

## Forskning

---

# Knallgas i kokarreaktorer

Mats Ullberg

November 2002

# SKI perspektiv

## Bakgrund

I slutet av 2001 skedde två uppmärksammade incidenter orsakade av knallgasdeflagration, en i Japan och en i Tyskland. I Hamoka-1 gick en rörböj i en 150 mm ledning i resteffektkylsystemet till brott, och i Brunsbüttel gick en 100 mm ledning i sprinklersystemet för reaktortankflänsen till brott över en längd av mellan 2 och 3 meter. Dessa incidenter har resulterat i aktiviteter hos andra myndigheter såsom US NRC som har gett ut en ”Information Notice” för att uppmärksamma kraftverken om dessa. I Sverige har ett antal mycket mindre incidenter inträffat där knallgas har samlats i oväntade systemdelar.

Rapporten omfattar en beskrivning av knallgasproduktion i kokvattenreaktorer som resultat av radiolys i härden. Dessutom diskuteras olika sätt som knallgas förbränns och vilka kan förväntas ske i kokvattenreaktorer. De mesta av knallgasen ansamlas och omhändertas i turbinkondensorn evakuerings- och i avgassystem. Dessa system har fungerat i stort sett problemfritt i så gott som alla svenska kokvattenreaktorer.

Knallgas kan även ansamlas i andra trycksatta rörledningar och komponenter där förhållandena finns för stillastående ånga att kondensera. Under vissa omständigheter kan en brännbar blandning av knallgas och ånga uppstå och antändas, ofta med deformation av komponenten som resultat på grund av det kraftigt ökat trycket.

Problemet var inte tillräckligt uppmärksammat vid konstruktion av anläggningarna. För ca. 20 år sedan blev svenska kraftföretagen uppmärksamma på problemet men då åtgärdades problemet inte fullt ut. Några exempel på identifierade och åtgärdade problem ges i rapporten med tyngdpunkten på nordiska reaktorer.

## Syfte

Statens kärnkraftinspektion behöver försäkra sig om att risken för likartade händelser såsom i ovannämnda fall är minimala i de svenska kokvattenreaktoranläggningarna. Detta uppdrag är ett viktig led i arbetet eftersom det utgör en sammanställning av tillgänglig information med bäring på händelserna i kokvattenreaktorer.

## Resultat

Denna rapport ger en bra sammanfattning av grundläggande information som kan fungera som en introduktion till problemet för berörda personer på kraftföretagen och myndigheter.

## Projektinformation

SKI:s handläggare för projektet har varit Karen Gott.

Projektnummer: 02091

Dossier/Darienummer: 14.41-020465

## Forskning

---

# Knallgas i kokarreaktorer

Mats Ullberg

Studsvik Nuclear AB  
SE-611 82 Nyköping  
Sweden

November 2002

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Statens kärnkraftinspektion, SKI. Slutsatser och åsikter som framförs i rapporten är författarens/författarnas egna och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med SKI:s.

# Innehåll

<b>Sammanfattning</b> .....	<b>i</b>
<b>Summary</b> .....	<b>ii</b>
<b>Inledning</b> .....	<b>1</b>
<b>Knallgas i kokarreaktorer</b> .....	<b>4</b>
Henry's lag .....	4
<b>Knallgasförbränning</b> .....	<b>6</b>
Antändning av knallgas .....	6
Deflagration.....	6
Detonation .....	8
Deflagration eller detonation i kokarreaktorer? .....	10
<b>Knallgasansamling i kokarreaktorer</b> .....	<b>12</b>
Förutsedda problem med knallgas i kokarreaktorer .....	12
Samband mellan knallgashalt och temperatur i ångsystem .....	13
Oförutsedda problem med knallgas i kokarreaktorer .....	14
Exempel 1 – Rätt konstruerat nivåreferenskärl .....	14
Exempel 2 – Fel konstruerat nivåreferenskärl .....	15
Exempel 3 – Ångläckage .....	16
Uppstartsfall .....	17
Knallgas och högpunkter .....	19
Konsekvenser av vätekemi (HWC) .....	21
<b>Möjliga motåtgärder mot knallgasansamling</b> .....	<b>22</b>
<b>Några erfarenheter från nordiska kokarreaktorer</b> .....	<b>24</b>
<b>Litteratur om knallgas</b> .....	<b>25</b>
<b>Referenser</b> .....	<b>26</b>

# Sammanfattning

Strålningen i härden i en kokarreaktor sönderdelar en liten andel av vattnet till väte och syre. Fenomenet benämns radiolys och den ansamlade gasen knallgas. Knallgasen övergår till ångan vid kokningen. En 1000 MWe kokarreaktor producerar ca 1,5 ton ånga och 25 g knallgas per sekund. Praktiskt taget all knallgas ansamlas i turbinkondensorn och tas omhand av kondensorns evakueringssystem samt avgassystemet. Dessa system har fungerat i stort sett problemfritt i så gott som alla kokarreaktorer.

Knallgas kan även ansamlas då stillastående ånga kondenserar i trycksatta rörledningar och komponenter på grund av värmeförluster. Under vissa omständigheter kan en brännbar blandning av knallgas och ånga utbildas. Vid ett antal tillfällen har den ansamlade knallgasen antänts. Den normala konsekvensen av en sådan incident är att berörda komponenter deformeras, men även brott genom inre övertryck har inträffat.

Ansamling av knallgas i ångsystemen förbisågs i stort sett av konstruktörerna av kokarreaktorer (ett troligt tekniskt motiv härför anges i rapporten) och problemet fick hanteras av kraftbolagen. Trots att man blev medveten om problemet för ca. 20 år sedan tycks ännu inte tillräckliga motåtgärder ha vidtagits i alla kokarreaktorer. Uppmärksammade rörbrott har nyligen inträffat i en tysk och en japansk kokarreaktor och en explosion i en styrventil i reaktorns avblåsningssystem orsakade en avställning i en svensk kokarreaktor under 2002. Dessa nyligen inträffade incidenter visar att motåtgärderna mot knallgasansamling i kokarreaktorer bör ses över, i vissa fall kanske även kompletteras.

Föreliggande rapport utgör en kortfattad sammanställning av grundläggande information med bäring på knallgasansamling i kokarreaktorer. Det är författarens förhoppning att sammanställningen skall kunna fungera som en introduktion till problemet för berörda personer på kraftbolag och myndigheter.

# Summary

The radiation in the core region of Boiling Water Reactors (BWRs) decomposes a small fraction of the coolant into hydrogen and oxygen, a phenomenon termed radiolysis. The radiolysis gas partitions to the steam during boiling. A 1000 MWe BWR produces around 1.5 tons of steam, containing 25 grams of radiolysis gas, per second. Practically all of the radiolysis gas is carried to the condenser and is taken care of by the condenser evacuation system and the off-gas system. The operation of these systems has been largely trouble-free.

Radiolysis gas may also accumulate when stagnant steam condenses in pressurized pipes and components as a result of heat loss. Under certain circumstances a burnable mixture of hydrogen, oxygen and steam may form. Occasionally, the accumulated radiolysis gas has ignited. These incidents typically result in deformation of the components involved, but overpressure bursts have also occurred.

Radiolysis gas accumulation in steam systems was largely overlooked by BWR designers (a likely technical reason for this is given in the report) and the problem had to be addressed by utilities. Even though the problem was recognized two decades ago, the counter-measures of today seem not always to be sufficient. Pipe-burst incidents in a German and a Japanese BWR recently attracted attention. Also, damage to a pilot valve in the steam relief system of a Swedish BWR forced a reactor shut-down during 2002. The recent incidents indicate that countermeasures against radiolysis gas accumulation in BWRs should be reviewed, perhaps also improved.

The present report provides a short compilation of basic information related to radiolysis gas accumulation in BWRs. It is hoped that the compilation may prove useful to utilities and regulators reviewing the problem.

# Inledning

I kokarreaktorer sönderdelas vattnet i reaktorhärden i viss utsträckning av strålningen, så kallad radiolys. Vid radiolysen bildas de flyktiga nedbrytningsprodukterna väte och syre i förhållandet 2:1, dvs. samma som i vatten. Denna gasblandning benämns knallgas. Halten knallgas är normalt låg i vatten och ånga. Om knallgasen anrikas på något ställe kan den emellertid genom sin brännbarhet komma att utgöra ett potentiellt hot mot reaktorsäkerheten, anläggnings säkerheten eller personsäkerheten.

Knallgasen transporteras normalt med ångan från reaktorn och ansamlas i turbin-kondensorn, där ångan kondenserar. Alla kokarreaktorer är därför utrustade med avgassystem för att omhänderta knallgasen i turbinkondensorn på ett ändamålsenligt och säkert sätt. Bortsett från några tidiga problem i utländska kokarreaktorer har drifterfarenheterna av systemen för omhändertagande av knallgasen varit goda.

