommer flytta en viss sträcka. Energin vid dessa kollisioner är konserverad och kallas för elastisk spridning.

Kollisionerna, in-elastiska och elastiska, bryter bindningar och förflyttar atomer från sina positioner i molekylerna/kristallerna och skapar s.k. dislokationer i materialet med vilket neutronerna kolliderar. Förändringen av energinivån hos neutronerna sker genom hundratals kollisioner innan en IN övergår till TN. När neutronerna gått över i TN har dessa inte tillräckligt med energi för att frigöra fler neutroner i kollisionerna med atomkärnorna.

Betong består av ämnen med både lätta och tunga atomkärnor varför neutroner kan genomgå hela kedjan av energireduktion inom materialet.

Interaktion mellan γ -strålning och material

Typiskt kan reduktion av γ -strålningens energi när den passerar ett material beskrivas med tre olika effekter, se Figur 14. När γ -strålningen kolliderar direkt med en yttre elektron stöts elektronen ut från atomen och γ -strålningen försvinner. Denna effekt kallas för *fotoelektrisk effekt*. När energinivån hos γ -strålningen är mycket större än bindingsenergin mellan atomkärna och elektron stöts elektronen ut med en vinkel i förhållande till inkommande γ -strålning varvid γ -strålningen också ändrar vinkel och fortsätter med en lägre energi än före kollisionen. Denna effekt kallas för *Comptonspridning*. Med de energinivåer elektronerna har från härden i ett kärnkraftverk och de atomnummer som är vanliga i betong så är Comptonspridning den vanligaste mekanismen. Den tredje mekanismen uppkommer när γ -strålningen har en energi över 1.02 MeV; då försvinner γ -strålningen runt atomkärnan och en elektron och en positron frigörs. Denna effekt kallas *parbildning*.



Figur 14. Visualisering av γ -strålningens interaktion med en atom och dess elektroner. Källa Kontani et al. [53].

Elektronerna som frigörs kolliderar i sin tur med andra elektroner (sekundära elektroner), och på så sätt sänker elektronerna sin rörelseenergi. När elektronernas energi är lägre än den joniserade energinivå som råder mellan atomkärnan och elektronerna i materialet upphör frigörandet av elektroner. Dock överförs energi i form av excitation. Då massan hos elektronerna är liten blir energinivån hos sekundära elektroner lägre än energinivån hos metallbindningen och även vissa jonbindningar. Därför har γ -strålning ringa påverkan på fasta material med isotropa jonbindningar (isotrop innebär i detta sammanhang att elektronerna statistiskt sett befinner sig jämnt fördelat mellan atomerna) och metaller [53].

För sekundära elektroner och γ -strålning exciteras elektronerna i atomerna i samband med kollisionerna. Denna excitationenergi övergår sedan till hela atomen (värme). Kovalenta bindningar är känsliga för denna atomära excitation och förstörs. Här kan noteras att silikater kan förstöras på grund av γ -strålningen då bindningen mellan kisel och syre anses vara av kovalent typ, Kaplan [35].

Både neutron- och γ -strålning bidrar till värmeutveckling i det bestrålade materialet samt att neutronpartiklarna även har förmågan att öka tätheten av strukturella defekter. Vidare, kan båda typerna av strålning förändra den kemiska strukturen hos betongens ingående huvudkomponenter. Förändringar i den kemiska strukturen, det vill säga förändringar hos kemiska bindningar, ger en ökad risk för oönskade kemiska reaktioner och fasförändringar. Således finns därför en direkt potentiell påverkan av joniserade strålning på betongens och armeringens mekaniska egenskaper.

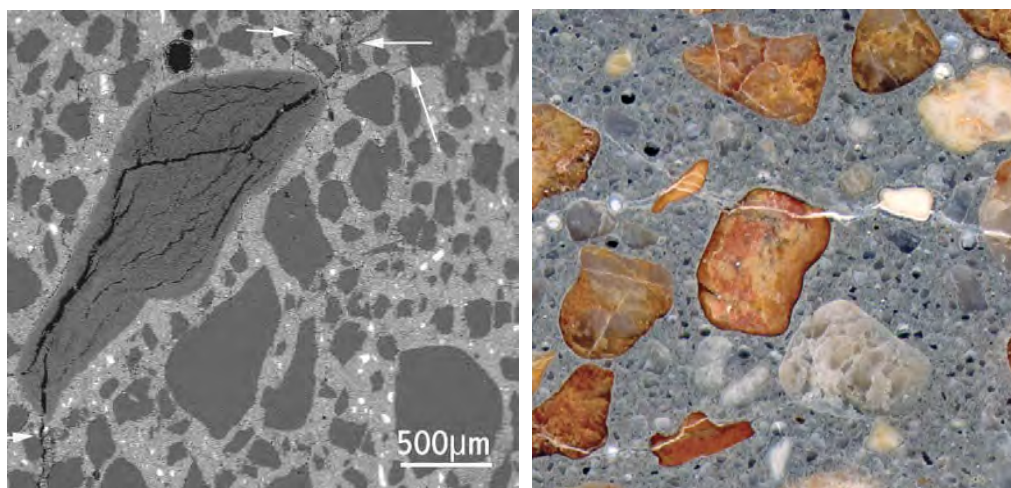
Strålningsinducerad degradering i ballast och cement – kemiska processer

Joniserande strålning har egenskapen att kunna påverka, men även vara orsaken till att olika kemiska processer sker i betongen. Tre av dessa olika kemiska reaktioner är:

1. Alkalisilikatreaktionen.
2. Karbonatisering.
3. Radiolys och förångning av vatten.

I det följande behandlas de två första punkterna, radiolys och förångning av vatten redovisas inte ingående här då den i praktiken endast har sekundär påverkan på hållfastheten, Kaspar et al. [54].

Den första av dessa kemiska reaktioner vilken har visat sig påverkas av joniserande strålning är ASR vilken är en långsam process och i förlängningen degraderande mekanism genom sprickbildning i betongen. Degraderingsprocessen är väl dokumenterad och uppstår genom ballast med hög andel lättlost kvarts/silikat (amorf opal, semikristallin flinta, porfyr eller mylonit [9]) reagerar med cement innehållande högalkalisk lösning i mikroporerna (i cementen), Lagerblad och Trägårdh [55, 56] och Fournier [57]. En av slutprodukterna blir en alkalisilikatgel vilken är hygroskopisk, det vill säga har förmågan att ta upp vatten, och med större volym än beståndsdelarnas volym. Alkalisilikatgelen är lokaliserad till ytan av- och inom ballasten. Omkring ballasten bildas det under denna process ett hårt skal av kalciumsilikat vilken tillsammans med omgivande cement verkar volymbegränsande för alkalisilikatgelen. Således uppkommer höga tryckspänningar inom ballasten. Tryckspänningarna frigörs sedermera genom sprickinitiering och tillväxt genom kalciumsilikatet och cementen omkring ballasten men också inom ballasten, Ichikawa och Kimura [46]. Figur 15 visar karaktäristiska bilder på sprickor i ballast och cement på grund av ASR.



a) b)
Figur 15. Sprickor i ballast och cement drivet av ASR. (a) Källa [58]. (b) Källa [59].

I Sverige används numera inte högalkaliska cementsorter med olämplig ballast för kvalificerade anläggningskonstruktioner [9]. Dock finns det farhågor kring strålningens katalyserande effekt på ASR trots att lämplig kombination av ballast och cement (hög andel kristallin kvarts kombinerad med lågalkalisk cement). Framförallt är det strålningens påverkan på ballasten som studeras. Kvarts (kisel-dioxid) som är den mest stabila formen av silikater och vanligtvis förekommande i kristallin form förlorar sin kemiska stabilitet om den kristallina fasen övergår till amorf fas. Både neutron- och γ -strålning har förmågan att omvandla kvarts till ett instabilt amorf tillstånd med hög reaktivitet för alkalisk lösning. Detta studeras av Ichikawa och Miura [60] och Ichikawa och Koizumi [61] vilka observerar en påverkan av β - och γ -strålning på α -kvarts. Vid en dos på 1×10^{12} Gy eller en fluens av SN på 1×10^{20} n/cm² ökar reaktiviteten med 700 gånger. Tåligheten mot joniserande strålning är ungefär en storleksordning lägre i amorf kvarts jämfört med kristallin kvarts [60].

Därför kan man anta att ASR inte förekommer i biologiska skärmen av en kärnkraftsanläggning *så länge som höga halter av kristallin kvarts förekommer i ballasten*. Vidare studeras även effekten av strålning på reaktiviteten hos plagioklas för alkalisk lösning [46]. Plagioklas, vilket använts som ballast i japanska kärnkraftskonstruktioner, är ett samlingsnamn för en grupp fältspater, mycket vanliga i vulkaniska bergarter. Här ses en omvandling från kristallin fas till amorf fas, som är 35 gånger mer reaktiv för alkalisk lösning, vid GD över 0.9×10^8 Gy [46]. Experiment med neutronstrålning genomfördes aldrig men en skattning av kritisk fluens görs till 1×10^{16} n/cm². Tabell 9 summerar experimentella resultat genomförda i [46, 61].

I [46] påpekas att betongen närmast reaktortanken exponeras för högsta nivåerna av strålning; och att betongstrukturen är kraftigt förstärkt med armering i dessa regioner varför betongkonstruktionen inte nödvändigtvis förlorar sin säkerhetsfunktion. Detta stöds av [35] som påpekar att det är osannolikt att en betongstruktur skulle kollapsa på grund av ASR. Dock kan bitar av betongen förväntas falla ner från ytan närmast reaktortanken [61].

Tabell 9. Kritisk dos γ - och β -strålning avser nödvändig dos för omvandling av kristallin fas till amorf fas. Kritisk tid för γ - och β -strålning är beräknad med antagande om en max stråldos för betongen i PWR satt till 2×10^7 Gy/år för γ - och β -strålning och 1×10^{18} n/(cm²år) för SN ($E > 0.1$ MeV). Källa Ichikawa och Kimura [46], Ichikawa och Koizumi [61].

Mineral	Kritisk dos β - och γ -strålning / Gy	Kritisk tid för β - och γ -strålning	Kritisk dos SN / n/cm ²	Kritisk tid för neutronstrålning
Plagioklas	1×10^8	5 år	1×10^{16} a)	4 dagar a)
α -kvarts	1×10^{12}	50000 år	1×10^{20}	100 år

a) Kritisk dos för Plagioklas är skattad under antagande om samma kvot beräknad mellan neutron- och γ -strålning gällande för α -kvarts.

Bortsett från volymökningen på grund av uppkomsten av alkalisilikatgel har neutron- och γ -strålningen direkt inverkan på främst ballasten. Här har volymökning rapporterats av ett flertal med början från 1950-talet. Primak et al. [62, 63] rapporterar en minskad densitet hos silikatglas och kvarts efter bestrålning med SN. Senare har volymökning hos diabas, flinta, gråvacka, hornfels och flera kalkstensarter på grund av bestrålning med SN rapporterats, Gray [64]. Orsaken till volymökningen förmodas vara påverkan på atombindningar som bryts, ackumulering av defekter (dislokationer) vilket i förlängningen leder till höjning av gitterkonstanter (fasomvandling), [47]. Vidare rapporteras [47] att aggregat med högre densitet har en högre risk för volymexpansion vid neutronbestrålning. Diametralt mot volymökningen hos ballasten uppkommer en volymminskning hos kalciumsilikathydraten (cementpastan) [64]. Neutron- och γ -strålningen anses inte ha någon direkt påverkan på gitterstrukturen och dess stabilitet då cementpastan innehåller en stor mängd imperfektioner och oregelbundenheter från början. Däremot påverkas vattenmängden av värmeutvecklingen vilket kan leda till uttorkning och morfologiska förändringar samt volymminskning [47] om temperaturen inte kontrolleras. Här är det alltså mer sannolikt att temperaturen är den primära degraderande mekanismen. Påverkan av neutron- och γ -strålning på betong och dess komponenter redovisas i Tabell 10.

