
Forskningsprojektet APRI 4 (Accident Phenomena of Risk Importance) genomförs i samarbete mellan:

- Statens Kärnkraftinspektion
- Ringhals AB
- OKG Aktiebolag
- Forsmarks Kraftgrupp AB
- Barsebäck Kraft AB
- Teollisuuden Voima Oy (TVO)

under ledning av en styrgrupp, bestående av:

OKG Aktiebolag	Mauritz Gärdinge, ordförande
Statens Kärnkraftinspektion	Oddbjörn Sandervåg
Ringhals AB	Anders Hensch
Forsmarks Kraftgrupp AB	Ingvar Berglund
Barsebäcks Kraft AB	Erik Larsen
TVO	Heikki Sjövall

SAMMANFATTNING

Målet med denna rapport är att sammanställa och värdera kunskapsläget gällande smältans kylbarhet i reaktortanken, samt att bedöma behovet av att genomföra nya experiment inom området. Frågan är om det finns möjlighet att härds smältan eller härdesterna kan hållas kvar i reaktortanken om man tillräckligt tidigt kan tillföra vatten till reaktortanken även efter smältan har förflyttat till tankbotten

Många kylbarhetsexperiment har genomförts (eller pågår fortfarande) i olika håll i världen. Man kan konstatera att det är nästan omöjligt att göra experiment i större skala och med prototypiskt material p.g.a. dels kostnaderna och dels hanteringsproblem med de höga temperaturerna. De flesta av hittills genomförda eller pågående experiment är därför specialanpassade för att utreda en specifik fråga. Vid sådana småskaliga experiment är det extra viktigt att värdera experimentens relevans för en reaktoranläggning både vid val av experimentförutsättningar och dels vid resultatutvärdering.

I denna utredning har vi koncentrerat oss på de experiment som berör fenomen och mekanismer som påverkar kylbarheten av härdester i reaktortanken och kan fördröja tankbrottet. Målet är att få ett samlat grepp om dessa experiment och framför allt över de fenomen som påverkar in-vessel kylbarhet, samt att bedöma behovet av att genomföra eventuella nya experiment inom området.

Följande moment har ingått i denna studie:

- övergripande handberäkningar för att bedöma vilka kylmöjligheter det kan finnas inuti i reaktortanken,
- värdering av dessa kylmöjligheter för att finna var de eventuella experimentella insatserna bäst kan komma till nytta,
- en omfattande litteraturstudie över redan genomförda experiment.
- diskussioner avseende möjligheterna att genomföra föreslagna experiment med potentiella leverantörer.

Resultaten av utredningen framgår av denna rapport. Båda beräknings och experimentella insatser föreslås som fortsatt satsning på forskning inom detta område.

Som experiment föreslås en experimentserie, liknande KTH's POMECO experiment. Experimentseriens syfte är att utreda hur reaktortankens strukturer påverkar kylbarheten av en rasbädd. Rasbäddens egenskaper rekommenderas att väljas enligt förslaget i VTT's rapport [Lin-00-2].

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	4
2	GRUNDLÄGGANDE PARAMETRAR	5
2.1	GRUNDDATA FÖR EN HÄRDSMÄLTA	5
2.1.1	<i>Teoretisk porositet vid jämna kulor.....</i>	6
2.2	TANKBOTTENS DETALJERADE GEOMETRI.....	9
2.3	REAKTORTANKENS OCH TANKGENOMFÖRINGARNAS KYLMEKANISM VID HÄRDSMÄLTA.	9
2.3.1	<i>Härdsmältans nedrinning och fragmentering</i>	9
2.3.2	<i>Kylbarhet av en rasbädd - kylning genom den övre fria kylningsarean.....</i>	11
3	VÄRDERING AV KUNSKAPSLÄGET GÄLLANDE SMÄLTANS KYLBARHET I REAKTORTANKEN	12
4	TÄNKBARA FORSKNINGS- OCH EXPERIMENTELLA INSATSER	16
5	REFERENSER.....	18