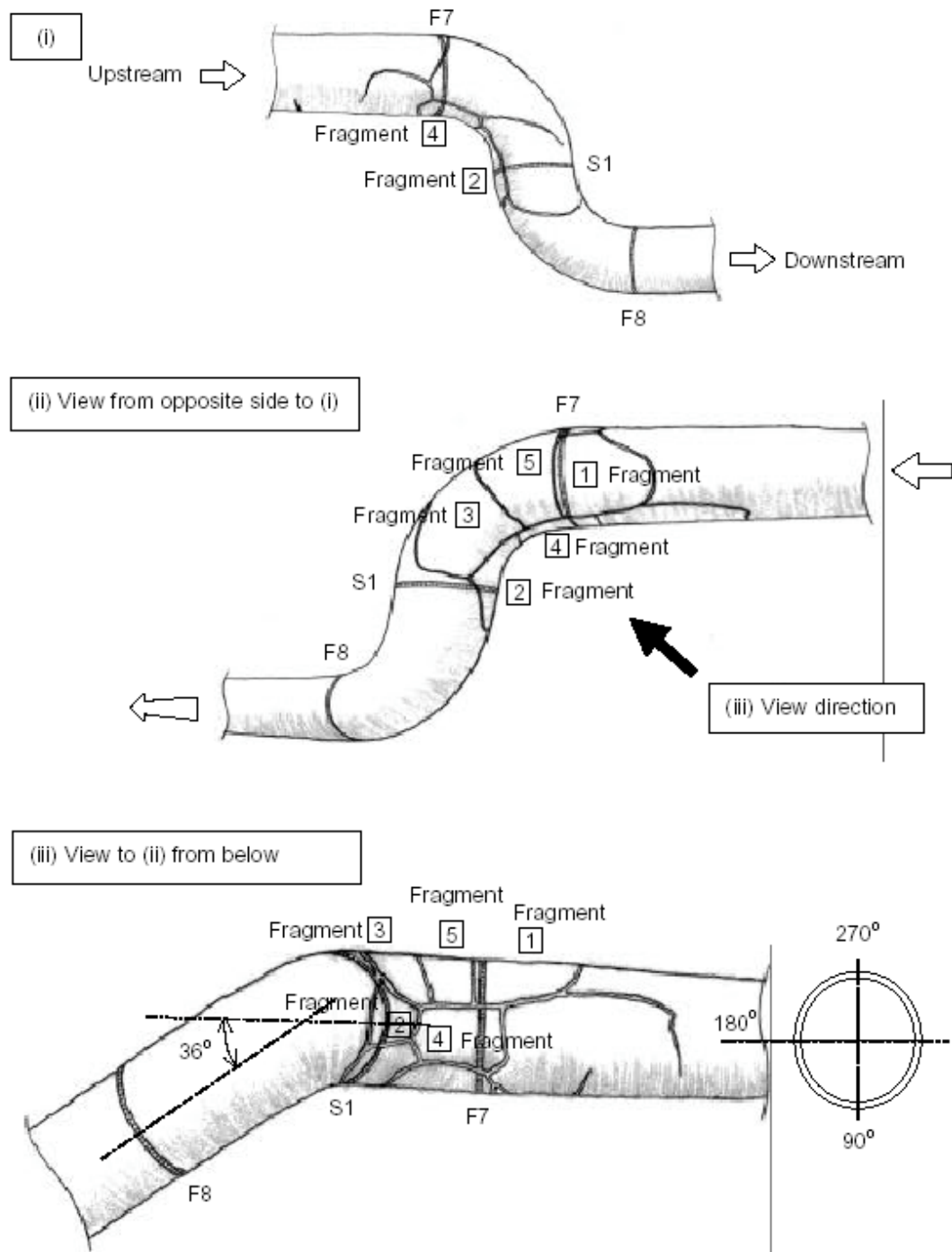
Med tiden har det visat sig att knallgas även kan ansamlas på ställen i kokarreaktorer där mindre mängder ånga kondenserar, vanligen på grund av värmeavgivning från systemdelar fyllda med stillastående ånga. Vid ett antal tillfällen har ansamlad knallgas antänts. Mindre anläggnings skador, typiskt deformation av någon komponent, har inträffat till följd av tryckstegringen. Åtgärder för att förhindra sådana händelser har efter hand vidtagits i flertalet kokarreaktorer. Trots motåtgärderna har i några fall händelser av samma typ åter inträffat.

Under slutet av år 2001 inträffade två uppmärksammade knallgasincidenter i utländska kokarreaktorer. Incidenterna medförde ovanligt omfattande skador på anläggningarna. I den japanska reaktorn Hamaoka-1 antändes knallgas i ett rör av kolstål med diametern 150 mm i resteffektkylsystemet. En rörböj demolerades helt, se figur 1.



*Figur 1: Rörböj DN 150 med godstjocklek 11 mm skadad vid en knallgasincident i den japanska kokarreaktorn Hamaoka-1 (Chubu Electric Power Company, med tillstånd).*

Röret skadades på ett sätt som tyder på att den utsatts för en mycket snabb och kraftig trycktransient, figur 2.



Figur 2: Skadad rörböj DN150 i Hamaoka-1 (från Investigation Report... (2002)).



Ett par av rörets förankringar slets av och röret uppströms brottstället förflyttade sig upp till ett par meter från sitt ursprungliga läge. Deformation av röret (ökad diameter) uppströms brottstället noterades också.

I den tyska kokarreaktorn Brunsbüttel inträffade en liknande skada i ett rör till en stril avsedd att kyla reaktortanklockets fläns under nedgång till kall reaktor. Två till tre meter av en ledning med diametern 100 mm förstördes helt.

I svenska kokarreaktorer har de flesta knallgasincidenterna rört styrventiler till större ventiler i ångsystem. I allmänhet har skadorna inskränkt sig till deformation av komponenter i styrventilerna. Skador är kända sedan tidigt 1980-tal och motåtgärder har vidtagits. Trots dessa inträffade åter en incident med en styrventil i en svensk kokarreaktor under 2002.

De nyligen inträffade incidenterna tyder på att man ännu inte fullständigt bemästrat problemen med knallgas i kokarreaktorer och att fortsatta insatser är nödvändiga. Denna sammanställning av information om knallgas i kokarreaktorer är avsedd att vara till hjälp i det arbetet.

# Knallgas i kokarreaktorer

I en vattenkyld reaktor deponeras strålningsenergi i vattnet i reaktorhärden. En effekt av bestrålningen av vattnet är att vattenmolekyler bryts ner till enklare, reaktiva fragment. Dessa reagerar med varandra och bildar delvis nya ämnen. Fenomenet benämns radiolys, strålningsbetingad sönderdelning (jfr elektrolys, elektriskt betingad sönderdelning).

Vid radiolys av vatten bildas de stabila radiolysprodukterna väte, syre och väteperoxid. Utöver dessa bildas även kortlivade molekyelfragment, s.k. radikaler, som snabbt reagerar med varandra och med de stabila radiolysprodukterna. Om de stabila radiolysprodukterna inte bortförs från vattnet ökar halterna och man når så småningom ett jämviktsläge. Jämviktsläget är beroende av om vattnet från början innehåller ett överskott av syre/väteperoxid eller väte.

Om väte tillförs initialt blir jämviktshalterna av radiolysprodukter i vattnet mycket låga. Detta utnyttjas i tryckvattenreaktorer för att hålla en reducerande vattenkemi i reaktorkretsen. Tillsats av väte vid uppstart av reaktorn ger ett jämviktsläge med mycket låga halter av syre och väteperoxid i vattnet, trots radiolys.

I kokarreaktorer leder kokningen till att vattnet avgasas kontinuerligt. Flyktiga radiolysprodukter, väte och syre, följer till stor del med ångan och en fortgående produktion av radiolysgas sker i härden. Fördelningen av gaserna väte och syre mellan vatten och ånga styrs av Henry's lag. Denna lag är ett mycket viktigt hjälpmedel vid analys av hur knallgas transporteras och ackumuleras i kokarreaktorer.

## Henry's lag

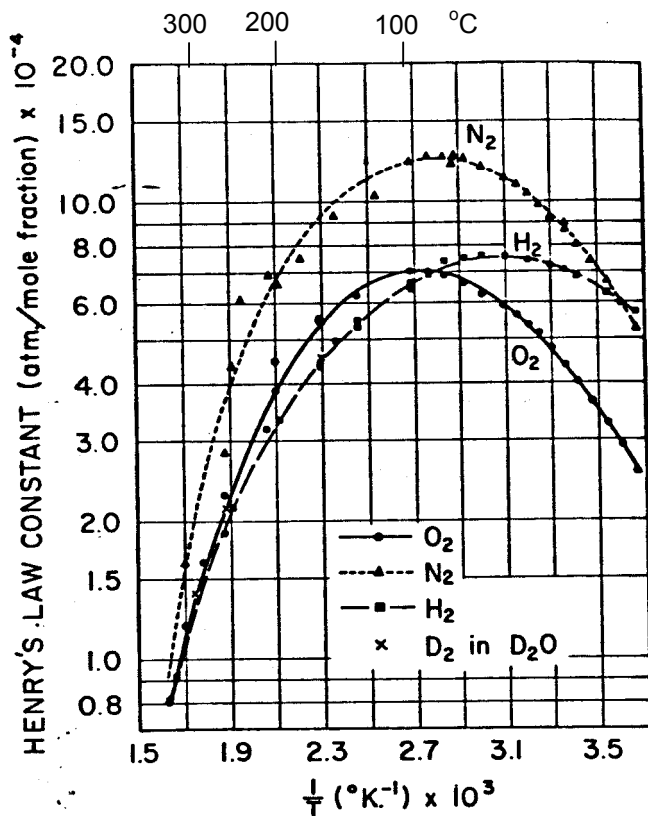
Enligt Henry's lag råder proportionalitet mellan partialtrycket i gasfasen av en gas A och halten av samma gas i vätskefasen.

$$p_A = H \cdot x_A \quad (1)$$

I ekvation (1) används molbråket  $x_A$  som mått på koncentrationen av gasen A i vätskefasen. Molbråket  $x_A$  är antalet mol av gasen A i förhållande till totala antalet mol.

Konstanten H i Henry's lag är en funktion av temperaturen och en svag funktion av trycket. Ett flertal bestämningar av H för vätes och syres löslighet i vatten, som funktion av temperaturen, finns publicerade. De olika bestämningarna avviker obetydligt från varandra. Mest känd är en äldre undersökning av Himmelblau (1960). Temperaturberoendet för lösligheten av väte och syre i vatten enligt Himmelblau ges i figur 3.

Då temperaturen ökar från rumstemperatur sjunker först syres och vätes löslighet något, för att sedan öka med ca. en faktor fyra upp till full reaktortemperatur, 286 °C.



Figur 3: Temperaturberoendet för konstanten i Henry's lag (från Himmelblau (1960)).

Vid konstant temperatur och de låga halter gas man normalt har i ånga och reaktorvatten kan vilket som helst mått på gashalt användas. Det enda som påverkas är värdet på konstanten  $H$  i Henry's lag. Ofta används i reaktorsammanhang enheten ppb ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ). Vid reaktortemperatur,  $286^{\circ}\text{C}$ , är då värdet på  $H$  för väte och syre ca. 160, dvs. knallgashalten, mätt i ppb, bör vara 160 gånger högre i ångan än i reaktorvattnet.

Experimentellt uppmäter man ca. 20000 ppb  $\text{O}_2$  i ångan och ca. 300 ppb  $\text{O}_2$  i reaktorvattnet, vilket tyder på ett värde på  $H$  på knappt 70. Diskrepansen beror till största delen på att syrehalten i mätpunkten för reaktorvattnet skiljer sig med ca. en faktor två från den i bränslepatronerna, där jämvikten enligt Henry's lag ställer in sig. Till någon del kan avvikelsen även bero på att jämvikten mellan vattenfas och ångfas inte hinner bli fullständig vid kokningen i härden.

En syrehalt på 20 ppm i ångan, samt den stökiometriska mängden vätgas, motsvarar i en mer åskådlig enhet drygt  $40 \text{ cm}^3$  knallgas per  $\text{m}^3$  ånga vid fullt reaktortryck, 70 bar. Uppenbarligen måste mycket ånga kondensera för att en systemdel skall knallgasfyllas under normal drift. (Som visas nedan är dock knallgashalten i ångan betydligt högre under uppstart av reaktorn.)

Totalt producerar en kokareaktor med en effekt på 1000 MWe ca. 200 normal- $\text{m}^3$  knallgas per timme.