Karbonatisering innebär att kalciumhydroxiden (kalk) i betongen reagerar med den i luften omgivande koldioxiden och bildar kalciumkarbonat. Dock kan karbonatisering uppkomma inuti betongen genom radiolys. Radiolys innebär att vattenmolekyler separerar med vätegas och syregas alternativt väteperoxid som följd. Bouniol och

Aspart [66] rapporterar en undersökning angående syrets försvinnande i betong under bestrålning och betydelsen av peroxid (O_2^{-2}) i radiolys. Bouniol och Aspart fann en kemisk process vilken startar med en vattenlösning av kalciumhydroxid och genom kemiska reaktioner i fyra steg inklusive radiolys resulterar i kalciumkarbonat och fritt vatten. Den nybildade kalciumkarbonaten (kristaller) fyller porerna i betongen med konsekvensen att porositeten sjunker. Detta verifieras genom experiment [66]. Dock verkar konsumtionen av kalciumhydroxiden i riktningen mot ökad porositet men effekten på porositeten är mindre jämfört med nybildandet av kalciumkarbonaten. Vidare föreslås att om överdriven mängd kalciumkarbonat bildas, på grund av karbonatiseringen driven av joniserande strålning, kan det leda till mikro-sprickor omkring porerna.

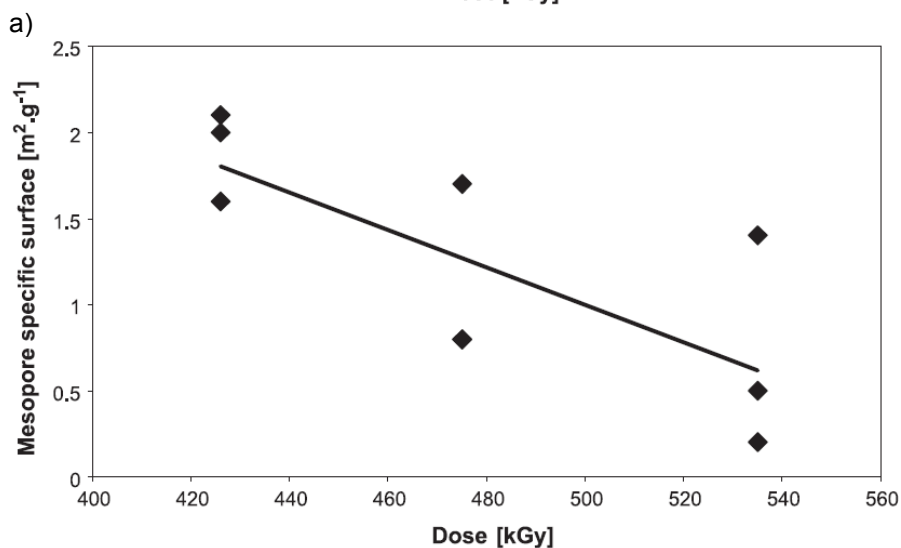
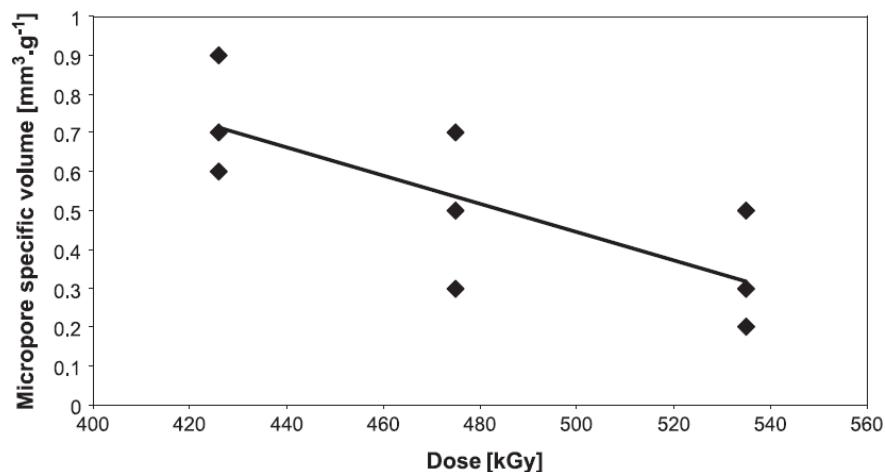
Vodák et al. [67] studerar påverkan av γ -strålning på porositet och mängden kalciumkarbonat genom experiment. Figur 16 visar specifik yta hos porerna (Figur 16a) och porositeten i betongen med ökad GD (Figur 16b)). Här ses att specifik yta och porositet minskar med ökad GD.

Till skillnad ifrån naturligt förekommande karbonatisering där kalciumhydroxiden reagerar med koldioxiden i luften och bildar kalciumkarbonat och vatten; sker alltså karbonatiseringen driven av joniserande strålning inuti betongen. Det vill säga karbonatiseringen är inte begränsad till ytan av betongkonstruktionen. En annan skillnad mellan dessa två typer av karbonatisering är att den naturliga processen driven av kontakten mellan luft och betong ofta ger en hållfasthetsökning jämfört med processen driven av joniserande strålning och radiolys vilken ger en minskning av hållfastheten [54]. Här föreslår Bar-Nes et al. [65] att styrkan och transportegen-skaperna hos betongen beror mer på andra parametrar än strålningsinducerad karbonatisering. Till exempel urlakningen av strontium och cesium från bestrålad cement är olika beroende på om karbonatisering skett i betongen eller inte [65].

Tabell 10. Påverkan av neutron- och γ -strålning på betong och dess komponenter. Källa Maruyama et al. [47] och Kontani et al. [53].

Komponent	γ -strålning	Neutronstrålning
Cementpasta	<p><i>Vatten fas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Vattenmolekylerna separerar genom radiolys med vätgas och väteperoxid som resultat. • Värmeutveckling på grund av γ-strålning ger ytterligare hydratisering av icke hydratiserad cement. • Väteperoxid härstamande från radiolys kan reagera med cementpastan. 	<p><i>Vatten fas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Molekylära produkter från vattnet kan vara de samma som från γ-strålningen, men resulterande mängd är olika på grund av olikheter i energiöverföringen mellan vatten och neutronstrålning/γ-strålning.

	<p><i>Solid fas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kovalenta kiseloxidbindningar inom cementpastan kan skadas. • Elektroner frigörs genom spridningsmekanismen när γ-strålningen kolliderar med solid fas. 	<p><i>Solid fas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Dislokationer skapas i solida fasen av cementpastan. Dislokationerna och därtill följande geometriändring kommer inte att ackumuleras på grund av porositet och mikrostruktur.
Ballast	<p><i>Vatten fas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Små mängder vatten kan genom radiolys frigöras till vät- och syrgas så väl som till vattenånga genom uppvärmning. <p><i>Solid fas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kovalenta bindningar skadas genom förändring i atomgittret på grund av spridningsmekanismen. 	<p><i>Vatten fas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Samma som för cementpastan. <p><i>Solid fas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Höjning av gitterkonstanter på grund av dislokation av atomer, dessa defekter ackumuleras.
Betong	<ul style="list-style-type: none"> • Uttorkning orsakar krympning, minskad styvhet och förändring av hållfastheten hos cementpastan. Följden blir sprickbildning kring ballasten och således skadlig inverkan på styvhet och hållfastheten hos betongen. • Ytterligare hydratisering av icke hydratiserad cement kan ge ökad styrka och styvhet hos betongen. • Radiolysen ger väteperoxid vilken kan reagera med cementpastan och därmed påverka betongens hållfasthet. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ökade gitterkonstanter och ackumulering av defekter i ballasten ger volymexpansion. Följaktligen skapas sprickor runt ballasten varmed styvhet och hållfasthet påverkas negativt. Detaljerna är ej klarlagda. • Betong med kiselhaltig ballast verkar vara mer utsatt för sprickor jämfört med betong utan kiselhaltig ballast. Detta trots lika längdvidgningskoefficienter för ballasten. Mekanismerna är ej klarlagda.



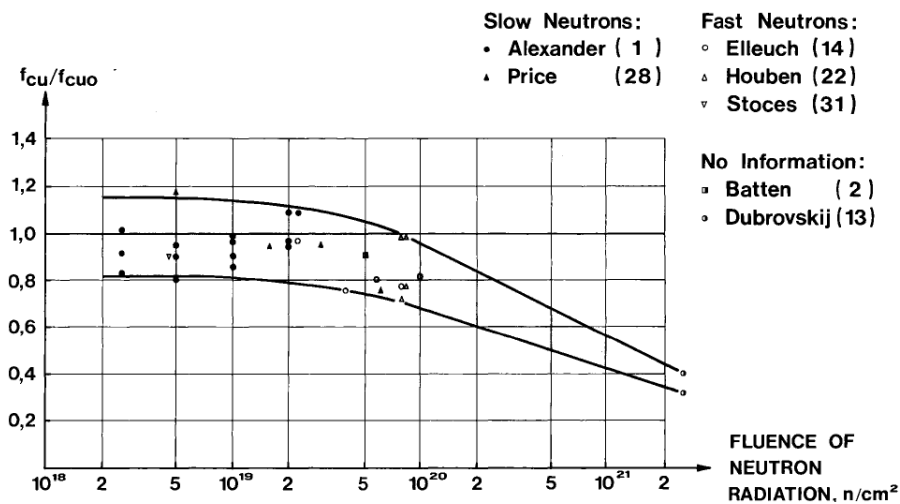
b)

Figur 16. a) Specifik yta hos porerna vs dos γ -strålning. Värde vid noll GD, 1.1 mm³/g. b) Porositet i betong vs dos γ -strålning. Värde vid noll GD, 12 %. Källa Vodák et al. [67].

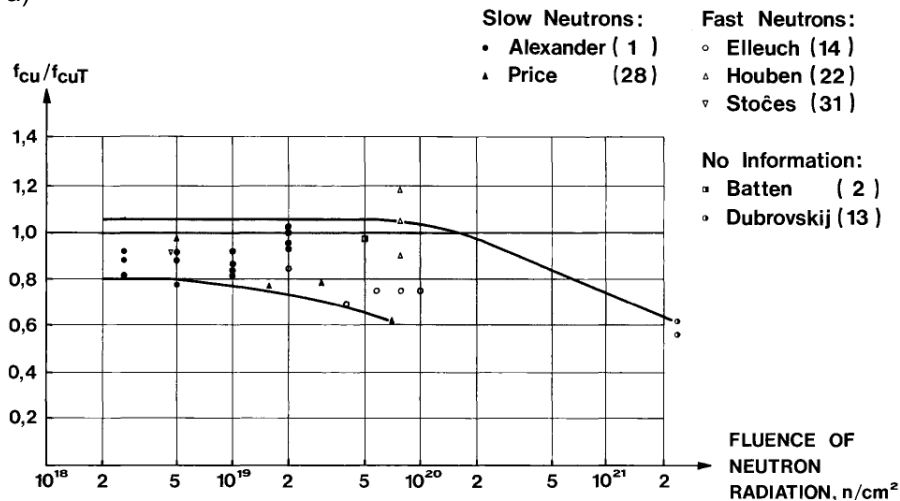
En av huvudkonsekvenserna av karbonatisering, vilket nämnts tidigare i rapporten, är en sänkning av pH-värdet i porlösningen från området kring 12 – 13 till lägre än 9. Joniserande strålning verkar som en katalyserande och accelererande faktor på den kemiska processen [67]. Bar-Nes et al. rapporterar en experimentell studie på karbonatiseringsprocessen i betong och effekten av exponering med joniserande strålning. Experiment genomfördes där (a) provkroppar bestrålades med GD 1×10^7 Gy i labbmiljö under 6 månader, (b) referensprovkroppar i fri atmosfär utan bestrålning, (c) förseglade provkroppar ej utsatta för fri atmosfär eller bestrålning. Provkropparna hade alla ett vct på 0.45. Ingen karbonatisering kunde upptäckas i grupp (c). Referensprovkropparna, grupp (b), uppvisade ett karbonatiseringsdjup på ca 0.5 mm – 0.6 mm. Grupp (a), bestrålade provkroppar, uppvisade ett karbonatiseringsdjup i medeltal på 3 mm med extremvärden upp till 6 mm.

Strålningsinducerad degradering i betong – mekaniska egenskaper på kontinuumnivå

Det underliggande syftet med studierna vilka rapporteras här är att hitta en kritisk nivå på ackumulerad dos av neutron- och γ -strålning över vilken en tydlig minskning av hållfastheten kan observeras. Historiskt studerades effekten av joniserande strålning på betong redan under mitten av 1940-talet. År 1956 publicerades en av de första litteraturstudierna inom området av Clark [68]. Rapporterade data i [68] sammanfattar experiment med neutronflöden upp till 2×10^{19} n/cm² och temperaturer upp till 120°C. Clark konstaterar att ingen degradering kan upptäckas eller mätas kopplat till enbart bestrålningen på grund av överordnade degraderande effekter från ökad temperatur under exponeringen.



a)



b)

Figur 17. Relativ tryckhållfasthet vs neutronfluens. a) Relativt icke temperaturexponerad betong och b) Relativt temperaturexponerad betong. Källa Hilsdorf et al. [41] (notering: siffrorna inom parentes efter respektive namn hänvisar till referensnummer i [41]).