Tabellförteckning

Tabell 1	Grunddata för en härdsmäta	5
Tabell 2	Övriga data för en härdsmäta	5
Tabell 3	Porositeten hos några material.....	8
Tabell 4	Lista över experimentella program angående smälta-reaktortank växelverkan. [Grs-98]	14
Tabell 5	Lista över fenomen angående smältans kylbarhet i reaktortanken och värdering av den aktuella kunskapsläget.	15

Figurförteckning

Figur 1.	Möjlig fri volym för härdrester i reaktortankens botten. (Illustration för Figur 2.)	20
Figur 2.	TVO 1&2. Beräkning av fri volym i reaktortankens botten, som funktion av höjden.....	21
Figur 3.	O1, TVO 1&2 och F3/O3. Beräkning av fri volym i reaktortankens botten, som funktion av höjden.	22
Figur 4.	Beräkning av möjliga kylareor i reaktortankens botten. (Illustrationer för Figur 5).....	23
Figur 5.	TVO 1&2. Möjliga kylareor i reaktortankens botten som funktion av höjden.	24
Figur 6.	O1, TVO 1&2 och F3/O3. Möjliga kylareor i reaktortankens botten som funktion av höjden.	25
Figur 7.	TVO 1&2. Procentuell fördelning av möjliga kylareor i reaktortankens botten som funktion av höjden.	26
Figur 8.	F3/O3 Procentuell fördelning av möjliga kylareor i reaktortankens botten som funktion av höjden. ..	27
Figur 9.	Utdrag ur ref. Stö-87. Relativ resteffekt och relativ restenergi som funktion av tiden.	28
Figur 10.	Utdrag ur ref. Lip-84. "Dryout heat flux versus particle diameter"	29
Figur 11.	Utdrag ur ref. Gar-98. "Hypothesized scenario of TMI-2 molten pool falirure and corium relocation"	30
Figur 12.	Utdrag ur ref. Gar-98. "Sketch of hypothesized scenario of TMI-2 molten corium flow through the upper and lower core support assambles"	31
Figur 13.	Utdrag ur ref. Lin-97. "MAAP 4 models of relocation of melt from core to lower plenum."	32
Figur 14.	Utdrag ur ref. Ham-93. Försöksanordning vid test av en genomföring.	33
Figur 15.	Utdrag ur ref. Grs-99. Sammanfattning a Försöksanordning vid test av en genomföring.	34
Figur 16.	Möjlig testarrangemang för undersökning av strukturernas påverkan på kylbarheten av en partikelbädd.....	35

1 Inledning

Då de konsekvenslindrande åtgärderna för svåra haverier infördes vid de svenska kärnkraftverken före och under 1988, var en av de grundläggande strategierna att sträva efter att behålla härdinventariet innanför inneslutningen. Man antog i händelse av ett härdhaveri, att reaktortanken sannolikt genomsmälts och stora smältmängder kommer ut till inneslutningens botten. I myndigheternas godkännande av de genomförda åtgärderna, ålades emellertid också kraftföretagen att följa den fortsatta kunskapsutvecklingen och att återkomma med redogörelser för hur man beaktat denna.

Efter 1988 har i Sverige utvecklingen inom området svåra haverier, följts i ett antal forskningsprojekt (HAFOS och APRI 1-4). Dessa projekt har drivits i samarbete mellan kraftbolagen och SKI. I dessa arbeten har det framkommit att för flera fenomenområden finns det starka indikationer på att de slutsatser som drogs under tiden då de konsekvenslindrande systemen installerades, idag är mindre sannolika. Dessa indikationer gäller fenomen som exempelvis kylning innanför reaktortanken, tankgenomsmältning, fragmentering och ångexplosioner vilka samtliga har en direkt påverkan på möjligheten att erhålla en kylbar härdsmältekonfiguration. Man kan konstatera att möjligheterna till att undvika reaktortankbrott även vid en härdsmälta är goda, d.v.s. sannolikheten att härdsmältan eller härdresterna kan hållas kvar i reaktortanken är mycket större än det man har tidigare trott.