# Knallgasförbränning

## Antändning av knallgas

$H_2$  och  $O_2$  är stabila molekyler. Reaktionen mellan väte och syre kräver därför att en ”energitröskel”, så kallad aktiveringsenergi, övervinns. Självantändningstemperaturen hos knallgas är ca.  $550\text{ }^\circ\text{C}$ . För att lokalt excitera gasmolekylerna och starta en förbränning krävs emellertid endast en energimängd av storleksordningen  $0,1\text{ mJ}$ . En gnista med den energin är osynlig i ett mörkt rum. Knallgas antänds därför lätt av gnistor. Förutom friktion i ventiler kan möjligen även vattendroppar, som rör sig snabbt, ge upphov till gnistbildning. Detta beror på att det mycket rena vattnet i en kokarreaktor har dålig ledningsförmåga. En ”kattskinnseffekt” är då tänkbar.

Vissa ämnen, speciellt platina, har katalyserande verkan på reaktionen mellan väte och syre. Effekten beror på att reaktionsvägen ändras i närvaro av katalysatorn, så att aktiveringsenergin sjunker. På en platinayta sönderdelas  $H_2$  och  $O_2$  till atomärt väte och syre. Atomärt väte resp. syre är betydligt mer reaktivt än molekylärt. På en Pt-yta är därför reaktion mellan väte och syre möjlig ner till temperaturer under  $-100\text{ }^\circ\text{C}$ .

En annan potentiell effekt av en katalysator är att den kan initiera tändning av en knallgasblandning. Det har spekulerats huruvida oxidytorna på rör och ventiler i en kokarreaktor kan uppvisa katalytisk effekt och därigenom initiera tändning av ansamlad knallgas. Det är idag inte känt om en sådan katalytisk effekt är möjlig.

En fråga är inom vilket koncentrationsintervall en vätgasblandning är brännbar. För vätgas blandad med luft har brännbarhetsgränserna bestämts till  $4\%$  resp.  $75\%$ . Jämfört med andra vanliga, brännbara gaser är detta ett ovanligt stort intervall, se figur 4. Det koncentrationsintervall inom vilket vätgas är brännbar ökar dessutom något med stigande temperatur.

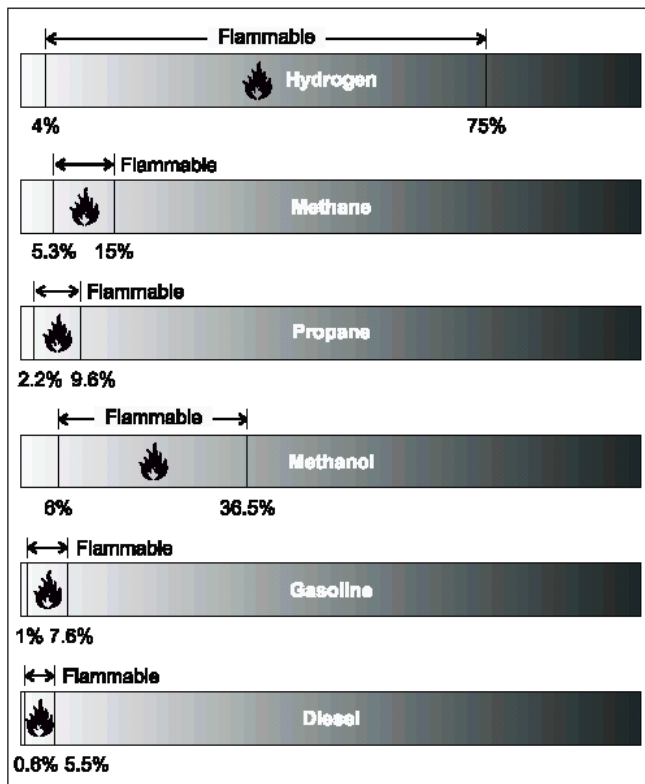
Situationen i en kokarreaktor är speciell såtillvida att den gasblandning som genereras i reaktorn är ren knallgas, utspädd med ånga. För detta fall tycks det inte vara väl undersökt vid vilken maximal ånghalt förbränning är möjlig. Rent praktiskt är detta kanske mindre betydelsefullt. Det är inte sannolikt att knallgasansamling i en kokarreaktor avstannar just i närheten av den kritiska knallgashalten.

Sammanfattningsvis kan knallgas sägas vara ovanligt lätt att antända. Detta är i god överensstämmelse med den praktiska erfarenheten från knallgasincidenter i kokarreaktorer. Vanligen kan tändkällan inte identifieras.

## Deflagration

Bakom ett snabbt förbränningsförlopp, i dagligt tal benämnt explosion, kan ligga två principiellt skilda förbränningsmekanismer.

Deflagration är vad som skulle kunna betecknas som normal förbränning. Flamfronten sprider sig i princip genom värmeledning. Vid en deflagration rör sig flamfronten



Figur 4: Antändbarhetsgränser för några vanliga, brännbara gaser i luft (från Lanz (2001)).

initialt med låg hastighet relativt den oförbrända gasen, storleksordningen dm/s eller m/s. I praktiken upplevs emellertid en deflagration ofta som en explosion, snarare än som en lugn förbränning. Genom att den upphettade gasen bakom flamfronten expanderar sätts nämligen den oförbrända gasen i rörelse. Genom inverkan av väggar och hinder i gasens väg uppstår då i allmänhet turbulens. I den turbulenta omblandade gasen splittras flamfronten upp och förbränningen blir häftigare. Detta ger i sin tur upphov till ännu häftigare expansion av förbränd gas, osv. Genom sådana effekter kan en deflagration accelerera från någon m/s till hundratals m/s. Vid turbulent deflagration med hög förbränningshastighet genereras även kraftiga tryckvågor.

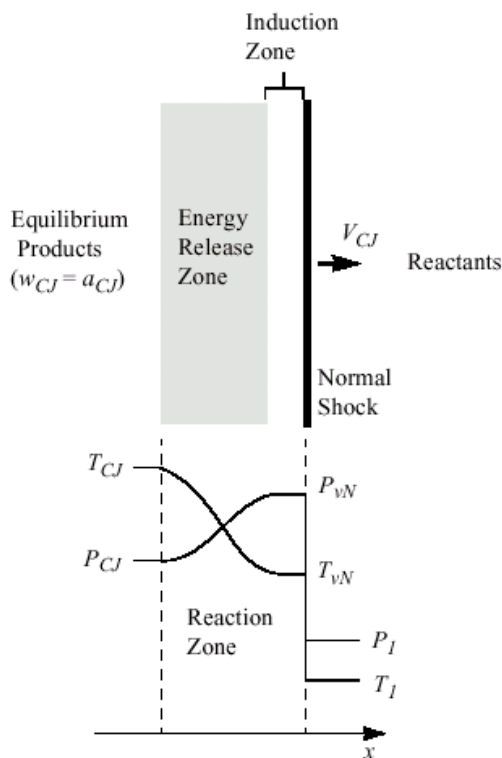
Nära antändbarhetsgränserna är deflagrationen långsammare. Vid 4 vol% vätgas kan flamfronten bara sprida sig uppåt. Vid 6 vol% vätgas är spridning rakt åt sidan möjlig. Först vid 9 vol% vätgas kan flamfronten sprida sig nedåt. Dessa fenomen beror i grunden på att den uppåtriktade konvektion, som värmeutvecklingen vid förbränningen ger upphov till, är snabbare än flamfrontens spridningshastighet vid låg vätgashalt.

Vid deflagration i en sluten volym uppstår ett övertryck. Detta orsakas av att den avgivna energin leder till en hög temperatur hos den förbrända gasen. Vid deflagration av ren knallgas vid rumstemperatur ökar trycket med ca. en faktor 10. (Högre utgångstemperatur ger en lägre faktor.) Vid ett utgångstryck på 70 bar kan således trycket stiga till, som mest, uppemot 700 bar. Belastningen på volymens väggar avklingar med samma hastighet som gasen svalnar. Belastningen är därför i princip statisk.

## Detonation

Detonation betecknar förbränning genom en stötvåg som fortplantar sig med överljuds-hastighet. I fallet knallgas är stötvågens hastighet 2-3 km/s. Kompressionen i stötvågen upphettar gasen, så att den antänds. Den energi som frigörs vid förbränningen under-håller stötvågens utbredning.

Till skillnad från en deflagration rör sig en detonation med en väldefinierad hastighet, som beror på gasblandningen. Denna hastighet kan beräknas utifrån villkoren att massa, rörelsemängd och energi skall bevaras i stötvågen. Även detonationstrycket kan beräknas utifrån dessa villkor. Beräkningsmodellen utvecklades först av Chapman och Jouguet (CJ). CJ-modellen behandlar detonationsvågen som en diskontinuitet med oändligt hög reaktionshastighet. Denna förenklade modell kompletterades senare av Zeldovich, von Neuman och Döring (ZND), så att en ändlig reaktionshastighet ingår som en parameter. ZND-modellen illustreras i figur 5.

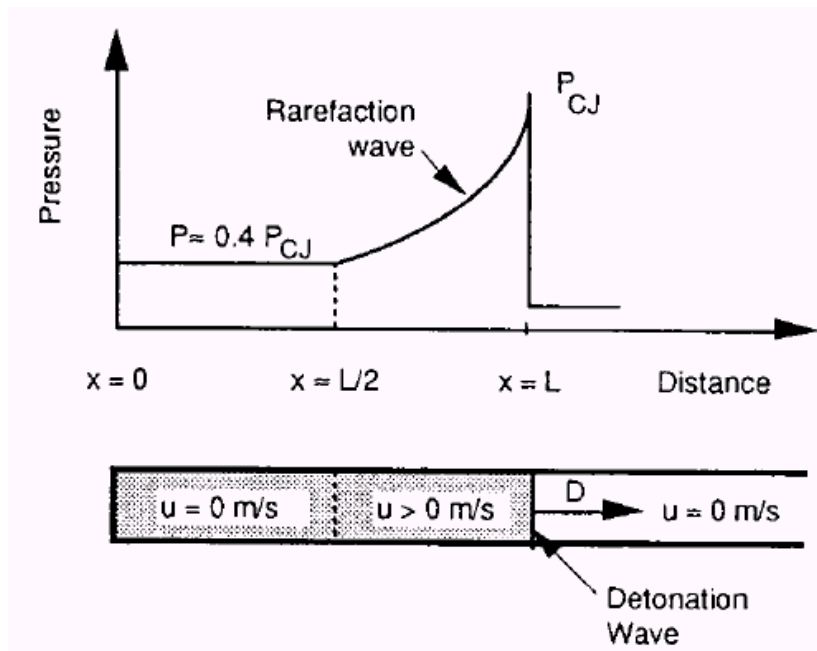


Figur 5: ZND modellen för detonationsvåg. Trycket ökar från  $P_I$  ( $I = Initial$ ) till  $P_{vN}$  ( $vN = von Neuman$ ) i stötvågsfronten och sjunker sedan till  $P_{CJ}$  ( $CJ = Chapman Jouguet$ ) vid förbränningen bakom stötvågsfronten. (Från Schulz och Shepherd (2000).)