Nästa större litteraturstudie efter Clark [68] presenterades 1978 av Hilsdorf et al. [41]. Studien behandlar 25 publicerade artiklar innehållandes experimentella data på *olika betongtyper* och med *olika neutronstrålningsspektra samt experimentella metoder*. Majoriteten av citerade experiment i [41] genomfördes under 1960- och 1970-talet för att stödja utvecklingen inom spännarmerad betong med syfte att användas till reaktorinneslutningar. Hilsdorf et al. studerar neutron- och γ -strålningens påverkan på tryck- och draghållfastheten, elasticitetsmodulen, krympning, svällning, viktminskning, termisk expansion och värmeledningsförmåga. Dessutom separeras den degraderande effekten av förhöjd temperatur ifrån strålningsinducerad degradering, se Figur 17b) och Figur 18b). Figur 17 redovisar relativa tryckhållfastheten för betong (olika betongkvalitet, experimentella metoder etc. gäller för punkterna) exponerad med olika fluens. Den generella tolkning Hilsdorf et al. gör genom de heldragna linjerna i Figur 17 visar på en gradvis minskande relativ tryckhållfasthet över en neutronfluens på 1×10^{19} n/cm² vilket tolkas som att en kritisk nivå finns och att strålningen har en degraderande effekt på betong bortom denna kritiska nivå. Hilsdorf et al. pekar således ut 1×10^{19} n/cm² som en kritisk nivå på neutronfluensen för betong.

Figur 17b) visar relativa tryckhållfastheten där tryckhållfastheten normeras med data från provkroppar exponerade för lika temperatur men utan joniserande strålning. Resultaten i Figur 17b) tenderar visa mindre spridning jämfört med data i Figur 16a). Den relativa minskningen av temperaturkorrigerade tryckhållfastheten är i paritet med icke-temperaturkorrigerade tryckhållfastheten upp till en fluens av 1×10^{19} n/cm²; därefter observeras en tilltagande minskning av tryckhållfastheten ner till en relativ tryckhållfasthet på ca 60 % vid 2×10^{21} n/cm² vilken är experimentet med den högsta redovisade fluensen. Jämfört med icke-temperaturkorrigerade data vid 2×10^{21} n/cm² indikerar resultatet att temperaturen bidrar med 20 % – 30 % av minskningen i tryckhållfasthet.

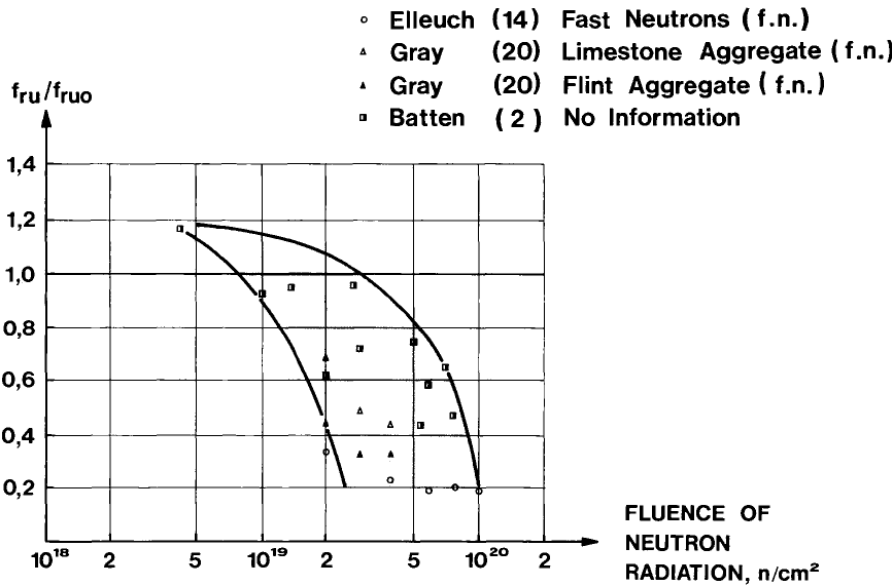
Figur 18 redovisar relativa draghållfastheten hos betong för olika fluenser. Kvalitativt ses en mycket tydlig degraderande effekt av både joniserande strålning och temperaturen vid fluenser $> 1 \times 10^{19}$ n/cm². För relativa draghållfastheten finns inget tydlig kritisk nivå för markant ökad degradering jämfört med vad som kan observeras i Figur 17. Generellt kan den degraderande effekten ses tydligare hos draghållfastheten jämfört med tryckhållfastheten, jämför Figur 17 och Figur 18. Stor spridning förekommer vilket speglar variationen i de citerade experimentella försöken men även i de olika betongtyper och kvaliteter som använts.

Hilsdorf et al. redovisar även data från tre studier på effekten av γ -strålning på relativa tryckhållfastheten, se Figur 19a). En degraderande effekt kan ses för γ -strålning $> 1 \times 10^8$ Gy (1×10^{10} rad). Emellertid påpekar Hilsdorf et al. att dessa data kan vara påverkade av den miljö i vilken provkropparna befann sig i under experimenten (destillerat vatten). Således är det den degraderande effekten av kombinationen joniserande strålning och destillerat vatten som visas i Figur 19a). Därför föreslår Hilsdorf et al. ingen kritisk nivå för ackumulerad dos γ -strålning utan endast för neutronfluensen (1×10^{19} n/cm²).

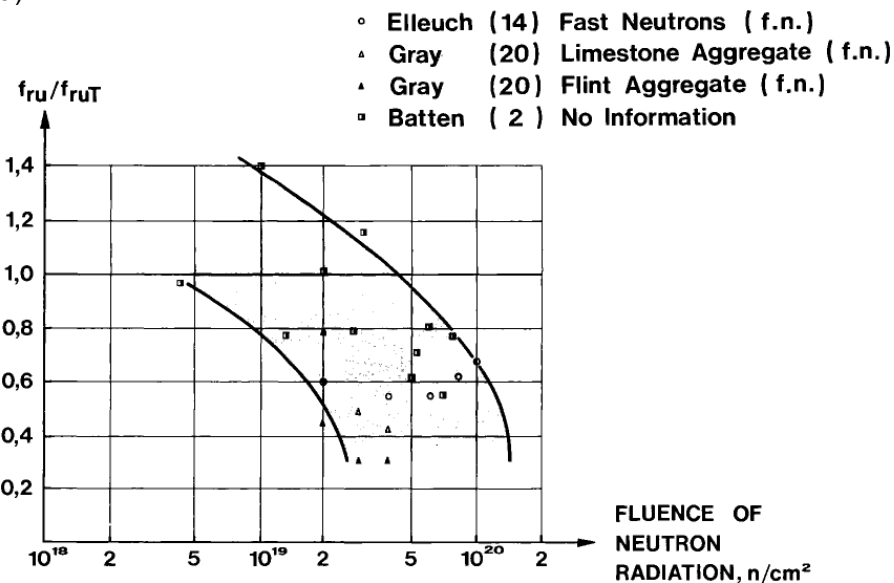
Figur 19b) visar en sammanställning av relativa tryckhållfastheten på betong tagen vid olika positioner genom biologiska skärmen ifrån den grafitmodererade reaktorn vid ORNL, Blosser et al. [69] bearbetad i [41]. Provkropparna togs ifrån biologiska skärmen efter 12 års drift och normerades mot provkroppar tagna 8 år tidigare från samma positioner. Temperaturen i betongen sträckte sig från 40°C på innerytan till 20°C på utsidan av biologiska skärmen under drift. En tydligt minskande tryckhållfasthet är uppmätt med minskande avstånd från reaktorhärden. Vid ytan närmast

reaktortanken nås den lägsta uppmätta kvoten motsvarande en resttryckhållfasthet på 60 %. Här ska noteras att eventuell degraderade effekt av temperaturen finns med i redovisade data. Blosser et al. konstaterar också att ingen förändring i de kemiska egenskaperna och densiteten kunde observeras.

Aktiviteten inom strålningsinducerad degradering inom betong var mycket låg under 1980- och 1990-talet sett till antalet publicerade artiklar. Det var först under första decenniet av 2000-talet som aktiviteten ökade med fler publicerade artiklar. Frågan aktualiserades förmodligen med THs vilja att driva kärnkraftsanläggningarna längre tid än från början avsett, det vill säga i det flesta fall längre än 40 år.

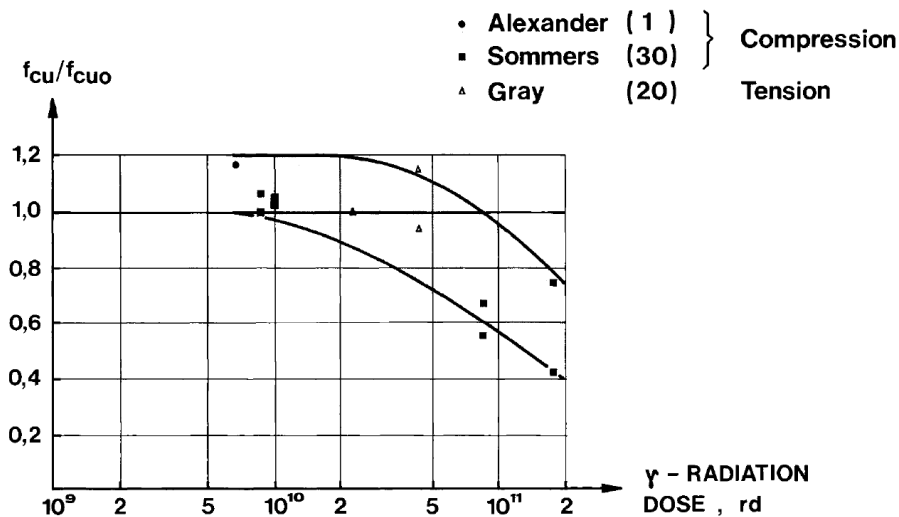


a)

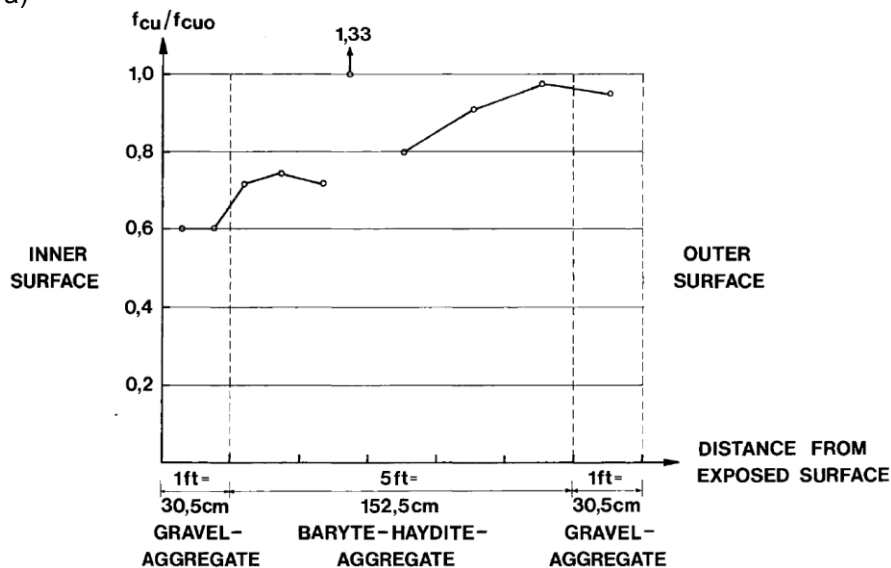


b)

Figur 18. Relativ draghållfasthet vs neutronfluens. a) Relativt icke temperatur-exponerad betong och b) relativt temperaturexponerad betong. Källa Hilsdorf et al. [41] (notering: siffrorna inom parantes efter respektive namn hänvisar till referensnummer i [41]).



a)



b)

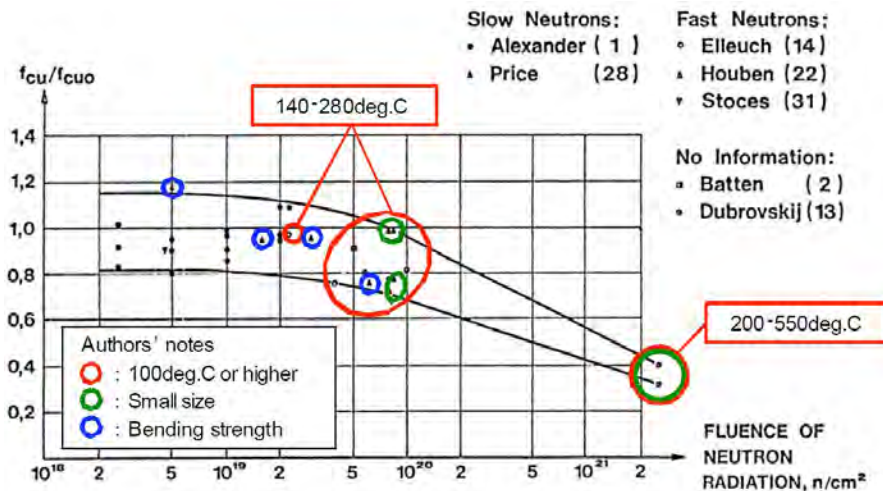
Figur 19. a) Relativ drag- och tryckhållfasthet hos provkroppar exponerade för γ -strålning och destillerat vatten. [100 rad \equiv 1 Gy] (Notering: siffrorna inom parentes efter respektive namn hänvisar till referensnummer i [41].) b) Relativ tryckhållfasthet genom biologiska skärmen hos den grafitmodererade reaktorn vid ORNL [69]. Data bearbetade av Hilsdorf et al. [41].