Målet med denna rapport är att sammanställa och vardera kunskapsläget gällande smältans kylbarhet i reaktortanken, samt att bedöma behovet av att genomföra nya experiment inom området. För att uppnå detta syfte har vi gått igenom många kylbarhetsexperiment som har genomförts (eller pågår fortfarande) på olika håll i världen. Man kan konstatera att det är nästan omöjligt att göra experiment i större skala och med prototypiskt material p.g.a. dels kostnaderna och dels hanteringsproblem med de höga temperaturerna. De flesta av hittills genomförda eller pågående experiment är därför specialanpassade för att utreda en specifik fråga. Vid sådana småskaliga experiment är det extra viktigt att värdera experimentens relevans för en reaktorankläggnings både vid val av experimentförutsättningar och dels vid resultatutvärdering.

I denna utredning har vi koncentrerat oss på de experiment som berör fenomen och mekanismer som påverkar kylbarheten av härdrester i reaktortanken och kan fördröja eller helt förhindra reaktortankbrott.

Följande moment har ingått i denna studie:

- övergripande handberäkningar för att bedöma vilka kylmöjligheter det kan finnas inuti i reaktortanken,
- värdering av dessa kylmöjligheter för att finna var de eventuella experimentella insatserna bäst kan komma till nytta,
- en omfattande litteraturstudie över redan genomförda experiment.
- diskussioner avseende möjligheterna att genomföra föreslagna experiment med potentiella leverantörer.

2 Grundläggande parametrar

2.1 Grunddata för en härdsmälta

Grunddata för en härdsmälta brukar bestämmas utifrån materialmängden i reaktortankens härdregion. Materialmängden och materialsammansättningen varierar något, beroende på reaktorernas aktuella bränsletyp. Nedanstående värden i Tabell 1 är tagna dels från referenserna Lin-97 och Fre-86 och dels från resultaten av våra egna handberäkningar. I våra handberäkningar har vi utgått från SVEA-100 bränsle.

Tabell 1 Grunddata för en härdsmälta

	F3 / O3 [10 ³ kg]	TVO 1&2 [10 ³ kg]	Fördelning [%]
Total massa av UO ₂	143	104,3	59
Total massa av Zr i kapsling	32,3	22,2	13
Total massa av Zr i boxar	21,1	13,7	8
Total massa av SS i styrstavar och boxar, fjädrar	38	27	16
Total massa av bor i styrstavar	2	1,3	1
Total massa av patronuppställningsplatta	8	6	3
Summa	245	175	100

Tabell 2 Övriga data för en härdsmälta

	F3 / O3	TVO 1&2
Medeldensitet kg / m ³	8,8 · 10 ³	8,8 · 10 ³
Volym vid 0% porositet [m ³]	28	20
Volym vid 20% porositet [m ³]	35	25
Volym vid 40% porositet [m ³]	46,7	33,3
Dimensionerande värmeproduktion [MW] (80 % resteffekt vid 1,4 h efter snabbstopp. Relativ resteffekt 1,22 %)	32	24

Materialmängden ovan är en bedömd maximalt materialmängd som eventuellt kan förflytta sig från härdregionen till reaktortankens botten. Medeldensiteten beräknades med hjälp av den procentuella fördelningen av de inblandade materialen. Den beräknade medeldensiteten stämmer bra överens med TMI-2 fallet (Tmi-94). Vid olyckan i TMI-2 har 19-ton material förflyttats till tankens botten. Detta utgjorde 15 % av den totala materialmängden i härd. Från referensen Tmi-94 framgår det också att materialets medeldensitet i tankbotten var $8,4 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 0,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) och materialets medelporositet var 18 %, (± 11 %). Porositeten 20 % i Tabell 2 valdes som ett något högre värde än medelvärdet i TMI-2. Den högre porositeten (40 %) i Tabell 2 är högre än den teoretiska porositeten hos en material bestående av runda kulor med en och samma diameter. Detta värde kan betraktas som det högsta möjliga medelvärdet som kan eventuellt förekomma hos ett smält och återstelnat material. Den teoretiska porositeten behandlas också i en separat avsnitt under punkt 2.1.1.