Att uppskatta de belastningar som en detonation ger upphov till är betydligt svårare än i fallet deflagration. En första skillnad är att maximala trycket vid detonation är väsentligt högre än vid deflagration, en andra att det höga trycket har mycket kort varaktighet, en tredje att det är riktighetsberoende.

Vid detonation av knallgas brukar man ange att trycket vinkelrätt mot stötvågens utbredning blir knappt 20 gånger utgångstrycket. Vid reflektion, t.ex. då en detonation i

ett rör när en rörböj eller en stängd ventil, ökar trycket ytterligare till drygt 40 gånger utgångstrycket. Dessa höga tryck är inte statiska, utan har en mycket kort varaktighet. Varaktigheten beror på olika faktorer, "randvillkor", där en av de viktigaste är den sträcka detonationsvågen har tillryggalagt. Situationen vid detonation i ett rör som är slutet i den ände där detonationen initieras visas i figur 6.



Figur 6: Tryckfall bakom en detonationsvåg i ett slutet rör. Bakom stötvågen sjunker trycket successivt till ungefär deflagrationstrycket. Trycksänkningen går långsammare ju längre sträcka detonationsvågen har tillryggalagt. (Från van Wingerden (2002).)

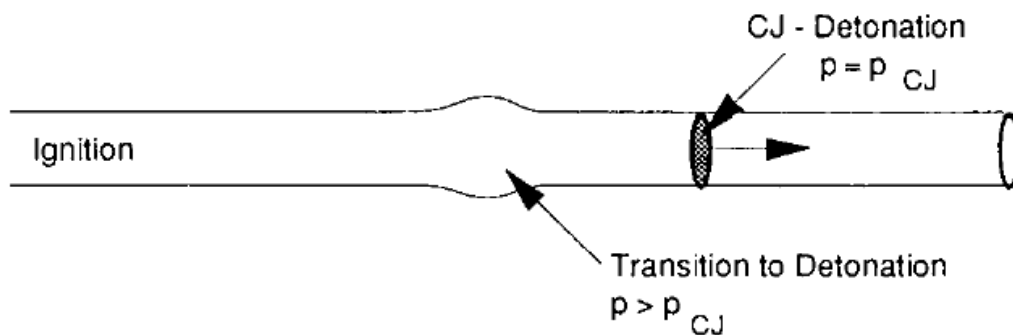
På grund av sin korta varaktighet kan detonationstrycket under vissa omständigheter approximeras med en impulslast, där impulsen är tidsintegralen av tryckpulsens. Denna approximation är giltig då tryckpulsens varaktighet är kort jämfört med periodlängden för den lägsta relevanta vibrationsmoden hos den belastade strukturen. Vid en kraftig impulslast kan den belastade strukturen deformeras plastiskt.

Det faktum att man relativt ofta iakttagit "bulor" på rör och komponenter i samband med knallgasincidenter i kokarreaktorer kan ses som en indikation på att en impulsapproximation kan vara relevant. Ett statiskt tryck, som är tillräckligt högt för att leda till deformation, borde med god sannolikhet även vara tillräckligt högt för att leda till brott.

Hur uppkommer den stötvåg som krävs för en detonation? Medan en deflagration kan initieras med mycket låg energi (osynlig gnista) krävs minst 1 g sprängämne för att direkt initiera en detonation. Ur den aspekten borde risken för detonation vara mycket låg i reaktorsammanhang (även om man i exceptionella fall kan tänka sig initiering genom t.ex. en kortslutning). Frågan har tilldragit sig intresse i haverisammanhang, då att man sökt uppskatta de belastningar som vätgasförbränning i en luftfylld reaktorinneslutning kan ge upphov till. En vätgasbrand i reaktorinneslutningen inträffade under det kända haveriet vid Three Mile Island.

Det visar sig att en deflagration med viss sannolikhet kan övergå i en detonation. Fenomenet benämns på engelska Deflagration to Detonation Transition (DDT). Sannolikheten för DDT är högst för reaktiva gaser, som vätgas. Mekanismen bakom DDT är inte utredd i detalj, men den grundar sig på den ovan nämnda benägenheten hos en deflagration att skapa turbulens, accelerera och ge upphov till tryckvågor. Vid reflektion av dessa tryckvågor mot väggar och andra hinder uppkommer tryckökningar som kan initiera lokal antändning och ytterligare tryckökning.

Ett intressant fenomen är att DDT kan ge upphov till ännu högre tryck än en detonation. Ett inträffat fall illustreras i figur 7.



Figur 7: Deformation av rör vid övergång från deflagration till detonation (från van Wingerden (2002)).

Vid övergången från deflagration till detonation erhöles ett tryckmaximum, som var nära att spränga röret. Fenomenet anses bero på att övergången till detonation sker i gas som förkomprimerats av den turbulenta deflagrationen.

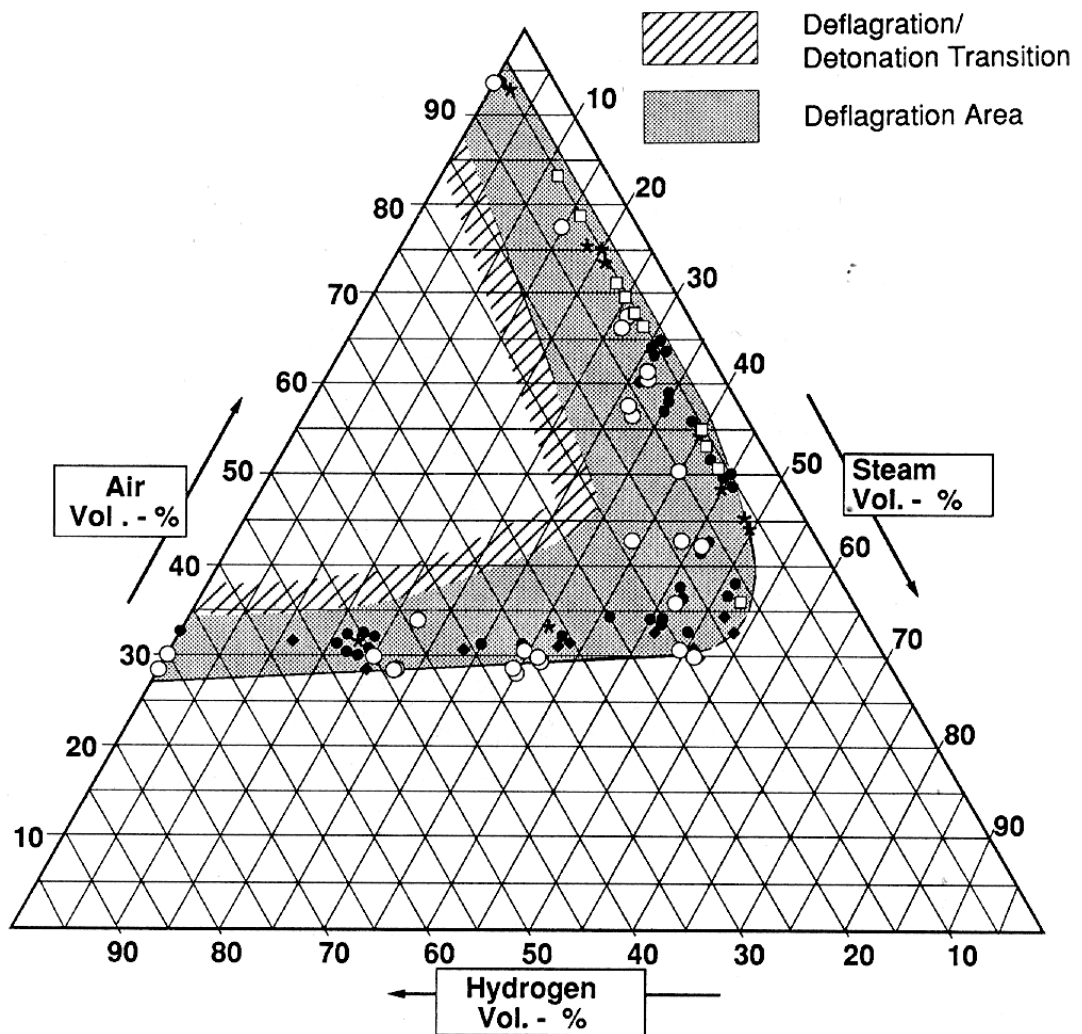
DDT har inte observerats för någon blandning av vätgas, luft och ånga med en ånghalt överstigande 30 % (Chan, Dewit och Koroll, 1995).

De koncentrationsgränser inom vilka detonation kan initieras är snävare än för deflagration. För en blandning av vätgas, luft och ånga illustreras detta av triangeldiagrammet i figur 8. Diagrammet är framtaget i samband med försök angående vätgasförbränning i tryckvattenreaktorers inneslutning.

## Deflagration eller detonation i kokarreatorer?

I många framställningar av vätgas-/knallgasförbränning, framför allt äldre, görs en distinkt uppdelning mellan deflagration och detonation. I själva verket utgör turbulent deflagration ett mellantillstånd och en länk mellan dessa båda ändlägen. Frågan om en viss knallgasincident skall klassificeras som deflagration eller detonation framstår som oviktig. Klart är att både turbulent deflagration och detonation kan generera mycket höga tryck. Själva övergången från deflagration till detonation kan generera *ännu* högre tryck än start- och sluttillstånden. Att dimensionera mot alla former av förbränning av knallgas vid ett utgångstryck på 70 bar ter sig därför inte som ett attraktivt alternativ.





**Spark Igniter Tests**

- \* = Turbulent
- ◆ = With water vapour condensation
- = Steady-state setting
- = Battelle containment mock-up

**Catalytic Igniter Tests**

- = Steady

*Figur 8: Koncentrationsområde inom vilket deflagration resp. detonation är möjlig för en blandning av vätgas, luft och ånga. Triangeldiagrammet skall läsas så, att man följer de hjälplinjer som ger de lägsta värdena på axlarna. (Från Heck et al. (1993).)*

# Knallgasansamling i kokarreaktorer

## Förutsedda problem med knallgas i kokarreaktorer

Inträffade knallgasincidenter i kokarreaktorer kan sägas bero på oförutsedda problem med knallgasansamling. På vissa punkter har man emellertid förutsett problem med knallgas och vidtagit motåtgärder vid systemkonstruktionen. Att dessa har varit framgångsrika visar det faktum att endast en, mindre knallgasincident har inträffat i svenska reaktorer i systemdelar avsedda att hantera knallgas. Denna incident berodde på ett driftsätt som konstruktionen inte var avsedd för. (Därutöver har nyligen en misstänkt knallgasincident inträffat.)

De konstruktiva åtgärderna mot knallgas i kokarreaktorer gäller främst den relativt stora mängd knallgas, upp till ca. 200 m<sup>3</sup>/h vid atmosfärstryck, som ansamlas i turbinkondensorn när ångan kondenserar. För god kondensation måste vakuum upprätthållas i kondensorn. Knallgasen avsugs därför tillsammans med en mindre mängd luft, som läckt in till de delar av turbinen som befinner sig vid undertryck relativt atmosfären. Luftinläckaget är av storleksordningen 10 m<sup>3</sup>/h. Knallgas och luft sugas av med ejektorpumpar drivna med ånga. Då drivången kondenserar återstår väsentligen knallgas vid atmosfärstryck.