Då resultaten sammanställda av Hilsdorf et al. har fått stort genomslag i normer och standarder riktades ett ökat intresset under de senaste 5 åren mot de experimentella data citerade i rapporten [41]. Fujiwara et al. [45] rapporterar en noggrann analys av detaljerna i original artiklarna citerade i [41]. Bland annat jämförs provkroppsgeometrier, experimentella metoder och förutsättningar. Följande punkter noteras i [45]:

- Temperaturerna i vissa av experimenten var 100°C eller högre (approximativt 140°C – 550°C). Således kan reduktionen av tryckhållfastheten likväldigt bero på den höga temperaturen som på bestrålningen. Dessa data överskridande 100°C är markerade med röda cirklar i Figur 20.
- Storleken på provkropparna var mycket små i vissa av experimenten; i storleken av 8 mm – 15 mm. Problemet med små provkroppar är att lokala

strukturen i betongen kan få en inverkan på hållfasthetstekniska provresultatet. Det krävs helt enkelt en viss storlek på provstaven givet största objektet i betongen (ballasten/stenarna) för få ett tillförlitligt svar på kontinuumnivå. Experiment med små provkroppar är inringade med gröna cirklar i Figur 20.

- c) Böjprov användes för att utvärdera tryckhållfastheten i några experiment. Spänningstillståndet i ett böjprov är en kombination av drag- och tryckspänningar vilket resulterar i att det inte kommer vara tryckhållfastheten som mäts vid brottnivån. Dessa experiment är inringade med blå cirklar.



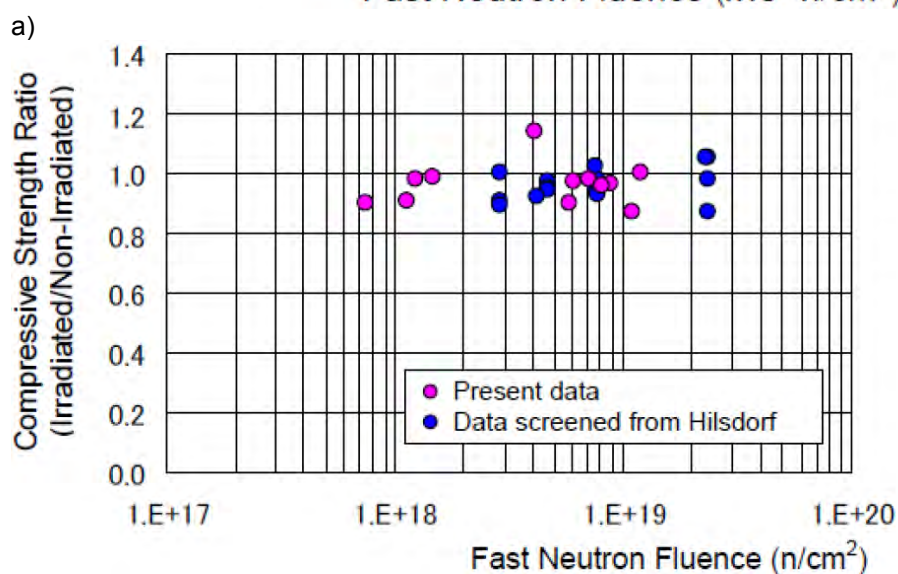
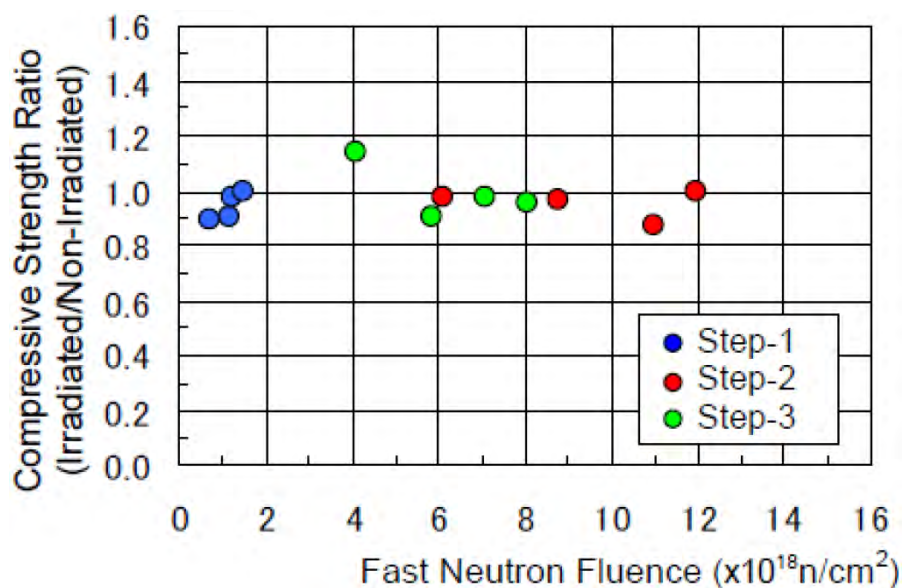
Figur 20. Experimentella data sammanställda av Hilsdorf et al. [41] och analyserade av Fujiwara et al. [45]. Inringade data markerar experiment vilka inte ger representativa och jämförbara resultat.

Baserat på erfarenheterna ifrån Figur 20 rapporterar [45] en noggrant genomförd experimentell studie på neutronstrålningens påverkan på betong och ingen signifikant reduktion av tryckhållfastheten kunde observeras. Experimenten genomfördes med temperaturer lägre än 65°C vilket är den maximala generella tillåtna temperaturen i en reaktorinneslutning (enligt ACI 349 tillämpad ibland annat USA, Japan och Svergie). Cylinderformade provkroppar med dimensionen 50 mm (diameter) × 100 mm (längd) användes. Maximala neutronfluensen SN ($E > 0.1$ MeV) med vilken provkropparna exponerades för var 1.2×10^{19} n/cm² vilket enligt Fujiwara et al. tillräckligt överskrider den förväntade ackumulerade nivån av neutronstrålning i en BWR efter 60 års drift. Resultaten visar att tryckhållfastheten hos bestrålade provkroppar i stort sett motsvarar tryckhållfastheten hos provkroppar befunda i en miljö av 20°C och 60 % relativ luftfuktighet. Således kan ingen signifikant effekt av strålningen upp till en neutronfluens om 1.2×10^{19} n/cm² på tryckhållfastheten observeras, se Figur 21a).

Experimenten [45] genomfördes i tre steg med ett antal bestrålningscykler i varje steg, se Tabell 11. Dessa olika steg är markerade i Figur 21a). Vidare jämförs i [45] experimentella resultat med selekterade resultat från [41]. Experimentella resultat vilka finns inringade i Figur 20 exkluderades i jämförelsen med motiveringar enligt givna punktsatser a) – c) ovan. Jämförelsen visas i Figur 21b) där ingen signifikant reduktion av tryckhållfastheten kan uttydas.

Tabell 11. Beskrivning av experimentella bestrålningscykler använda i [45].
Källa Fujiwara et al. [45].

Steg	Neutronfluens SN (E > 0.1 MeV) n/cm ²	Bestrålningscykler
-	-	-
1	0.5×10 ¹⁸	1
2	3.0×10 ¹⁸	6
3	2.0×10 ¹⁸	4



b)
Figur 21. a) Relativ tryckhållfasthet för betong bestrålade med olika fluens.
b) Experimentell data från Fujiwara et al. [45] (Present data) sammanfogade med motsvarande experimentell data från Hilsdorf et al. [41] (Data screened from Hilsdorf). Källa Fujiwara et al. [45].

År 2010 presenterade Kontani et al. [53] en liknande genomlysning av samlade experimentella data i [41], precis som [45] presenterat ett år tidigare. I [53] konstateras att de experimentella villkoren med avseende på ingående material i provad betong, temperatur i provkropparna under bestrålning och energinivån hos SN inte är i överrensstämelse med de för betongen i LWR inneslutningar. Betongen i LWR inneslutningar, internationellt sett, är tillverkad av vanligt standardcement (Portland cement) med ballast av god kvalitet i majoriteten av anläggningarna.

Tabell 12. Experimentella förutsättningar funna i artiklar citerade av Hilsdorf et al. [41]. Källa Kontani et al. [53].

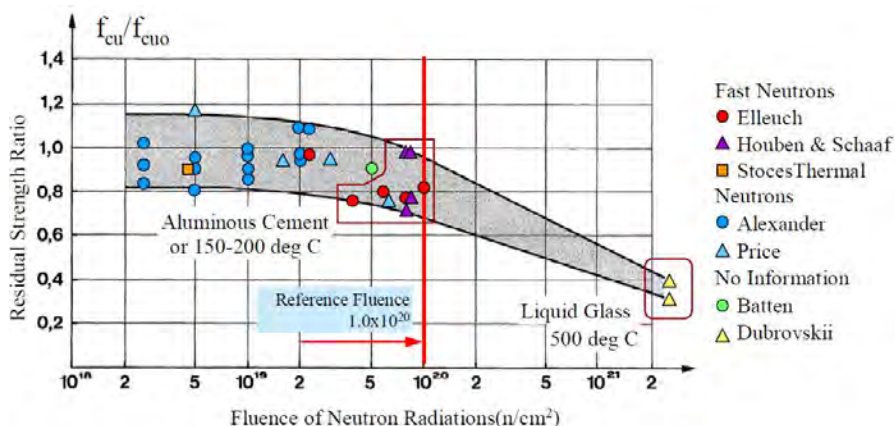
Författare [*]	Uppmätt egenskap	Typ av cement [†]	Provstavsstorlek / mm	Bestrålningförhållande	
				Temperatur / °C	Neutron energinivå och fluens / n/cm ²
Alexander ^[8]	Tryckhållfasthet	OPC	51×51×51	20 – 100	TN 0.29×10 ¹⁹ till 2.3×10 ¹⁹
Batten ^[9]	Tryckhållfasthet	OPC	51×51×203	Ej rapporterat	Ej rapporterat 5×10 ¹⁹
Dubrowskii ^[2]	Tryckhållfasthet	Vattenglas	Φ15×15 cylinder	200 – 500	Ej rapporterat 2.0×10 ²¹ till 2.4×10 ²¹
Elleuch ^[3]	Tryckhållfasthet	Aluminat-cement	25×25×25	210	SN 2.6×10 ²⁰ till 11.1×10 ²⁰
Houben ^[4] Schaaf ^[5]	Tryckhållfasthet	OPC	8×8×70	15 – 200	SN 3.0×10 ¹⁹ till 8×10 ¹⁹
Price ^[6]	Böjhållfasthet	OPC	51×51×203	50	TN 0.5×10 ¹⁹ till 7×10 ¹⁹
Stoces ^[10]	Tryckhållfasthet	OPC	Φ50×70 cylinder	< 80	SN 4.2×10 ¹⁸

^{*}Referenser i första kolumnen avser referensnummer i Kontani et al. [53].

[†]OPC: Ordinary Portland cement (Standard Portland cement).

Vidare konstateras att vissa provkroppar är för små för att erhålla tillförlitliga hållfasthetsdata samt att vissa data erhållits genom drag- eller böjprovning, och inte genom tryckprov; Tabell 12 sammanställer utfallet av genomgången. Skuggade celler i Tabell 12 motsvarar förhållanden i experimenten vilka inte är i överrensstämelse med de för betongen i LWR inneslutningar.

Figur 22 visar bearbetning av de i [41] citerade och sammanställda experimentella data (Figur 17a)) [53]. Kritisk nivå för neutronfluens föreslagen av Hilsdorf et al. är markerad med en röd linje, om än felplacerad vid 1×10²⁰ n/cm² istället för 1×10¹⁹ n/cm².