Den dimensionerade värmeproduktion i rasbädden har beräknats till 32 MW respektive 26 MW enligt Tabell 2. Dessa värden motsvarar till ca 80% av resteffekten vid 5000 s efter snabbstopp. Referensen Lin-97 anger 5020 s som tidpunkt för den första omflyttningen en liten del av smältan till tankbotten i fallet F3/O3. En motsvarande analys för TVO 1&2, med

ett annat beräkningsverktyg gav över 4 timmar som tidpunkt för den första omflyttningen – i och för sig då en större del av smältan - till tankbotten. Referensen Seh-99 anger 2-3 timmars avkokningstid innan signifikanta härdskador inträffar och en ytterligare tid på 0,5 - 1 timmar för nedsmältning. Sammanlagt resulterar detta ~3 timmar för tidpunkten till materialomflyttning till tankbotten.

Man kan konstatera att analysen av de komplicerade härdsmälteförloppen i reaktortanken, som har stor betydelse för kylbarhet och ev. genomsmältning, är dock - även med de gjorda framstegen - fortfarande mycket osäker. Den valda tidpunkten 5000 s eller ca 1,4 timmar anses vara en konservativt (för tidigt) valt värde, och 80 % av resteffekten på hela härden anses vara ett för högt valt värde, i och med att det motsvaras av att hela härden har flyttats till tankbotten med undantag av några få ämnen som befinner sig på andra ställen (i huvudsak ädelgaser och jod). Den relativa resteffekten är beräknad enligt Stö-87, vilket ger vid 5000 s ca 1.22 %. Som termisk effekt har 3300 MW används för F3/O3 och 2500 MW för TVO 1&2. Relativ resteffekt och relativ restenergi enligt Stö-87 återges även här som Figur 9.

2.1.1 Teoretisk porositet vid jämna kulor

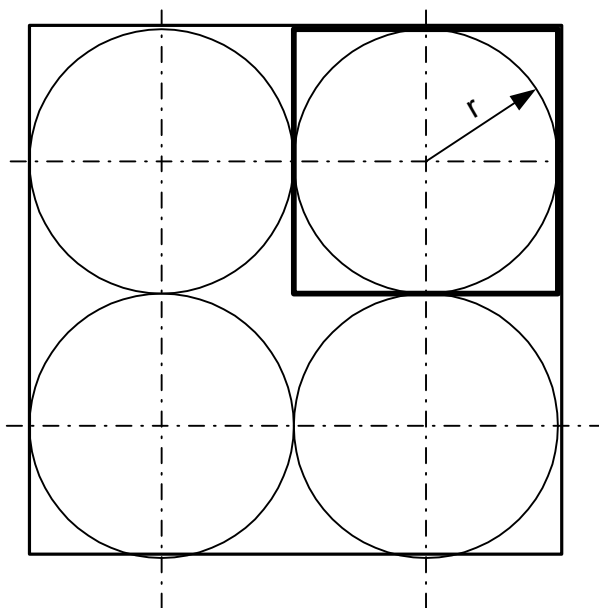
Vi har tittat närmare på teoretiskt möjliga porositetssiffror, eftersom porositeten påverkar den erhållna grusbäddens volym och förändrar också de möjliga kylareorna.

Porositeten – p – definieras som void-volymens V_v storlek till relaterat till materialets totala volym V_t :

$$p = \frac{V_v}{V_t} \text{ uttryckt som andel, eller } p = \frac{V_v}{V_t} \cdot 100 \text{ uttryckt i \%}.$$

Porositeten beror på hur tätt materialet är packad. Här redovisar vi den teoretiska porositeten vid tre olika packningsätt av kulor med samma diameter.