I äldre, svenska kokarreaktorer leds dessa kondensoravgaser till en stor, sandfylld tank. Ledningen är dimensionerad för att motstå en knallgasdetonation. Tankens primära uppgift är att fördröja gasen, så att små mängder av kortlivad radioaktivitet hinner klinga av. Sandfyllningen i tanken förhindrar effektivt att knallgasen antänds. Principen är den hos en flamspär: Med tillräckligt fin sand blir värmeavgivningen från gasen till sanden så effektiv att den nödvändiga förbränningstemperaturen inte kan upprätthållas. Efter sandtanken späds knallgasen ut med ett stort luftflöde till icke brännbar vätgaskoncentration. Slutligen leds kondensoravgaserna ut genom anläggningens skorsten.

I nyare kokarreaktorer är ambitionerna högre när det gäller att fördröja avgaserna före utsläpp. För att minska den gasvolym som måste fördröjas förbränner man knallgasen. Förbränningen sker katalytiskt vid låg temperatur, ca 250 °C. Detta är möjligt genom att förbränningen sker innan drivången till ejektorpumparna kondenserar. Ångan späder då ut knallgasen till icke antändbar koncentration. Efter förbränning av knallgasen (kallad rekombinering pga. återföreningen av väte och syre till vatten) och kondensation av ångan återstår endast den inläckta luften att fördröja. Fördröjningen sker av säkerhetsskäl även i detta fall i sandfyllda tankar. Likaså av säkerhetsskäl är rörledningar och komponenter före sandtankarna dimensionerade för att motstå knallgasdetonation. Funktionen hos den katalytiska reaktorn (rekombinatorn) övervakas genom kontinuerlig analys av vätgashalten i avgaserna.

Nedan listas några andra konstruktiva insatser mot knallgasansamling i svenska kokarreaktorer.

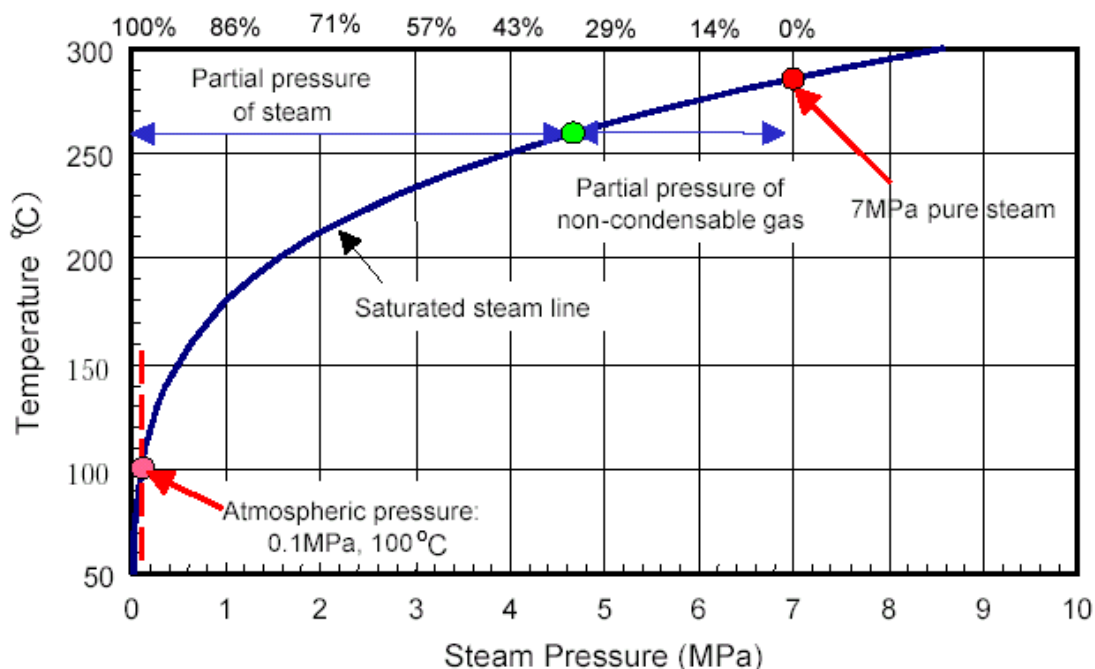
- Ventilering av rörsystemet nedströms avblåsningsventilerna med kvävgas för att motverka knallgasansamling vid ventilläckage.

- Ventilering av dränageuppsamlingstanken i reaktorbyggnaden med luft för att motverka knallgasansamling genom ångläckage till dränageuppsamlings-systemet.
- Rekombineringsmöjlighet för reaktorinneslutningens atmosfär för att motverka knallgasansamling vid ångblåsning till inneslutningen samt vid haveri.

Knallgasförberedda system har, som redan nämnts, uppvisat hög driftsäkerhet. Det kan därför tyckas något förvånande med återkommande knallgasincidenter på flera andra håll i anläggningarna. Lite generaliserat kan man säga att konstruktörerna av kokarreaktorer ägnat omsorg åt den stora mängden knallgas, men inte förutsett problemet med ansamling av mindre mängder knallgas i främst ångsystemen i anläggningarna. Som visas nedan i samband med några konkreta exempel på knallgasansamling finns det en anledning till detta förbiseende.

## Samband mellan knallgashalt och temperatur i ångsystem

Vid knallgasansamling i ett ångsystem i en kokarreaktor är totaltrycket vanligen konstant och lika med reaktortrycket, 70 bar. Då knallgasens partialtryck ökar kommer därför ångans partialtryck att minska. Eftersom ångan är mättad medför detta att temperaturen sjunker allteftersom knallgas ansamlas. Sambandet mellan temperatur och partialtrycken för knallgas resp. ånga visas i figur 9.



Figur 9: Samband mellan vätes partialtryck och temperaturen vid knallgasansamling i ett ångsystem med totaltrycket 70 bar (från Investigation Report... (2002)).

## Oförutsedda problem med knallgas i kokareaktorer

I grunden har de oförutsedda problemen med knallgas i kokareaktorer samma orsak som de förutsedda. Ångan innehåller knallgas. När den kondenserar riskerar man att knallgasen anrikas. På detta sätt finns potential att bygga upp höga halter knallgas, även när kondensationen är blygsam.

För att få en uppfattning om tidsförloppet kan vi som ett exempel betrakta en systemdel fylld med stillastående reaktorånga vid 70 bar. Anta att systemdelen har en intern volym på 10 liter och att den, genom en något bristfällig termisk isolering, har en värmeförlust till omgivningen på 1kW. Denna effekt motsvarar en ångkondensation på 0,66 g/s. Antas all knallgas i ångan bli kvar i systemdelen kommer 0,0008 cm<sup>3</sup> knallgas att ansamlas per sekund. Detta motsvarar 2 liter knallgas per månad. Uppenbarligen är knallgasansamling i varmhållna, termiskt isolerade systemdelar en långsam process.

En tidskonstant i vecko- eller månadsskala kan, tillsammans med avsaknad av uppenbara användningsmekanismer, ha bidragit att de potentiella problemen med knallgasansamling verkat små och därför förbisetts av konstruktörerna. En annan, kanske troligare anledning till förbiseendet är att anrikning av användbara koncentrationer knallgas inte generellt inträffar vid ångkondensation, utan bara under speciella förutsättningar. Detta måste betecknas som svårt att förutse utan ingående analys.

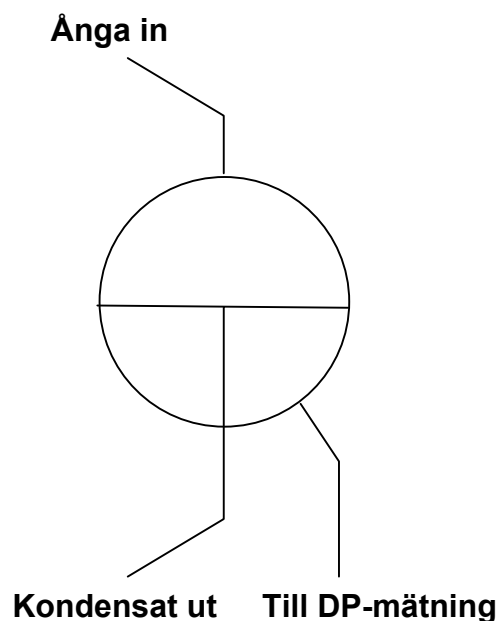
Anrikningsmekanismen för knallgas behandlas enklast med hjälp av några exempel.

### Exempel 1 – Rätt konstruerat nivåreferenskärl

De ursprungliga nivåreferenskärlen till reaktortanken i de nordiska kokareaktorerna är kända för en mindre lämplig konstruktion, som gör att knallgas byggs upp i kärnen. Mekanismen är mer subtil än man kanske först tror. För att förstå den är det lämpligt att först analysera den alternativa konstruktion i figur 10.

Anslutningen benämnd ”Ånga in” förutsätts vara ansluten till reaktorns ångfas och anslutningen benämnd ”Kondensat ut” till reaktorns vattenfas.

Reaktorånga som tillförs genom den övre anslutningen mot reaktorn kondenserar långsamt i det fotbollsstora, oisolerade kärlet på grund av värmeavgivningen till omgivningen. Kondensatet uppfyller kärlet till hälften och avleds från vattenytan genom den nedre anslutningen. Initialt kommer utgående kondensat att innehålla mindre knallgas än inkommande ånga. Enligt det värde på konstanten i Henry's lag som getts ovan, kommer utgående kondensat att initialt ha 1/160 av inkommande ångas knallgashalt. Knallgashalten i både gasfas och vattenfas i kärlet kommer därför att öka. Eftersom knallgashalten i inkommande ånga är konstant när man så småningom ett jämviktsläge. Detta inträffar då knallgashalten i både gasfas och vattenfas i kärlet har ökat med en faktor 160. Utgående kondensat kommer då att innehålla lika mycket knallgas som inkommande ånga.



Figur 10: Nivåreferenskärl med två separata anslutningar till reaktorn.

Vad blir knallgashalten i gasfasen i kärlet vid jämvikt? Normal knallgashalt i ångan, 20 ppm syre och dubbla volymkoncentrationen väte, innebär att syres och vätes partialtryck är runt 100 resp. 200 Pa. Anrikning med en faktor 160 ger partialtrycken 16 kPa resp 32 kPa. Detta innebär att ångans partialtryck i nivåreferenskärlet är 69,5 bar, mot normala 70 bar. Denna gasblandning är uppenbarligen inte antändbar. Ett partialtryck för okondenserbar gas på 0,5 bar torde inte heller innebära några allvarliga problem med nivåmätningen.