Figur 22. Kvarvarande relativ tryckhållfasthet efter bestrålning med neutronstrålning. Markerad med en röd linje är felplacerad vid $1 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ istället för $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$. Källa Kontani et al. [53] med referens till Hilsdorf et al. [41].

I figuren är det två punkter (gula triangler i Figur 22) som har avgörande betydelse för misstanken om ökad reduktion av relativa tryckhållfastheten med ökad fluens. Dessa två punkter är de med högst neutronfluens ($2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2 - 2.4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$) funna i publicerad litteratur [54] och rapporterades av Dubrovskii et al. [71] år 1966. På grund av att punkternas (gula trianglar i Figur 21) genomslagskraft i detta sammanhang manades Kaspar et al. [54] till ytterligare noggranna undersökningar av förutsättningarna för experimenten i [71]. Följande fyra viktiga punkter hittades:

- Two different types of cement were used, one was Portland cement and the other was liquid glass (sodium silicate). Here it differs from the information given in [53] Table 12, which only cites liquid glass in comparison with the information given in [41]. The test specimens made of Portland cement were relevant for the study of radiation-induced degradation of the strength in concrete.
- The test specimens were of cylindrical geometry and had a diameter and length of 15 mm. The ballast was made only of fine kromit. So the test specimens were too small to obtain reliable strength data, which is noted in [63], for masonry of Portland cement (which is related to concrete based on Portland cement).
- The energy level in the study was 0.23 MeV; 30 % of the neutrons had an energy level $> 0.7 \text{ MeV}$. So the energy level of the neutrons corresponds to SN.
- The temperature in the test specimens during irradiation was high, $200^\circ\text{C} - 550^\circ\text{C}$. Two reference groups of test specimens; group a) which followed the same temperature cycle as the irradiated test specimens; group b) which were only kept in normal laboratory environment. The difference in strength between group a) and group b) showed the effect of the increased temperature and the difference between group a) and the irradiated test specimens showed the effect of the irradiation on the strength. A comparison of data in Table 13 last row shows that about 26 % of the reduction in strength can be attributed to the irradiation while 34 % can be attributed to the heat. However, in [41] it is pointed out that the experimental data in Figure 17a) represent the combined effect of irradiation and high temperature, and that a correction is made for the temperature in Figure 17b).

Dubrovskii et al. [72, 73] rapporterar ytterligare två experimentella studier i vilka ”ordinär betong” användes. Betongen bestod av Portland cement och ballast av icke-metalliska material så som kalksten, sandsten, granit och serpentinsten. Data från dessa två studier [72, 73] inkluderades inte litteraturstudien [41].

I den första studien [72] bestrålades provkroppar med diameter och längd på 40 mm. Temperaturen under experimenten sträckte sig från 20°C till 220°C. Resultaten visar ingen signifikant förändring i tryckhållfasthet eller styvhet vid neutronfluens $< 5 \times 10^{19}$ n/cm². Dock, vid 1.45×10^{20} n/cm² observerades en signifikant minskning med 10 % – 20 % av tryckhållfastheten. Emellertid, uppnåddes aldrig de höga fluenser rapporterade i [71] (2×10^{21} n/cm² – 2.4×10^{21} n/cm²) på grund av kraftig volymexpansion och följande spricktillväxt i provkropparna när dessa bestrålades med fluenser upp mot 1.45×10^{20} n/cm². Volymexpansionen kom till 80 % – 95 % från ballasten som bestod av kristallin kvarts (kiseldioxid), vilken blev amorf med tillhörande volymexpansion under bestrålningen.

Tabell 13. Tryckhållfasthet och styvhet hos betongprovkroppar. Källa Kaspar et al. [54] efter Dubrovskii et al. [71].

Betong med ballast av kromit och Portland cement som matris			Betong med ballast av kromit och flytande vattenglas som matris		
Bestrålade	Varma	Kalla	Bestrålade	Varma	Kalla
56.6 / 0.64	110.4 / 0.77	124.6 / 0.817	82.1 / 0.615	90.6 / 0.682	209.5 / -
62.3 / 0.68	95.1 / 0.725	126.3 / 0.885	71.3 / 0.545	134.8 / -	262.7 / 0.885
41.3 / 0.68	81.5 / 0.725	94 / 0.68	74.7 / 0.58	141.6 / 0.853	286.5 / 0.885
53.8 / 0.68	78.1 / 0.634	126.3 / 0.885	-	141.6 / 0.767	207.2 / 0.885
37.4 / 0.61	35.1 / -	126.3 / 0.817	-	-	-
37.4 / 0.68	101.9 / -	78.1 / -	-	-	-
-	51 / 0.578	163.1 / -	-	-	-
Medelvärde*					
48 / 0.67	79 / 0.69	120 / 0.82	76 / 0.58	128 / 0.77	242 / 0.89
Relativt värde %					
40 / 82	66 / 84	100 / 100	32 / 66	53 / 87	100 / 100

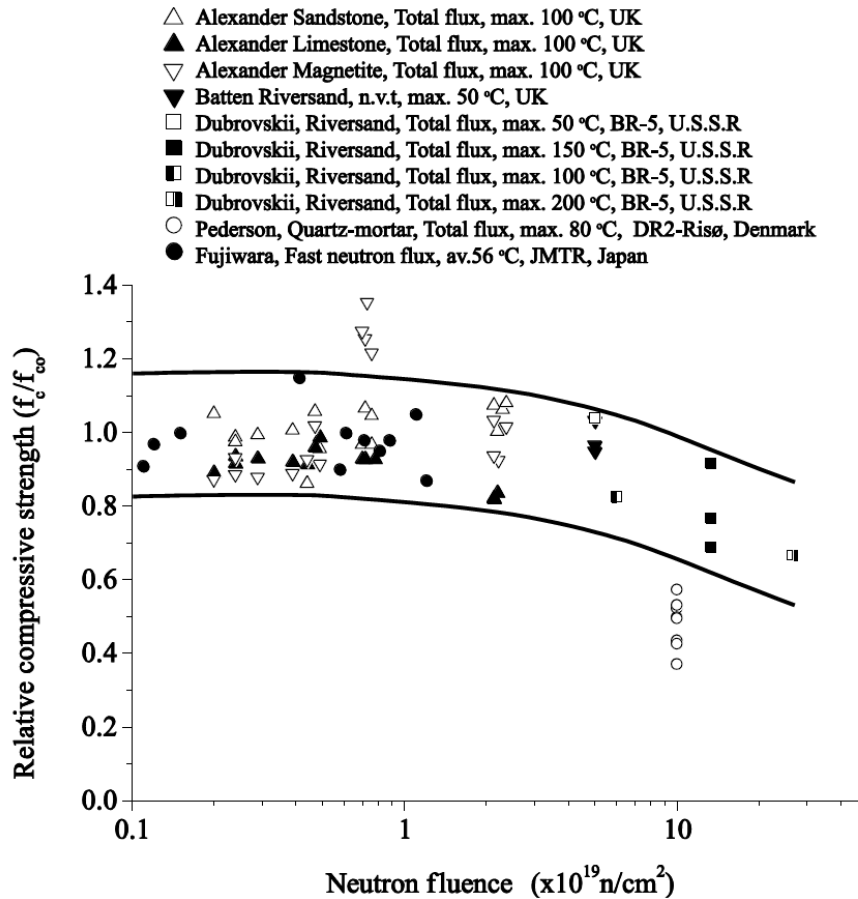
*Siffrorna är avrundade jämfört med rapporterade data i [54].

Täljaren anger tryckhållfastheten i kg/cm²; nämnaren ger det linjära sambandet mellan spänning och töjning i tryck.

Den andra studien av Dubrovskii et al. [73] rapporterar även den tryckhållfasthets-egenskaper efter neutronbestralning. Här användes finmald serpentinsten i betongen. Tryckhållfastheten minskade med 60 % och signifikanta förändringar observerades när neutronfluensen ökade från 1.3×10^{21} n/cm² till 1.7×10^{21} n/cm².

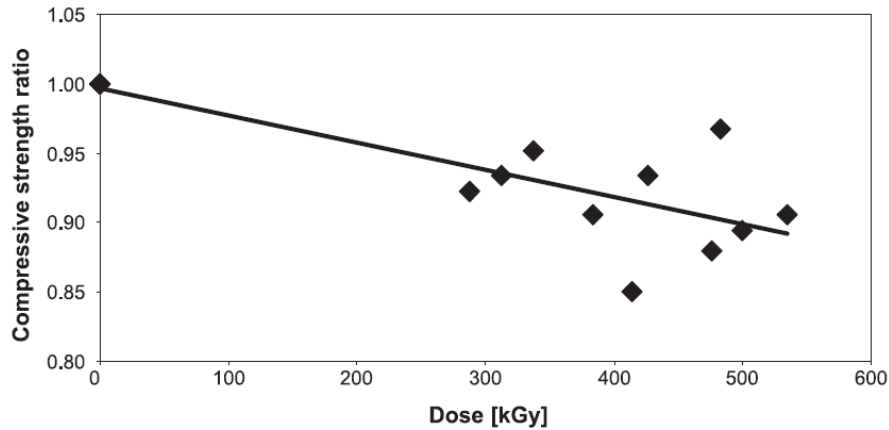
En nyligen publicerad studie av Maruyama et al. [47] behandlas de samlade experimentella data i [41] baserat på två kriterier: 1) Provkropparna ska vara tillverkade av vanliga material tillämpade i LWR inneslutningar, 2) Temperaturen ska vara $< 200^\circ\text{C}$. Enligt [47] påverkas inte tryckhållfastheten, baserat på flera publicerade rapporter, av temperaturer mellan 100°C till 200°C , Naus [74]. Vidare finns information om att tryckhållfastheten hos cementpastan minskar upp till en temperatur av

120°C men därefter ökar tryckhållfastheten igen, Komonen och Penttala [75]. Därför kan experimentella data med temperaturer upp till 200°C accepteras. I rapporten [6] sammanställs data från [41] (Alexander [76], Batten [77], Pedersen [78]) tillsammans med data från Dubrovskii et al. [79, 80] och [45], se Figur 23. Enligt Maruyama et al. [47] bekräftas en degraderande effekt från neutronstrålningen vid fluens $> 4 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$.



Figur 23. Relativ tryckhållfasthet vs neutronfluens. Källa Maruyama et al. [47].

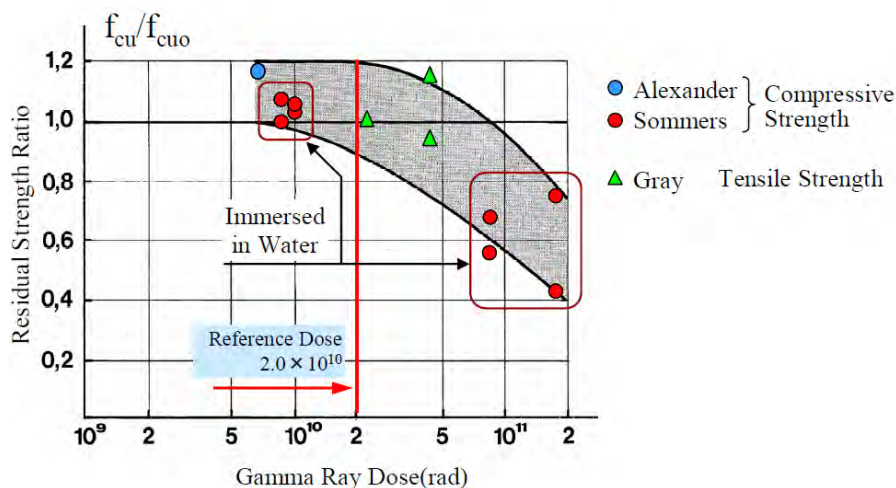
Samtliga citerade rapporter förutom Figur 19a) gäller för kombinationen av neutron- och γ -strålning. Detta beror på att ingen känd metod finns för att filtrera fram neutronstrålningen separat. Dock kan man genom avskärmning med till exempel vatten filtrera fram enbart γ -strålning.



Figur 24. Relativ tryckhållfasthet efter bestrålning med γ -strålning. Källa Vodák et al. [67].