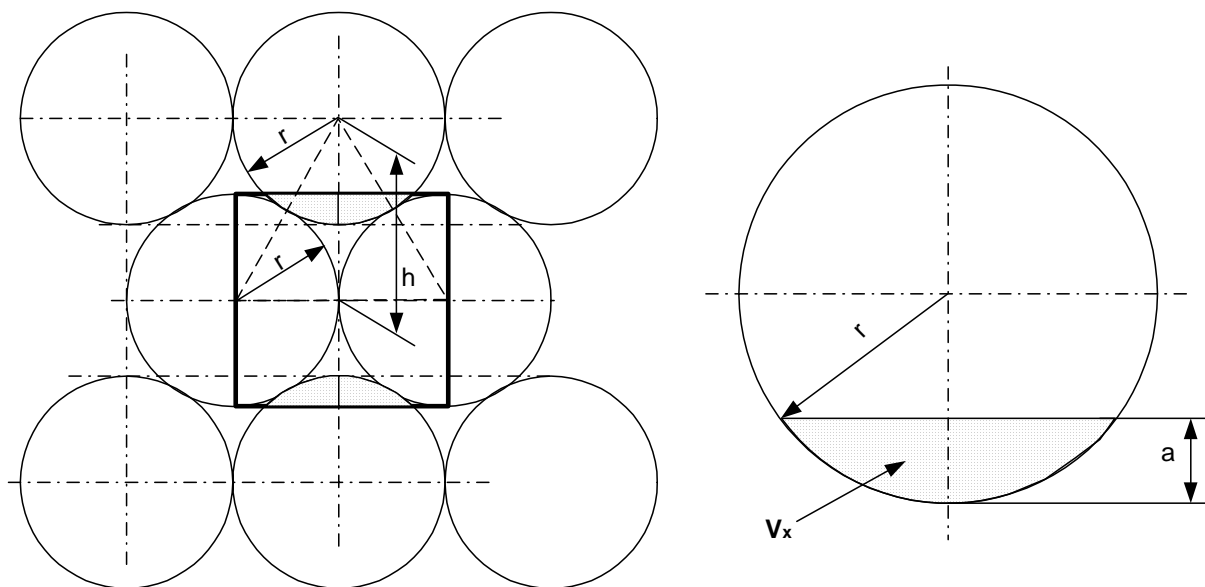
1. Om materialet är packad på ett enkelt kubiskt sätt, ser konfigurationen ut enligt följande:



Den teoretiska porositeten i detta fall är skillnaden mellan en kub och ett klot, som kan beräknas enligt följande:

$$p = \frac{8 \cdot r^3 - \frac{4}{3} \pi \cdot r^3}{8 \cdot r^3} = 1 - \frac{\pi}{6} = 0,48 \quad (1)$$

2. Om materialet är tätare packat, men kulorna ligger fortfarande i samma plan. I detta fall har vi följande situation:



Som framgår av ovanstående figur finns det plats för 4 st klotskivor med höjden a i en kub. Volymen V_x på en klotskiva med höjden a kan beräknas med följande formel:

$$V_x = \pi \left(r^2 \cdot a - \frac{a^3}{3} \right) \quad (2)$$

Förhållandena mellan klotskivans höjd a och klotets radie r kan beräknas med följande ekvation

$$(2 \cdot r)^2 = r^2 + (r + r - a)^2 \quad (3)$$

varav

$$a = (2 - \sqrt{3}) \cdot r \quad (4)$$

Volymen på 4 st klotskivor kan beräknas genom insättandet av värdet på a i ekv (2):

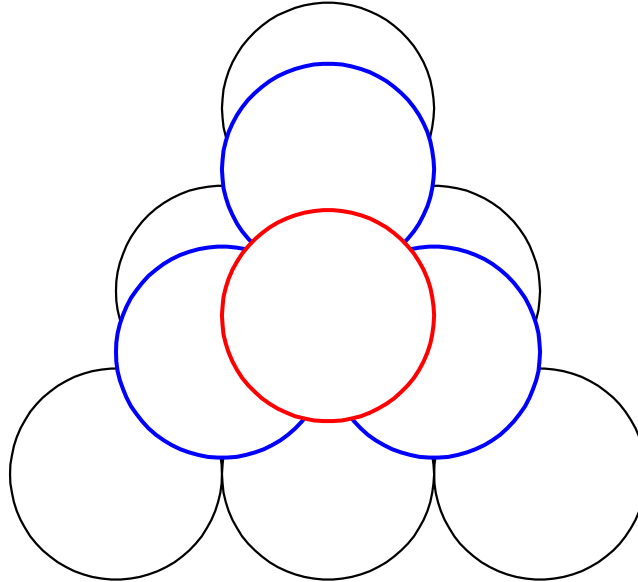
$$4 \cdot V_x = \frac{4}{3} r^3 \pi (3\sqrt{3} - 5) \quad (5)$$