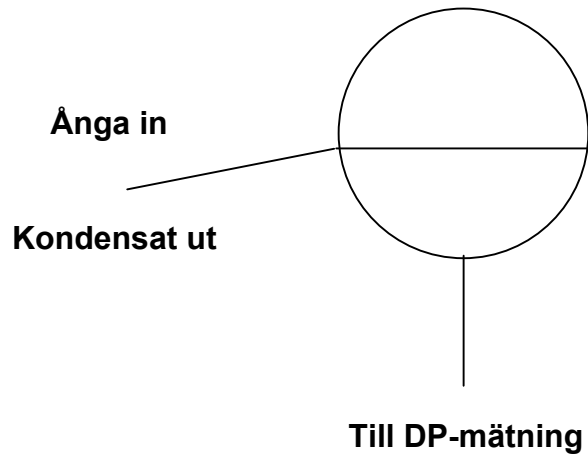
Nivåreferenskärlet i figur 10 är således ett exempel på en fungerande konstruktion, utan knallgasproblem, trots kondensation av knallgashaltig ånga.

## Exempel 2 – Fel konstruerat nivåreferenskärl

Problemet med de ursprungliga nivåreferenskärlen i de nordiska kokarreaktorerna är att de endast har en anslutning mot reaktorns gasfas. Detta har uppenbara fördelar, men tyvärr även nackdelen att höga knallgashalter kan uppstå. Principutformningen visas i figur 11.

Skillnaden gentemot det tidigare fallet är att utgående kondensat möter inkommande ånga i den gemensamma ledningen.

Precis som i exemplet ovan kommer viss, initial knallgasuppbyggnad att äga rum. Det kondensat som lämnar kärlet kommer då att innehålla mer knallgas än vad som står i jämvikt med den ånga som sugas in i ledningen från reaktorn. Kondensat och ånga kommer enligt Henry's lag att sträva efter att hela tiden vara i jämvikt med varandra med avseende på inertgas. Om inställelsen av jämvikt enligt Henry's lag är någorlunda snabb, kommer det utströmmande kondensatet att gasa av till den inkommande ångan



Figur 11: Nivåreferenskärl med endast en anslutning mot reaktorns gasfas.

(jfr. värmetransport i motströms värmeväxlare). Vid ideala förhållanden upphör processen först när nivåreferenskärl är kallt och knallgasfyllt.

Om inställelsen av jämvikt enligt Henry's lag *inte* är ideal blir avgasningen av utgående kondensat ofullständig. Ett jämviktsläge med ett visst kvarstående partialtryck av ånga i nivåreferenskärl är då möjligt.

I praktiken påverkas jämviktningen mellan ånga och kondensat i ledningen av faktorer som längd och lutning på ledningen mellan nivåreferenskärl och reaktor samt kondensationshastigheten. Det är därför knappast förvånande att temperaturmätningar på nivåreferenskärl med en konstruktion enligt figur 11 har gett varierande resultat med avseende på både avsvälningshastighet och sluttemperatur.

Problemet med konstruktionen i figur 11 är att kondensatet lämnar nivåreferenskärl motströms inkommande ånga. För att förhindra den jämviktning som då uppkommer krävs skilda vägar för kondensat och ånga. Med endast en reaktorstuts är detta svårt, men inte omöjligt, att åstadkomma. En lösning är att använda två koncentriska ledningar. Detta är den enkla grundprincipen bakom ett patenterat nivåreferenskärl som installerats i flera svenska reaktorer. En nackdel med denna konstruktion är möjligen att tankstutsen kan bli mycket svår att prova.

### Exempel 3 – Ångläckage

En inte ovanlig situation i ett kraftverk är ett mindre ångläckage. Till exempel kan en styrventil till en avblåsningsventil börja läcka efter provning. I just det här fallet kommer ett knallgasproblem att försvinna och ett nytt att uppstå.

Styrventil och tillhörande styrledning är utformade enligt principen inkommande ånga möter utgående kondensat. Knallgas kan därför ansamlas i systemdelen, om styrventilen är tät. Vid läckande ventil kommer emellertid styrledning och styrventil att kontinuerligt ventileras. Detta löser problemet med knallgasansamling.

Nedströms den läckande ventilen råder atmosfärstryck och låg temperatur. Ångan kommer därför att svalna och kondensera. Vid ett totaltryck på 1 bar räcker emellertid inte ens en ren knallgasatmosfär för att kondensatet skall innehålla lika mycket knallgas som den utläckande ångan. (Detta illustreras handgripligt av provtagningsystemet: Ur provtagningsledningen för reaktorånga kommer ett tvåfasflöde av vatten och knallgas.)

Utloppet från både styrventiler och huvudventiler i avblåsningssystemet leds till ett nedblåsningsrör i kondensationsbassängen. Man insåg tidigt att det krävs någon form av åtgärd för att förhindra knallgasuppyggnad i nedblåsningsrören. Genom att ångan kondenserar i rören (utom vid stora läckage) ventileras inte dessa av ångläckaget.

En åtgärd som provades i Tyskland var att förse nedblåsningsrören med katalysator för att rekombinera knallgasen till vatten. Man räknade med att diffusion och konvektion skulle sörja för att knallgasen fördelades i nedblåsningsrören. En katalysator placerades därför endast i den övre delen av varje nedblåsningsrör. Detta arrangemang fungerade inte (Kienberger, 1993), utan man mätte fortsatt hög vätgashalt vid ångläckage.

En experimentell undersökning (Tenzler, 1992) visade att gasen skiktas i nedblåsningsrören, med ånga överst och okondenserbar gas (luft i försöken) nederst. Vätgasen ansamlas i luften nedtill i rören, med högst koncentration i den smala zonen mellan ånga och luft. Katalysatorn bör därför placeras i zonen mellan ånga och okondenserbar gas. En sådan placering hade varit mindre lämplig av två skäl. För det första hade det varit svårt att hålla katalysatorn torr i denna miljö. Erfarenhetsmässigt fungerar en våt katalysator dåligt. För det andra flyttade sig gränzonen mellan ånga och okondenserbar gas då ångläckaget ökade eller minskade. Man övergav därför försöken att lösa knallgasproblemet genom rekombinering och införde kvävgasspolning av nedblåsningsrören. Samma lösning har valts i nordiska kokarreaktorer.

Skiktningen i nedblåsningsrören beror på gravitationskraften. Ånga vid 1 bar (100 °C) har väsentligt lägre densitet än luft. Om knallgasansamlingen får pågå tillräckligt länge ersätts emellertid luften av knallgas. Denna har något lägre densitet än ångan. Man förväntar sig därför att skiktningen upphör om tillräckligt hög knallgashalt byggs upp.

Precis som exempel 2 ovan, visar detta exempel att det i förväg kan vara svårt att i detalj föreställa sig hur och var knallgas ansamlas, trots att knallgasens beteende i efterhand ter sig naturligt.

## Uppstartsfallet

Ett antal knallgasincidenter med styrventiler har inträffat i svenska kokarreaktorer. I regel har dessa yttrat sig som deformation av delar av ventilen och har upptäckts i samband med service av ventilen. Det är därför i allmänhet inte känt exakt när skadan inträffat. Vid minst två tillfällen är det emellertid bekant att skadan inträffat i samband med uppstarten, i ett fall ca. en halvtimme efter det reaktorn nått full temperatur. Detta är uppenbarligen i mycket dålig överensstämmelse med den enkla överslagsberäkning ovan, som visade att knallgas ansamlas i vecko- eller månadsskala. Förklaringen är att knallgashalten i ångan är högre under uppstart än under normaldrift. Detta är en direkt

konsekvens av Henry's lag, men effekten har varit dåligt känd. Detta är ännu ett exempel på att knallgasfenomen visat sig svåra att förutse.

Enligt Henry's lag är vätes och syres partialtryck i gasfasen proportionella mot halten löst gas i vattnet. Vid lägre temperatur är halterna väte och syre i reaktorvattnet i stort sett desamma som vid full temperatur. Bortsett från den begränsade förändringen av konstanten i Henry's lag med temperaturen, figur 3, är därför partialtrycken för väte och syre oförändrade i gasfasen. Däremot sjunker partialtrycket för vattenånga kraftigt med avtagande temperatur. Kvoten mellan inertgas och vattenånga ökar därför då temperaturen sjunker.

Ett uttryck för det exakta sambandet kan härledas ur Henry's lag. För enkelhets skull försummar vi skillnaden mellan väte och syre i figur 3. Utom vid temperaturer under 80 °C är skillnaden liten.

Låt  $K$  vara kvoten mellan mol knallgas per mol ånga och mol knallgas per mol vatten

$$K = (n_g/n_s)/(n_g/n_w) \quad (2)$$

där  $g$  betecknar gas,  $s$  ånga och  $w$  vatten. Ur allmänna gaslagen följer att

$$(n_g/n_s) = (p_g V/RT)/(V/M_w v_s) \quad (3)$$

där  $p_g$  är knallgasens partialtryck,  $M_w$  molvikten för vatten och  $v_s$  specifika volymen för ånga. Enligt Henry's lag gäller

$$(n_g/n_w) \cong x_g = p_g/H \quad (4)$$

Ur (2), (3) och (4) följer att

$$K = (M_w/RT) \cdot H \cdot (v_s/T) \quad (5)$$

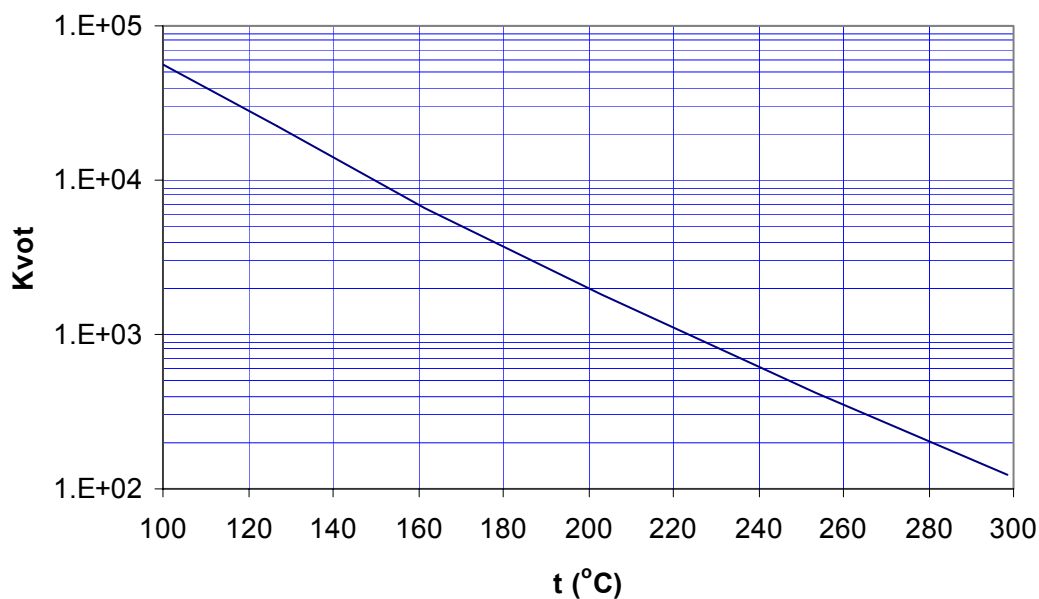
Om trycket mäts i atm (som i figur 3) eller i bar (1 atm = 1,013 bar) och ångans specifika volym i m<sup>3</sup>/kg, så är

$$K = 2.2 \cdot 10^2 \cdot H \cdot (v_s/T) \quad (6)$$

I en kokarrektor är ångan från reaktorn alltid mättad. Ångans specifika volym bestäms då helt av temperaturen. Ett digram över kvoten mellan knallgashalten i ångan resp. reaktorvattnet som funktion av temperaturen visas i figur 12.