Vodák et al. [67] studerade effekten av γ -strålning på tryckhållfastheten hos betong. Baserat på resultaten i Figur 24 drar författarna slutsatsen att 5×10^5 Gy ger en reduktion omkring 10 % på tryckhållfastheten. Vidare observeras reduktion av tryckhållfastheten redan vid 3×10^5 Gy. Vodák et al. noterar att resultaten inte är i linje med andra resultat, till exempel den vanligen accepterade kritiska bestrålningsnivån 2×10^8 Gy, se röd linje i Figur 25. Författarna nämner att den sannolika orsaken till observerad skillnad mellan deras experimentella resultat och andras är att ingen filtrering genomfördes för att ta bort neutronstrålningen. Således visar Figur 11 den kombinerade effekten av neutron- och γ -strålning istället för enbart effekten av γ -strålning.

Kontani et al. [53] genomlyser även sammanställningen i [41] avseende experimentell data beskrivande effekten av γ -strålning på tryckhållfastheten, Figur 17a). Som noteras i Figur 25 är experiment publicerade av Sommers [70] genomförda i destillerat vatten, vilket också påpekades i [41]. På provkropparna kunde kraftig korrosion observeras varför Sommers tillskrev reduktionen av tryckhållfasthet till korrosionen och inte bestrålningen. Experimentella data publicerade av Gray [81] i Figur 25 är resultat av dragprov och inte tryckprov. Kvar återstår en punkt i Figur 25 vilket omöjliggör uttalanden om sambandet mellan γ -strålning och tryckhållfasthet.



Figur 25. Relativ tryckhållfasthet efter bestrålning med γ -strålning. Källa Kontani et al. [53] med referens till Hilsdorf et al. [41].

Strålningsinducerad degradering i armering – skademekanismer och mekaniska egenskaper

Information specifikt om strålningsinducerad degradering i armering är mycket begränsad i litteraturen. Däremot finns det många studier som berör bestrålningens effekt på stål – och då i majoriteten av fallen kopplat till kolstål som utgör reaktortanken. Forskare inom området ställs idag inför samma frågeställningar som forskare inom betongområdet; vad händer i stålet när driften av kärnkraftsanläggningen förlängs med 20 år – 40 år?

Bestrålning med neutroner förändrar de mekaniska egenskaperna hos kolstål; en ökad sträckgräns samt förskjutning av omslagstemperaturen i riktning mot ökad temperatur för övergången från duktil till sprött brott. De mekaniska förändringarna har sin förklaring i uppkomsten av dislokationer på grund av in-elastiska kollisioner mellan SN och atomer i metallen. Vidare fälls föroreningar ut (dislokationer skapas) i metallen under bestrålning och dessa föroreningar sätter sig mellan atomerna i gittret och skapar lokala spänningar. Dessa lokala spänningar hindrar rörelsen av dislokationerna vilket leder till ett mekaniskt sprödare material på kontinuumnivå.

En konsekvens av längre drifttid för reaktortanken är att s.k. ”late-blooming phases” rika på nickel och mangan kan skapas. Det vill säga föroreningar i stålet samlas i kluster vilket direkt påverkar duktiliteten hos stålet och således kan innebära en försvarande omständighet vid förlängning av drifttillstånd, Nanstad et al. [82].

Resultat erhållna i studier [83] där vajrar med diametern 2.5 mm förspändes till 70 % av sträckgränsen för att sedan bestrålas med 4×10^{16} n/cm² (flöde 2×10^{10} n/(cm²s)) visade att storleken på spänningsrelaxationen var samma för bestrålade som för icke bestrålade material. På grund av att flödet var högre i experimenten jämfört med vad som existerar i LWR miljö så verkar det inte som bestrålningen har någon skadlig effekt på inneslutningen [12].

De skademekanismer som är aktuella för armering är korrosion och bestrålning. Bestrålningen torde inte vara något problem enligt Barslivo et al. [8].

9. Internationella program: strålningsinducerad de- gradering av betong

Internationellt har degradering i betong på grund av joniserande strålning identifierats som ett område där ökad information och kunskap behövs för att göra tillförlitliga bedömningar av statusen hos utsatta betongkonstruktioner. Framförallt är det kopplat till åldring och LTO (60 års – 80 års drifttid) av kärnkraftverken. Generellt sett, har betongkonstruktionernas prestanda i kärnkraftverken under de första ca 40 årens drift varit god [1, 84]. De skador som upptäckts har ofta varit kopplade till konstruktions- och tillverkningsfel eller felaktiga materialval [1, 84]. Därför kan man också förvänta sig att majoriteten av betongkonstruktionerna kommer fortsätta att möta de krav avseende funktion och säkerhet som ställs i framtiden. Dock räcker det inte ur ett säkerhetsperspektiv att *anta* att detta kommer gälla för alla betongkonstruktioner, speciellt med avseende på miljöfaktorer vilka hittills visat sig svårbedömda. Detta har uppmärksammats av flertalet nationella myndigheter och TH. Således har ett flertal internationella diskussioner förts under 2012 och 2013 för att etablera samarbeten. Syftet är att ta fram information om strålningens eventuella degraderande effekt på de mekaniska egenskaperna hos betong. Informationen ska sedan implementeras i pågående program för hantering av åldrande strukturer (*eng.* AMP) för att styra processerna för en säker drift.

Det ökade behov av kunskap kopplat till degradering av system, strukturer och komponenter (*eng.* system, structures and components (SSC)) har identifierats av myndigheten U.S. Department of Energy (DOE) för kärnkraft (DOE-NE) och även EPRI. Inom DOE-NEs 'Light Water Reactor Sustainability' (LWRS) program vilket drivs inom projektgrenen 'Material Aging and Degradation Pathway' togs 2010 en forskningsplan fram för utredning av åldrande- och degraderingsprocesser kopplade till betong och kärnkraftverk [85]. EPRI har sedan 2009 drivit ett projekt 'Long Term Operation' (vilket sedermera fick programstatus 2011) inom vilket man bedriver teknisk forskning och utveckling kopplat till åldring och degradering av SSC. I slutet av 2010 formulerades ett partnerskap [85] mellan EPRI-LTO och LWRS där följande fem områden identifierats kopplat till strålningsinducerad degradering av betong [1]:

1. Bedöma strålningsmiljön i biologiska skärmen i kärnkraftsreaktorer.
2. Genomföra experiment under accelererade strålningsflöden på prototypbetong med fluens i nivå med eller högre än vad som kan förväntas vid drift under LTO.
3. Samla in och utvärdera bestrålade provkroppar från kärnkraftverk.
4. Använda moderna karakteriseringsmetoder för materialkarakterisering för att utveckla en grundläggande förståelse för strålningens effekter på betong.
5. Etablera forskningssamarbete med internationella partners och universitet för att öka möjligheterna att förstå och begränsa de potentiella skador som strålning kan ge i betong.

Internationellt har EPRI-LTO och LWRS sökt samarbeten under 2012 – 2013 för att fånga in aktuella frågeställningar samt dela information. Samtal har förts med; Japanska forskningsorganisationer angående experiment på betong vid Haldens forskningsreaktor; VTT tekniska forskningsinstitut och Fortum för att dela information samt delta i en internationell insats för forskning kring strålningsinducerad degradering av betong; forskningscentret Rez i Tjeckien angående möjligheter för genomförande av accelererade neutronstrålningsexperiment vid LVR-15 reaktorn. Baserat på dessa samtal kommer ett internationellt samarbete, samt EPRI-LTO och LWRS egen forskning, bedrivas i riktningen [1]:

1. Definiera en övre gräns för förväntad neutronfluens och γ -dos vid förlängd drift.
2. Fastställa effekterna i betong av neutron- och γ -strålning.
3. Utvärdera möjligheterna att samla in provobjekt från nedlagda kärnkraftreaktorer, samt genomföra experiment på dessa provobjekt.
4. Utvärdera möjligheterna att genomföra experiment under accelererade strålningsflöden (neutron- och γ -strålning) på prototyp-betong med fluens i nivå med eller högre än vad som kan förväntas vid drift under LTO. Detta i syfte att etablera konservativa gränsvärden och/eller dela information från experiment med olika temperatur, strålningsflöden och fluens.
5. Utveckla samarbetsprogram för experimentell verksamhet för att öka tilliten till experimentella resultat från olika reaktorer och på olika typer av betong.
6. Öka kunskapen kring degraderingsmekanismerna i betongen på grund av strålning.

Inom EPRI-LTO programmet identifierades tidigare i år [84] två områden där behov av ytterligare forskning föreligger. Dessa är ASRs påverkan i betong samt bestrålningseffekter på betong, båda under LTO drift. Tabell 14 och Tabell 15 redovisar EPRIs tidsplan kopplat till dessa områden.

Tabell 14. EPRIs tidsplan för FoU aktiviteter kopplade till ASR och betong. Källa [84].

2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
ASR Risk Factors and Management						
Complete a map of types of aggregates used in nuclear plants (will build on LWRS Program Database)						
Catalog reactivity of aggregates used in the existing fleet based on current testing procedures						
Develop a toolbox with inspection procedures for utilities for early detection of ASR						
2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Tabell 15. EPRIs tidplan för FoU aktiviteter kopplade till strålningsinducerad degradering i betong. Källa [84].

2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Radiation Effects on Concrete						
Initial assessment of expected radiation exposure and effects based on available literature data						
	Irradiation testing of concrete specimens					
			Updated assessment of expected radiation exposure and effects			
2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019

Japan har även ett program för utvecklande av metoder för bedömning av tillståndet hos betongen i kärnkraftsanläggningar ”Japan Ageing Management Program for System Safety” finansierat av Japanska strålsäkerhetsmyndigheten. Inom programmet bedrivs bland annat verksamhet för att kartlägga effekten av joniserande strålning på betong. Japanska experiment är planerade att börja genomföras under 2013 [47]. I experimenten ska provkropparna exponeras för neutronfluens och γ -doser motsvarande PWR-miljö under 100 års drift. För att klara av det erfordras en accelerationsfaktor på 50 – 100, och därav krävs kylning för att hålla temperaturen i provkropparna under 65°C. Tabell 16 och Tabell 17 visar planerade aktiviteter samt förväntade resultat, kopplat till strålningsinducerad degradering, inom den experimentella delen av programmet.

Tabell 16. Experimentellt program. Källa Maruyama et al. [47].

Influencing Factors	Testing Materials and Examination Items			
Neutron Radiation	1 AGG. (JEEPII·PPT) Fluence vs. Density Energy vs. Density	2 HCP (JEEPII·PPT·IT) Chemical reaction Water decompos. Fluence vs. Prpty	3 CONC. (JEEPII·PPT) Fluence vs. Fc/Ec Strain vs. Fc/Ec	
	Gamma-ray Radiation	4 AGG. (Takasaki·PPT) Dose vs. Density Dose vs. Strength	5 HCP (Takasaki·IT) Chemical reaction Water decompos. Dose vs. Strength	6 CONC. (Takasaki·PPT) Dose vs. Fc/Ec Strain vs. Fc/Ec
		Heat and Drying	7 AGG. (NU) Water content vs. Strength/Young's modulus	8 HCP (NU, JEEPII·HT) Chemical reaction Water content vs. physical prpties.

JEEPII:OECD Halden, Takasaki: JAEA Takasaki Lab., NU:Nagoya Univ.
PT:Physical property Test, IT: Interaction Test

Tabell 17. Förväntade resultat. Källa Maruyama et al. [47].

Experimental Items	Expected results
Item 3. Conc.(PT) - Neutron Item 4. Conc.(PT) - Gamma ray	1) Simple reference level. 2) Fundamental data for concrete property change under irradiation condition for developing simulation codes.
Item 3 - Item 6 - Item 9	1) Effect of neutron on deterioration of concrete.
Item 6 - Item 9	1) Effect of gamma ray on deterioration of concrete.
Item 9	1) Effect of heat and drying on deterioration of concrete. 2) Relationship between volume change and property. 3) Relationship between damage and properties.
Item 3 + Item1 + Item2 + Item 4 + Item5	1) Major mechanism of concrete deterioration under neutron and gamma-ray irradiation condition.
Item 7 + Item 8	1) Effect of heat and drying on concrete components, property change and volume change.
Item 4 - Item 7 + Item 5 – Item 8	1) Effect of gamma ray on concrete components.
Item 1 – Item 4 – Item 7 Item 2 – Item 5 – Item 8	1) Effect of neutron on concrete components. 2) Reference level based on concrete components and fluence.

Baserat på information given i nyhetsblad och konferensartiklar kan man sluta sig till att frågan om strålningsinducerad degradering av betong vuxit sig starkare och nu är en aktuell frågeställning och ett pågående forskningsområde. Ett flertal nationer administrerar program inom vilka aktiviteter för kartläggning av effekten på mikronivå upp till kontinuumnivå bedrivs. Statusen inom programmen rörande aktuellt område verkar vara att någonstans mellan 20 % – 50 % av planerat arbete är utfört.

10. Slutsatser

Föreliggande rapport summerar en stor del av aktuell litteratur kopplat till strålningsinducerad degradering i betong. Majoriteten av forskningen inom området genomfördes på 1960- och 1970-talet men där också ett tydligt accelererat intresse för området kan ses från mitten av 00-talet fram till idag. Idag pågår ett flertal omfattande program med målet att ta fram metoder för bedömning av hållfastheten i betongen under LTO. I dessa program ingår strålningsinducerad degradering som en del av flera.

Betongstrukturer i kärnkraftverk, det vill säga reaktorinneslutningen, bassänger och framförallt biologiska skärmen, är delar som utsätts för joniserande strålning. Biologiska skärmen anses vara den del som exponeras för högst nivåer av joniserande strålning och således är den del med störst risk för strålningsinducerad degradering. Vidare kan konstateras att exponeringsnivåerna för biologiska skärmen i PWR miljö är högre jämfört med den för BWR miljö och där exponeringsnivån för betongen i PWR miljön är lägre med högre antal reaktorkylkretsar. Två typer av joniserande strålning är aktuella att beakta med avseende på biologiska skärmen: 1) neutronstrålning, 2) γ -strålning.

Neutronstrålning påverkar inte elektronerna i de atomer det kolliderar med utan enbart atomkärnorna. Ackumulerad stråldos neutroner per enhetsarea s.k. fluens anger antalet neutroner som passerat enhetsarean och anges med enheten n/cm^2 . När neutron med hög energi, s.k. snabba neutroner ($E > 0.1$ MeV), passerar genom ett material kommer dess rörelseenergi reduceras; först genom in-elasticiska kollisioner med atomkärnor varmed dislokationer uppstår; sedan när neutronernas energinivå sjunkit, genom elastiska kollisioner; och till sist absorberas neutronerna av atomkärnorna i materialet. Således påverkas gitterstrukturen i ett material när tillräcklig dislokationsdensitet uppnås, eller uttryckt som när en viss kritisk nivå på fluensen uppnås. Därför har neutroner en större påverkan på material med välorganiserade och strukturerade atomstrukturer. I betong utgörs dessa välstrukturerade atomstrukturer av ballasten vilken ofta har kristallstrukturer med hög densitet jämfört med cementpastan som har hög porositet och slumpartad struktur. Viktigt att komma ihåg här är att ballasten i betong ofta är tagen lokalt nära byggplatsen varför variationer i dess sammansättning är en regel. Vid kritisk nivå på fluensen kommer vissa typer av ballast att förändra sin interna struktur från organiserad kristallstruktur till oorganiserad amorf struktur, med minskad densitet och ökad volym som följd. Konsekvensen blir således att det som för en kristallstruktur är en kritisk nivå på fluensen blir för en population av betongsorter ett kritiskt område. Denna effekt kan ses i publicerade data över tryckhållfasthetens påverkan av ökad fluens där den relativa tryckhållfastheten först ser ut att vara opåverkad men sedan gradvis tenderar att minska med ökad fluens.

γ -strålning påverkar främst elektronerna i atomerna förbi vilka γ -strålningen passerar. Därför är γ -strålningens påverkan på ett material beroende av vilken typ av kemisk bindning materialet har. Solida material med jon- och metallbindningar påverkas mycket lite av γ -strålning jämfört med material med kovalenta bindningar. Kovalenta bindningen är svagare och kan därför lättare skadas och brytas sönder av γ -strålning. I betong finner man kovalenta bindningar främst i ballasten jämfört med atomerna i armeringen vilka binds samman av metallbindningar. Således är γ -strålningen skadligare för ballasten än för armeringen. Neutronerna har dock skadlig inverkan på både betong och armering där en förskjutning av omslagstemperaturen för sprödbrott sker mot högre temperaturer. Vidare vid förlängda drifttider kan s.k. ”late-blooming phases” uppkomma i stål, vilket innebär att metallföreningar nick-

el och mangan fällt ut och ansamlas i kluster. Konsekvensen blir minskad duktilitet vilket kan bli en försvårande omständighet vid förlängd drift.

Betong innehåller vatten vars molekyler kan separeras till atomer av γ -strålning genom s.k. radiolys. Resultatet blir vätgas, syrgas och väteperoxid vilket har visat sig kunna accelerera karboniseringsprocessen avsevärt; men även starta processen inne i betongen vilket traditionellt inte ansetts kunna ske. Experimentella studier visar också att γ -strålning signifikant ökar reaktiviteten hos silikatrika kvartser med konsekvensen att ASR katalyseras i betong med ballast som typiskt inte är reaktiv. Vattnet i betongen kan också förångas och frigöras från betongen genom γ -strålning; med resultatet att cementpastan vilken innehåller merparten av allt vatten i betongen minskar sin volym. Ballasten innehåller relativt sett en mindre del vatten varför förångning inte verkar vara ett problem här.

Mycket förenklat visar litteraturen att neutronstrålning påverkar ballasten med en volymökning som följd medans γ -strålning påverkar cementen med en volymminskning som följd. Följaktligen uppstår inre spänningar i betongen med mikrosprickor som resultat. Emellertid uttrycker många forskare ett ökat behov att kunskap kring den degraderade process på atom- och mikronivå som sker i betong under bestrålning, vilken till stor del troligen är okänd. Detta för att kunna motivera och utveckla sina skademodeller och i förlängningen bygga AMPs baserat på reell kunskap.

Mängden forskningsresultat relaterat till strålningens påverkan på de mekaniska egenskaperna, och då framförallt tryckhållfastheten hos betongen, är mycket begränsad. Experiment med neutronstrålning med snabba neutroner (och γ -strålning) visar att tryckhållfastheten hos betong är relativt opåverkad upp till ett område begränsat av 1×10^{19} n/cm² – 4×10^{19} n/cm². I litteraturen noteras ofta 1×10^{19} n/cm² som en kritisk nivå, ofta med referens till litteraturstudien skriven av Hilsdorf et al. år 1978. Dock behöver dessa resultat verifieras då många av de tidiga experimenten genomfördes med, för LWR icke-representativ betong, och med provmetoder som inte motsvarar miljön för LWR inneslutningar, speciellt gäller det data vid höga fluenser. När det gäller filtrerad γ -strålning och dess påverkan visar begränsad experimentella data att en minskning av tryckhållfastheten på 10 % eller mindre kan uppkomma vid γ -dos 5×10^5 Gy. Detta resultat bygger på data som visar stor spridning varför resultatet ska tolkas med försiktighet. Studier i vilka γ -strålningens degraderande påverkan på tryckhållfastheten i betong studeras är i princip obefintliga.

I ett antal normer och standarder finns gränser givna för ackumulerad stråldos i betong. Gränserna är i princip satta utifrån att de mekaniska egenskaperna inte får bli för låga som ett resultat av bestrålning. Gränsen given i ASME BPVC är 1×10^{19} n/cm² för snabba neutroner och 2×10^8 Gy för γ -strålning och den huvudsakliga referensen är litteraturstudien skriven av Hilsdorf et al.; med data vilka är konstaterade icke applicerbara för LWR miljö.

Sammanställningen av resultat i denna rapport visar att neutron- och γ -strålning sannolikt har en påverkan på betongens mekaniska egenskaper (tryckhållfastheten). Däremot är det svårt att uttala sig om det kommer bli ett reellt problem för reaktorinneslutningar i LWR miljö under LTO på grund av konstaterade brister i tidigare publicerad experimentell data. Detta har myndigheter och TH insett och således pågår ett antal nationella och internationella program och samarbeten. Från dessa program kommer tydligare svar angående effekten av strålningsinducerad degradering hos betong fås inom en 5-års period baserat på redovisade projektplaner. Vad gäller läckströmmar och elektro-kemisk korrosion har ingen litteratur gått att finna direkt kopplad armering i betong och kärnkraftverk. Den mest effektiva åtgär-

den för att förhindra angrepp av läckströmskorrosion i armering är att försäkra sig om att omgivande betong inte är drabbad av karbonatisering och inte är förorenad av klorider. Om båda dessa kriterier är uppfyllda är sannolikheten för läckströmskorrosion liten även om konstruktionen utsätts för läckströmmar. Efter en genomgång av data från litteratur över korrosion på armering är kloridinducerad korrosion den i särklass vanligaste följt av karbonatisering på en klar andraplats. Övriga korrosionstyper, till exempel läckströmskorrosion, är ovanliga.

11. Rekommendationer & förslag till fortsatta insatser

Utifrån de tvetydiga forskningsresultat angående strålningsinducerad degradering i betong, som rapporteras här, rekommenderas en fortsatt bevakning av pågående internationella forskningsprogram och deras resultat. Två förslag till fortsatta aktiviteter inom strålningsinducerad degradering föreslås:

1. Upprätta aktivt deltagande/bevakning i någon av internationella samarbetsprogram som pågår. Baserat på informationen given i publikationer under senare år verkar projekten befinna sig inom första halvan av sin planering.
2. I slutet av 2016 eller under 2017 görs lämpligen en litteraturstudie med syftet att sammanställa utfallet av pågående forskningsprogrammets resultat samt övriga publicerade resultat. Vid den tidpunkten bör information finnas tillgänglig för en mer tillförlitlig bedömning av risknivån med avseende på strålningsinducerad degradering i betong.

12. Erkännanden

Denna litteraturstudie är finansierad av strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. Författarna och projektdeltagare tillstår sin tacksamhet för möjligheten att genomföra studien. Vidare vill författarna tacka Tekn. Dr. Peter Segle för granskning av dokumentet.

13. Referenser

- [1] LWRS Newsletter, U.S. Department of Energy, nr 12, September 2013.
- [2] Taylor, H. F. W., "Cement Chemistry," Academic Press, 1990.
- [3] Kontani O., Swada S., Takizawa M., Maruyama I., Sato O., "Evaluation of Irradiation Effects on Concrete Structures – Γ -ray Irradiation Tests on Cement Paste", Proc. of the ASME 2013 Power Conference, 2013.
- [4] Lagerblad B., Westerholm M., Fjällberg L. & Gram H-E. "Bergkrossmaterial som ballast betong", CBI-rapport nr 1:2008. CBI Betonginstitutet, Stockholm, 2008.
- [5] Burström P. G. "Byggnadsmaterial", Lund, Studentlitteratur, 2007.
- [6] Thomas J., Jennings H., http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5_3.html, Northwestern university, Evanstone, IL. Hämtat 2013-11-19.
- [7] Naus D. "The effect of elevated temperature on concrete materials and structures – A literature review", Prepared for N.U.REG, ORNL/TM-2005/553, 2005.
- [8] Barslivo G., Österberg E. & Aghili B. "Utredning kring reaktorinneslutningar – konstruktion, skador samt kontroller och provningar", SKI Rapport 02:58, 2003.
- [9] Roth T., Silfwerbrand J. & Sundquist H. "Betonginneslutningar i svenska kärnkraftverk", SKI Rapport 02:59, 2002.
- [10] Silfwerbrant J., Sundquist H. "Drift, underhåll och reparation av Konstbyggnader". Kungliga Tekniska Högskolan (KTH). Institutionen för byggkonstruktion, TRITA-BKN. Rapport 53, Brobyggnad utgåva 2, 2001. ISSN 1103-4289.
- [11] Naus D., Oland C. B., Ellingwood B. R. "Report on Aging Nuclear Power Plant Reinforced Structures", NUREG/CR-6424, ORNL/TM 13148, 1966.
- [12] Naus D. "Concrete Component Aging and its Significance Relative to Life Extension of Nuclear Power Plants", NUREG/CR-4652, 1986.
- [13] Byfors K., Fratesi R., Grønvold F., Gudmundsson G., Janz M., Klinghoffer O., Mattila J., Miller J. B. & Poulsen E. "Repair and Maintenance of Concrete Structures. Repair Methods – A Review", Norwegian Public Roads Administration, 2004. ISBN 82-91228-28-0.
- [14] Clifton J. R. "Predicting remaining service life of concrete", Technical report NISTIR-4712, National Institute of Standards and Technology, 38-39, 1991.
- [15] Jönsson H., Tornberg R. "Betongens hållfasthet vid moderata temperaturbelastningar", Elforsk rapport 13:84, 2013.
- [16] Kuhl D., Bangert F., Meschke G. "Coupled Chemo-Mechanical Deterioration of Cementitious Materials. Part 2, Numerical Methods and Simulations", International Journal of Solids and Structures, Vol. 41, No. 1, Pages 41-67, January 2004.
- [17] Bangert F., Grasberger S., Kuhl D., Meschke G. "Environmentally Induced Deterioration of Concrete: Physical Motivation and Numerical Modeling", Engineering Fracture Mechanics Vol. 70, No. 7-8, May 2003.
- [18] Terminologicentrum, <http://www.tnc.se/>.
- [19] Metals Handbook, Ninth edition, volume 13 – Corrosion, ASM International, 1987.
- [20] <http://www.corrosion-doctors.org/StrayCurrent/Transit-Systems.htm>.
- [21] http://qualitymarineservices.net/stray_current_corrosion.html.
- [22] Roberge Pierre, Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, 2000.
- [23] Durning, E.D.D, Corrosion Atlas, Elsevier 1991.
- [24] Mattsson E. Elektrokemi och korrosionslära, Korrosionsinstitutet, 1987.
- [25] Bertolini L, Elsener B., Pedferri P., Polder R.B., Corrosion of Steel in Concrete, John Wiley & Sons, 2004.