Ur figur 12 är det uppenbart att knallgashalten i ångan ökar starkt med sjunkande temperatur. Vid 100 °C innehåller ångan ca. 400 gånger mer knallgas, relativt vattnet, än vid full reaktortemperatur. Huvuddelen av denna skillnad beror på högre specifik volym för mättad ånga vid den lägre temperaturen, men temperaturberoendet hos konstanten i Henry's lag (figur 3) och temperaturfaktorn i ekvation (6) bidrar också.





Figur 12: Kvot mellan knallgashalten i ångan resp. reaktorvattnet som funktion av temperaturen.

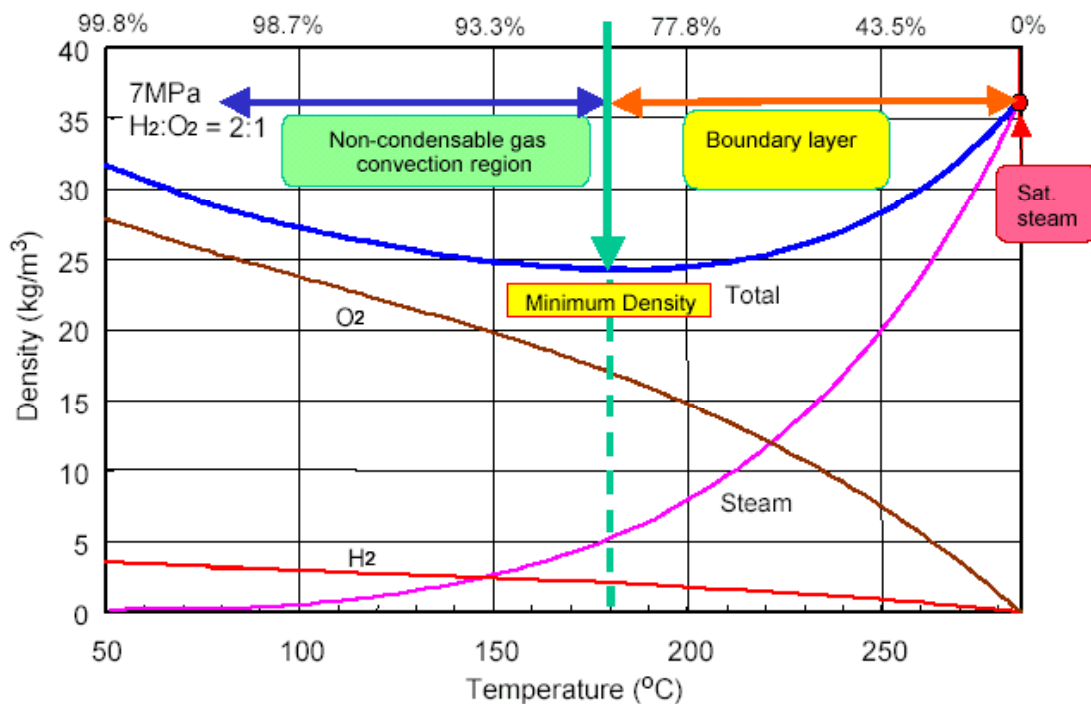
Under uppstart, då temperaturen är lägre, är värmeförlusterna mindre än vid normaldrift. Detta uppvägs emellertid till stor del av den effekt som åtgår för att värma anläggningen, vanligen med 40 °C/h. Syrehalten i reaktorvattnet är ungefär densamma vid uppstart som vid normaldrift. Vid uppstart kan därför samma knallgasansamling äga rum på några timmar, som vid normaldrift på några veckor.

En annan effekt som kan behöva beaktas i samband med uppstart är den transporteffekt som tryckökningen ger upphov till. I exempelvis avblåsningssystemet för reaktorånga kan tryckökningen bidra till att knallgas, som anrikas genom kondensation i huvudventil och styrledning, komprimeras längst ut i systemet, i styrventilen. Samma effekt är dock verksam även utan tryckökning: Kondensation av ånga i styrventilen driver ett ångflöde mot styrventilen. Knallgasens diffusionshastighet är lägre än ångans strömningshastighet. Knallgas i styrledningen kommer därför att dras med ångflödet och tendera att ansamlas i/intill styrventilen längst ut i systemdelen.

## Knallgas och högpunkter

Enligt ovan finns potential att knallgas ansamlas i/intill styrventilen i avblåsningssystemet för reaktorånga. Styrventilen (motsvarande) utgör, av hänsyn till dräneringen, en högpunkt i systemet. Det har ibland hävdats att knallgas generellt ansamlas i högpunkter. Tanken har varit att detta betingas av vätgasens låga densitet. Analogin med en vätgasballong är dock föga användbar. Ett exempel på detta är fallet med kondensation i nedblåsningrören, som behandlats ovan i avsnittet *Exempel 3 – Ångläckage*. Knallgasen tenderade i detta fall att i första hand koncentreras till en övergångszon mellan ånga och okondenserbar gas, i andra hand nedtill i rören.

Ett fall av stort praktiskt intresse är knallgasansamling i ett ångsystem vid totaltrycket 70 bar. På grund av sambandet enligt figur 9 mellan knallgasens partialtryck och temperaturen kommer densiteten för blandningen av knallgas och ånga att gå igenom ett minimum vid en temperatur på ca. 180 °C, se figur 13. Detta leder återigen till effekter som inte är intuitivt uppenbara. Observera, först, att temperaturen 180 °C motsvarar ett partialtryck för knallgasen på 60 bar (figur 9). Denna blandning av knallgas och ånga är väl inom det detonerbara området.



Figur 13: Densitet för ånga, väte, syre och knallgas som funktion av temperaturen vid mättad ånga och totaltrycket 70 bar (från Investigation Report... (2002)).

Antag att knallgas ansamlas genom kondensation av ånga i ett långt, i änden försluten rör. Enligt den transporteffekt som omnämns i slutet på närmast föregående avsnitt, förväntar man sig en kontinuerligt, mot änden av ledningen, sjunkande temperatur. Så blir även fallet vid horisontell ledning. Om däremot ledningen är vertikal och försluten i den övre änden (vilket var situationen i Hamaoka-1 och Brunsbüttel) finner man experimentellt (Investigation Report..., 2002) att temperaturen snabbt ändras med nära 100 °C inom en relativt small zon. Över denna zon är temperaturen ca. 180 °C. Under övergångszonen råder full temperatur, 286 °C. Denna skiktning är en konsekvens av att blandningen av knallgas och ånga har ett densitetsminimum vid 180 °C. En blandning med högre knallgashalt (lägre temperatur) kan inte ansamlas i rörets översta del, eftersom den har högre densitet. Skiktningen vore då inte stabil med hänsyn till gravitationskraften, utan skulle leda till konvektion och temperaturutjämning. En skiktning med en temperatur på 180 °C överst i röret, en övergångszon, och därunder full temperatur, är däremot stabil. I den engelska versionen av de japanska myndigheternas rapport om incidenten Hamaoka-1, Investigation Report... (2002), benämns, något olyckligt, övergångszonen ”boundary layer”. Textrutorna i figur 13 indikerar

således att koncentrationsområdet med konvektiv omblandning (som alltså inte utbildas), resp. koncentrationsområdet motsvarande övergångszonen till full temperatur, befinner sig på var sin sida om densitetsminimum för blandningen av knallgas och ånga.

Fallen horisontell ledning resp. grov, vertikal ledning kan betraktas som ytterlighetsfall. I svagt lutande ledningar samt smala, vertikala ledningar kommer knallgas att ansamlas på ett sätt som bestäms av systemdelens detaljutformning.

## **Konsekvenser av vätekemi (HWC)**

Många kokarreaktorer doserar vätgas till matarvattnet. Detta påverkar radiolysen, så att vattenkemin blir mer reducerande, vilket är gynnsamt ur materialsynpunkt. Utom vid mycket hög vätgasdosering till matarvattnet balanserar i stort sett den doserade vätgasen och den resulterande minskningen av radiolysen i reaktorhärden varandra. Vätgashalten i ångan förblir därför så gott som oförändrad. Däremot minskar syrehalten i ångan i takt med att radiolysen avtar, dvs. i takt med att vätgasdoseringen ökas. Mängden okondenserbar gas som ansamlas vid ångkondensation blir därför något lägre vid vätgasdosering. Vidare blir gasen inte längre ren knallgas, utan en blandning av knallgas och vätgas. Den energi som kan frigöras ur ansamlad gas blir därför något lägre.

En annan konsekvens av att ansamlad okondenserbar gas innehåller ett överskott av väte är att den inte kan rekombineras fullständigt. I bästa fall kan allt syre rekombineras, medan en restmängd väte erhålls.

# Möjliga motåtgärder mot knallgasansamling

Praktisk erfarenhet visar att man för att säkert förhindra knallgasincidenter måste förhindra ansamling av en antändbar knallgaskoncentration. Att eliminera alla tänkbara antändningskällor är inte praktiskt möjligt.

Knallgasansamling kan förhindras på flera sätt.

- Genom att förhindra kondensation av ånga.
- Genom att ventileras bort ansamlad knallgas
- Genom att katalytiskt förbränna (rekombinera) ansamlad knallgas.

Kondensation av ånga i en systemdel kan förhindras genom att systemdelen fylls med annat medium, t.ex. vatten eller kvävgas, eller genom att den hålls uppvärmd till mer än ångans mättnadstemperatur.

## Kvävgasfyllning

Systemdelar som de facto är knallgasfyllda bör med fördel istället kunna vara kvävgasfyllda. Med tanke på ev. mindre läckage måste ett litet kvävgasflöde tillföras kontinuerligt. Vid större läckage kommer kvävgasfyllningen inte att kunna upprätthållas, men behövs då i allmänhet inte, eftersom systemdelen ventileras genom ångläckage, så att knallgasansamling förhindras.