- [26] Bertolini, L., Carsana, M., Pedferri P., Corrosion behavior of steel in concrete in the presence of stray current, *Corrosion Science* 49 (2007) 1056–1068.
- [27] Lindmark, S., Sederholm, B., Korrosion på stål i betong i kylvattenvägar, Delrapport I - Litteraturgranskning, Elforsk rapport 10:82, 2010.
- [28] Verma, N., Balasubramaniam, R., Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete, Indian Institute of Technology, Kanpur, 2009.
- [29] Song, G., Shayan, A., Corrosion of Steel in concrete: causes, detection and prediction, State-of -the -art Review, ARRB Transport Research Ltd, Review Report 4, 1998.
- [30] Grinder, O, Vad händer i kopparkorrosionsfrågan?, PM Technology AB, 2012.
- [31] Sandberg, B., Ahlström, J., Tidblad, J, Sederholm, B., Korrosion på stål i betong i kylvatten-vägar, Delprojekt 3 – Korrosion på stål i vattenmättad betong, Elforsk rapport 10:84, 2009
- [32] Lingvay, C., Cojocar, A., Visan, T., Lingvay, I., Degradation of reinforced concrete structures due to DC and AC stray currents, *U.P.B. Sci. Bull., Series B*, Vol. 73, Iss. 4, 2011.
- [33] Villalobos J., A Pipeline Failure Due to Stray-Current, *Infrastructure Preservation News*, Vol 2 No 2, October 2004.
- [34] S. Srikantha, T.S.N. Sankaranarayanan, K. Gopalakrishna, B.R.V. Narasimhana, T.V.K. Dasa, Swapan Kumar Dasb, Corrosion in a buried pressurised water pipeline, *Engineering failure analysis*, Volume 12, Issue 4, August 2005.
- [35] Kaplan M. F. “Concrete radiation shielding: nuclear physics, concrete properties, design and construction”, Longman Scientific & Technical, 1989. ISBN 0-582-03773-5.
- [36] Mirhosseini, S., “The Effects of Nuclear Radiation on Aging Reinforced Concrete Structures in Nuclear Power Plants”, Master’s thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [37] Fillmore D. L., “Literature Review of the Effects of Radiation and Temperature on Aging of Concrete”, INEEL/EXT-04-02319, Idaho Falls, Idaho, 2004.
- [38] Esselman T., Bruck P., “Expected Conditions of Concrete at Age 80 Years of Reactor Operation”, Lucius Pitkin, Inc. UT-Battelle Energy Alliance, LLC ORNL, Report No. A13276-R-001, 2013.
- [39] Acevedo C. E., Serrato M. G., “Determining the Effects of Radiation on Aging Concrete Structures of Nuclear Reactors – 10243”, WM2010 Conference, Phoenix, AZ, 2010.
- [40] Naus D., “Task Group Report on Aging of Concrete Structures Used to Construct Nuclear Power Plant Fuel-Cycle Facilities”, NEA/CSNI/R(2002)14, OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France, 2002.
- [41] Hilsdorf H., Kropp J., Kock H. “The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties Concrete”, American Concrete Institute SP 55-10, 1978.
- [42] Houben J. A., “Radiation of mortar specimens”, Commission of the European Communities, Brussel, Pages 170 – 183, 1969.
- [43] Price B. T., Horon C. C., Spinney K. T., “Radiation Shielding”, Pergamon, London, New York, Paris, 1957.
- [44] Vodak F., Trtik K., Sopko V., Kapickova O., Demo P. ”Effect of γ – Irradiation on Strength of Concrete for Nuclear-Safety Structures”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Pages 1447-, 2005.
- [45] Fujiwara K., Ito M., Sasanyama M., Sasanuma M., Tanaka H., Hirofani K., Onizawa K., Suzuki M., Amezawa H. ”Experimental Study of the Effect of Radiation Exposure to Concrete”, 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20), Espoo, Finland, Augusti 9 – 14 , 2009.

- [46] Ichikawa T., Kimura T., "Effect of Nuclear Radiation on Alkali-Silica Reaction of Concrete", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 44, No. 10, Pages 1281-1284, 2007.
- [47] Maruyama I., Kontani O., Sawada S., Sato O., Igarashi G., Takizawa M. "Evaluation of Irradiation Effects on Concrete Structure – Background and Preparation of Neutron Irradiation Test", *Proceedings of the ASME 2013 Power Conference*, Boston, USA, Juli 29 – Augusti 1, 2013.
- [48] Busby J. T., Privat kommunikation 2013-11-26. Projektledare och forskare inom "Materials Aging and Degradation Pathway" ORNL, USA.
- [49] Remec I., "Radiation Environment in concrete Biological Shields of Nuclear Power Plants", ORNL.
- [50] US NRC Regulatory Guide 1.99, Rev. 1, "Effects of Residual Elements on Radiation Damage to Reactor Vessel Materials", April 1977.
- [51] US NRC Regulatory Guide 1.99, Rev. 2, "Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials", May 1988.
- [52] Transware Enterprises (TwE) Report No. TWE-LPI1-001-R-001, Rev. 0 "An Evaluation of Neutron, Gamma, and Temperature Profiles in a Three Loop PWR Biological Shield", 2013.
- [53] Kontani O., Ichikawa Y., Ishizawa A., Takizawa M., Sato O., "Irradiation Effects on Concrete Structures", *Proc. of International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants*, Pages 173 – 182, 2010.
- [54] Kaspar W., Yunping X., Naus D., "A Review of the Effects of Radiation on Microstructure and Properties of Concretes Used in Nuclear Power Plants", NUREG/CR-7171, ORNL/TM-2013/263, 2013.
- [55] Lagerblad B., Trägårdh J., "Alkalisilikareaktioner i Svensk Betong", CBI-rapport 4:92, Pages 77, 1992.
- [56] Lagerblad B., Trägårdh J., "Slowly Reacting Aggregates in Sweden- Mechanism and Conditions for Reactivity in Concrete", *Proceedings, 9th International Conference on Alkali-aggregate Reactions*. Pages 570-578, London, 1992.
- [57] Fournier B., Bérubé M.-A., "Alkali-aggregate Reaction in Concrete: a Review of Basic Concepts and Engineering Implications", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 27, 2000.
- [58] Alkali-silica reaction in concrete. <http://www.understanding-cement.com/alkali-silica.html>.
- [59] Alkali-Silica Reaction. <http://www.concreteconstruction.net/concrete-masonry/alkali-silica-reaction.aspx>.
- [60] Ichikawa T., Miura M., "Modified Model of Alkali-Silica Reaction", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 2007.
- [61] Ichikawa T., Koizumi H., "Possibility of Radiation-induced Degradation of Concrete by Alkal-Silica Reaction of Aggregates", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 39, 2002.
- [62] Primak W. et al.. "Effects of Nuclear Reactor Exposure on Some Properties of Vitreous Silica and Quartz", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 38(4), Pages 135-139, 1955.
- [63] Primak W. et al.. "Fast Neutron-Induced Changes in Quartz and Vitreous Silica", *Physical Review*, Vol. 110(6), Pages 1240-1254, 1958.
- [64] Gray B. S. "The Effect of Reactor Radiation on Cements and Concretes", *Commission of the European Communities, Luxembourg*, Pages 17 – 39, 1966.
- [65] Bar-Nes G., Katz A., Peled Y., Zeiri Y., "The Combined Effect of Radiation and Carbonation on the Mobilization of Sr and Cs Ions in Cementitious Pastes", *Materials and Structures*, Vol. 41, Pages 1563 – 1570, 2008.

- [66] Bouniol P., Aspart A., "Disappearance of Oxygen in concrete under Irradiation: The Role of Peroxides in Radiolysis", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, Pages 1669 – 1681, 1998.
- [67] Vodák F., Trtík K., Sopko V., Kapičková O., Demo P. "Effect of γ -Irradiation on Strength of Concrete for Nuclear Safety Structures", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Pages 1447 – 1451, 2005.
- [68] Clark R. "Radiation Damage to Concrete", Hanford Atomic Products Operation report, HW-56195, March 31 1958.
- [69] Blosser T.V., Bond G.W., Lee L.A., Morgan D.T., Reid R.C., Reynolds A.B., Speidel T.O.P., Vroan D.W., Welt M.A., "A Study of the Nuclear and Physical Properties of the ORNL Graphite Reactor Shield", Oak Ridge National Laboratory, 1959.
- [70] Sommers J. F., "T- Radiation Damage of Structural Concrete Immersed in Water," *Health Physics*, Pergamon Press, Vol. 16, Pages 503 – 508, 1969.
- [71] Dubrovskii V.B., Ibragimov S.S., Ladygin A.Y., Pergamenshchik B.K., "Effect of Neutron Irradiation on Some Properties of Heat-Resistant Concretes", *Atomnaya Energiya*, Vol. 21, Pages 108 – 112, 1966.
- [72] Dubrovskii V.B., Ibragimov S.S., Kulakovskii M.Y., Ladygin A.Y., Pergamenshchik B.K., "Irradiation Damage in Ordinary Concretes", *Atomnaya Energiya*, Vol. 23, Pages 310 – 316, 1967.
- [73] Dubrovskii V.B., Ibragimov S.S., M.Y., Ladygin A.Y., Kulakovskii M.Y., Pergamenshchik B.K., "Radiation Stability of Serpentine Concrete", *Atomnaya Energiya*, Vol. 25, Pages 515 - , 1968.
- [74] Naus D. J., "A Compilation of Elevated Temperature Concrete Material Property Data and Information for Use in Assessments of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures", NUREG/CR-7031, 2011.
- [75] Komonen J., Penttala V., "Effects of High Temperature on the Pore Structure and Strength of Plain and Polypropylene Fiber Reinforced Cement Pastes", *Fire technology*, Vol. 39, Pages 23 – 34, 2003.
- [76] Alexander S. C., "Effects of Irradiation on Concrete, Final Results", *Atomic Energy Research Establishment, Harwell*, Vol. 34, 1963.
- [77] Batten A. W. Ch., "Effect of Irradiation on the Strength of Concrete", *Atomic Energy Research Establishment, Harwell*, Vol. 13, 1960.
- [78] Pedersen A., "Radiation Damage in Concrete – Measurements on Miniature Specimen of Cement Mortar", *Commission of the European Communities, Luxembourg*, Pages 5 – 16, 1971.
- [79] Dubrovskii V. B., et al. "Hematite concrete for shielding against high neutron fluxes", *Translated from Atomnaya Energiya*, Vol. 28, 1970.
- [80] Dubrovskii V. B. et al., "Radiation damage in ordinary concrete", *Translated from Atomnaya Energiya*, Vol. 23, Pages 310 – 316, 1967.
- [81] Gray B.S., "The Effect of Reactor Radiation on Cements and Concrete", *Commission of the European Communities Luxembourg*, Pages 17 – 39, 1972.
- [82] Nanstad R. K., Miller M. K., Lewis W. D., "Results of Examinations of Surveillance Specimens from Commercial Reactors", *ORNL/TM-2012/447*, 2012.
- [83] American Nuclear Society, *Guidelines on the Nuclear Analysis and Design of Concrete Radiation Shielding for Nuclear Power Plants*, American National Standard, ANSI/ANS-6.4-1985, La Grange Park, Illinois, 1985.
- [84] *Long-Term Operations Program: Assessment of Research and Development Supporting Aging Management Programs for Long-Term Operation*. EPRI, Palo Alto, CA: 2013. 3002000576.
- [85] *DOE-NE Light Water Reactor Sustainability Program and EPRI Long-Term Operations Program – Joint Research and Development Plan, Revision 2*, INL-EXT-12-24562, April 2013.



2014:31

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 315 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-17116 Stockholm
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: registrator@ssm.se
Web: stralsakerhetsmyndigheten.se