Vissa systemdelar är ångfyllda under drift i syfte att undvika en termisk transient vid inkoppling. Om en sådan systemdel fylls med en okondenserbar gas, som knallgas eller kvävgas, kommer inkoppling att ge upphov till en transient. Där detta är angeläget att undvika är kvävgasfyllning inte en lämplig metod att förhindra knallgasansamling. (Givetvis ger även knallgasansamling upphov till en termisk transient vid inkoppling.)

Svårigheterna med kvävgasfyllning är, förutom transientaspekten, troligen främst knutna till installation och kvävgaskälla.

## Värmning

Genom uppvärmning av en systemdel till mer än 286 °C förhindras kondensation av ånga och knallgasansamling. I flertalet fall är sannolikt enda rimliga alternativet att använda elvärmare, typ elvärmekabel. Beräkningstemperaturen är emellertid i allmänhet 300 °C. Att värma en systemdel till > 286 °C utan att lokalt överskrida 300 °C torde inte vara praktiskt genomförbart. Varmhållning för att förhindra kondensation är därför inte ett realistiskt alternativ.

## Ventilering

Ventilering kan vara kontinuerlig eller intermitterant.

Det är en praktisk erfarenhet att mindre ventilläckage ofta räcker för att ventileras och varmhålla en systemdel och förhindra knallgasupbyggnad. Till exempel varmhålls styrledning och styrventil i avblåsningssystemet av ett mindre läckage i styrventilen. Ett sådant uppstår i allmänhet då ventilen motionerats ett fåtal gånger och är så att säga normaltillståndet. En uppenbar möjlighet är att avsiktligt skapa ett ångflöde mot-

svarande ett mindre ventilläckage i systemet. Detta alternativ har provats i vissa reaktorer och har hittills framgångsrikt bidragit till att förebygga knallgasincidenter.

För att knallgasansamling skall förhindras måste *hela* systemdelen ventileras. Ångan måste därför avbördas ”längst ut” i systemdelen, som i styrventilsfallet. De ångflöden som erfordras är i allmänhet mycket små.

I vissa fall kan knallgasansamlingen gå mycket långsamt. Istället för kontinuerlig ventilering kan då intermittent ventilering tillämpas. Den senare kan styras genom temperaturmätning på det mest kritiska stället. Temperaturmätning är även i övrigt en utmärkt metod att övervaka knallgasansamling (jfr figur 9).

Ett annat fall då intermittent ventilering kan vara bästa alternativet är då knallgasansamlingen går mycket fort. Så kan vara fallet under uppstart, då knallgashalten i ångan är kraftigt förhöjd och värmning av anläggningen kan leda till ökad ångkondensation. Exempelvis har temperaturmätningar visat att knallgasansamling i styrledningar och styrventiler i avblåsningssystemet kan ske i tidskala vid uppstart. Detta kan motverkas genom att styrventilen motioneras vid vissa tillfällen under uppgången. En (överkomlig) svårighet kan vara att formulera instruktionerna, så att alla möjligheter täcks in, t.ex. störningar som förlänger uppgången.

#### Rekombinering

I princip är det möjligt att katalytiskt förbränna (rekombinera) ansamlad knallgas vid låg koncentration och därigenom förhindra uppbyggnad av en antändbar gaskoncentration.

Vid normal vattenkemi (ingen vätgasdosing till matarvattnet) bildas ingen rest, utöver vattenånga, vid rekombineringen. Förutsättningarna för rekombinering är då relativt gynnsamma, genom att kraven på omblandning av gasfasen inte är så höga, givet den normalt mycket långsamma ansamlingen av knallgas.

Vid vätgasdosing till matarvattnet innehåller ångan ett överskott av vätgas relativt syre. Vätgas kommer att ansamlas runt rekombinatorn och tendera att ”isolera” denna. Knallgas kan då ansamlas på ett andra ställen i systemdelen. Vid idrifttagning av systemdelen kan knallgasen transporteras till rekombinatorn och antändas av denna. Rekombinering är därför en olämplig åtgärd mot knallgasansamling vid vätgasdosing till matarvattnet.

# Några erfarenheter från nordiska kokarreaktorer

Några allvarliga knallgasincidenter, liknande de i Hamaoka-1 eller Brunsbüttel, har inte inträffat i de nordiska kokarreaktorerna. Flertalet rapporterade incidenter har rört styrventiler till huvudventilerna i avblåsningssystemet. Även styrledningarna till dessa ventiler har vid några tillfällen berörts, liksom styrventiler till ångledningarnas skalventiler. Flertalet skador har varit interna skador eller deformationer.

Även ångsystem på turbinsidan har drabbats av knallgasincidenter. Rostfria mellanöverhettartuber och ejektorsystemet har skadats. Ett nivåreferenskärl har brustit.

Endast några enstaka incidenter där knallgas antänts vid atmosfärstryck är kända för författaren. De flesta och de allvarligaste incidenterna har inträffat i ångsystem och vid högre tryck.

Lokala rekombinatorer i form av trådspiraler av platina har tidigare rekommenderats av leverantören av de nordiska kokarreaktorerna, Westinghouse Atom. Flera reaktorer är därför utrustade med Pt-rekombinatorer på kända problemställen i ångsystemen.

Erfarenheterna av Pt-rekombinatorer är inte genomgående goda. Vid flera tillfällen har knallgasincidenter inträffat, trots att systemdelen varit försedd med Pt-rekombinator. Detta kan ha flera tänkbara orsaker. En är att rekombinatorns funktion ofta nedsätts genom att korrosionsprodukter fälls ut på ytan. En annan är att rekombineringsförmågan är mycket låg vid låg temperatur. Samtidigt har temperaturmätningar visat att en knallgasansamling som kraftigt sänker temperaturen kan inträffa i tidskala vid uppstart av reaktorn. Detta är en långt snabbare ansamlingshastighet än vad rekombinatorn är avsedd för vid full arbetstemperatur. Att en mycket hög ansamlingshastighet för knallgas är möjlig vid uppstart var inte känt då Pt-rekombinatorer introducerades.

I några fall har klena ventileringsledningar anslutits till styrledningarna i avblåsningssystemet. Trots att utformningen inte är optimal (ventileringsledningen inte ansluten "längst ut", själva styrventilen ventileras ej) tycks det låga, kontinuerliga ångflödet genom dessa ventileringsledningar ha positiv effekt. Inga skador har hittills inträffat i ventilerade systemdelar.

## Litteratur om knallgas

Grundläggande fakta och teori behandlas t.ex. i den klassiska boken av Lewis och von Elbe (1961). Det som saknas här är framför allt behandling av övergången från deflagration till detonation. Detta är fortfarande ett aktivt forskningsområde. Några intressanta fenomen, som galloperande detonation och ”overdriven detonation” beskrivs kortfattat av Thomas (1999). Denna ref. finns tillgänglig på Internet, <http://www.safetynet.de/Publications/articles/5-99-1.pdf>.

Mycket information om vätgas finns samlad i vad som populärt kallas NASA Hydrogen Handbook (1997). Kan hämtas på Internet, <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/871916.pdf>.

Intresset för knallgas i reaktorsammanhang ökade kraftigt efter haveriet vid Three Mile Island, där en knallgasbrand inträffade i reaktorinneslutningen. En omfattande informationssammanställning utarbetades då vid Sandia av Sherman et al. (1980). Denna innehåller omfattande referenslistor till litteraturen före 1980.

Det specifika problemet knallgasansamling under drift i kokarreaktorer är mycket sparsamt behandlat i litteraturen. Äldre referenser är Kienberger (1993) och den där refererade experimentella undersökningen angående nedblåsningsrör av Tenzler (1992).

Genom incidenterna i Hamaoka och Brunsbüttel har knallgasansamling i kokarreaktorer fått ökad aktualitet. Den hittills bästa referens detta resulterat i är den japanska myndighetsrapporten Investigation Report on Pipe Rupture Incident at Hamaoka Nuclear Power Station Unit-1 (2002). Denna är tillgänglig på Internet som <http://www.nisa.meti.go.jp/english/0207eng.pdf>.

## Referenser

Chan, C., C., Dewit, W., A., och Koroll, G., W., *Criteria for Transition from Deflagration to Detonation in H<sub>2</sub>-Air-Steam Mixtures*, International Seminar on Heat and Mass Transfer in Severe Reactor Accidents, Cesme, Turkiet, 21-26 Maj, 1995.

Heck, R. et al., *Hydrogen Reduction Following Severe Accidents*, Atomwirtschaft, Dec. 1993, pp 850-853.

Himmelblau, D., J. *Solubilities of Inert Gases in Water - 0 °C to Near the Critical Point of Water*, Chem. Eng. Data, 5 (1960) Pp.10-15.

*Investigation Report on Pipe Rupture Incident at Hamaoka Nuclear Power Station Unit-1*, Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) and Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), Japan (2002).

Kienberger, K., H., *Radiolysegasansammlungen im Dampfsystem eines Siedewasser-Kernkraftwerkes*, VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993), Heft 3.

Lanz, A., *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, Module 1: Hydrogen Properties*, kursmaterial, College of the Desert, Palm Desert, CA (2001).

Lewis, B., och von Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, 2<sup>nd</sup> Ed., New York, NY (1961).

*Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems*, NSS 1740.16, National Aeronautics and Space Administration, Office of Safety and Mission Assurance, Washington, DC (1997).

Schulz, E. och Shepherd, J., *Detonation Diffraction Through a Mixture Gradient*, Explosion Dynamics Laboratory Report FM00-1, Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology, Pasadena, CA (2000).

Sherman, M., P., et al., *The Behavior of Hydrogen During Accidents in Light Water Reactors*, NUREG/CR-1561, SAND80-1495, R3 Sandia National Lab, Albuquerque, NM (1980).

Tenzler, G., *H<sub>2</sub>-Problematik in den Abblaserohren von Siedewasserreaktoren*, Abschlußbericht, TU München, Lehrstuhl A für Thermodynamik, o. Prof. Dr.-Ing. F. Mayninger, München (1992).

Thomas, G., O., *Some Observation on Flame Acceleration and the Development of Detonation in Process Pipelines*, Centre for Explosion Studies, Department of Physics, University of Wales, Aberystwyth, U.K., Paper presented during Fifth SAFETYNET seminar, 4<sup>th</sup> August 1999.

van Wingerden, K., Bjerketvedt, D., och Bakke, J., R., *Detonations in pipes and in the open*, Rapport, Christian Michelsen Research, Bergen, Norge (Nov. 1999).



[www.ski.se](http://www.ski.se)

**STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION**  
Swedish Nuclear Power Inspectorate

**POST/POSTAL ADDRESS** SE-106 58 Stockholm

**BESÖK/OFFICE** Klarabergsviadukten 90

**TELEFON/TELEPHONE** +46 (0)8 698 84 00

**TELEFAX** +46 (0)8 661 90 86

**E-POST/E-MAIL** [ski@ski.se](mailto:ski@ski.se)

**WEBBPLATS/WEB SITE** [www.ski.se](http://www.ski.se)