och porositeten kan beräknas enligt följande:

$$p = \frac{8 \cdot r^3 - \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 - 4V_x}{8 \cdot r^3} = \frac{8 \cdot r^3 - \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 (3\sqrt{3} - 4)}{8 \cdot r^3} = 1 + \frac{2\pi}{3} - \frac{1}{2} \pi \sqrt{3} = 0,37 \quad (6)$$

3. Om materialet är packad på ett naturligt sätt så att det mesta möjliga material skall få plats i en volym (romboidisk packning).

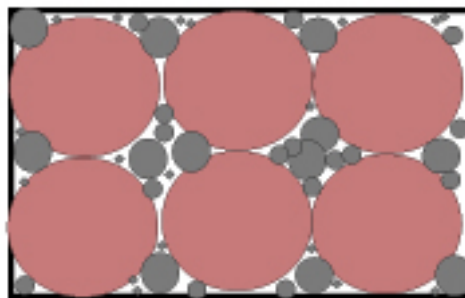
Kloten ligger då ovanpå varandra och är förflyttade i sidled, se figuren här nedan.



Den teoretiska porositeten i denna konfiguration är:

$$p = 1 - \sqrt{2} \frac{\pi}{6} = 0,26 \quad (7)$$

Nedanstående figur visar att osorterade och ojämna partiklar resulterar i lägre porositet:



Tabell 3 Porositeten hos några material

(Hämtat från http://geodynamics.wustl.edu/classes/hydrology/lectures/ch_02/ch_02.html)

sand & grus	20-50%
morän	10-20%
slam, bottenslamm	35-50%
lera, stoft	33-60%
kalksten	1-30%
basalt	1-12%
tuff	14-40%

2.2 Tankbottens detaljerade geometri

Genom handberäkningar i MS-Excel har vi beräknat volymen i olika reaktortankar som funktion av höjden från tankbotten, se Figur 1. Volymen har beräknats både innanför och utanför moderatortanken. Enligt referenserna Lin-97 och Lin-00 förväntas smältan att kylas ner och fragmenteras i den relativt stora vattenmängden som kan finnas kvar under härden. Avståndet mellan patronuppställningsplattan och reaktortankbotten är ~5.5 m i reaktorerna F3/O3, F1&2 och TVO 1&2. En nedkyld smälta kan knappast förflytta sig till fallspalten. Därför har vi koncentrerat oss framför allt på den fria volymen innanför moderatortanken utanför instrument- och styrstavsledrören (CRD-rören) i tankbotten. Figur 2 visar den fria volymen, med och utan fallspallt som funktion av höjden från tankbotten för TVO 1&2. Figur 3 visar den fria volymen i reaktortankens botten och innanför moderatortanken, som funktion av höjden för reaktorerna O1, TVO 1&2 och F3/O3.

Figur 3 visar att hela den potentiella härds smältan (se Tabell 2) med en porositet på ca 20 % kan få plats i en höjd mindre än 3.5 meter.

Figur 4 visar möjliga kylareor för olika kylmekanismer. Den första arean är den fria tvärsnittsarean som är karakteristisk för kylning av djup fragmenterad rasbädd. De andra areorna är reaktortankväggens fria invändiga area och dessutom instrument och CRD-tubernas yttre väggarea.

Figur 5 och 6 visar att den överlägset största möjliga kylarean är instrument och CRD-tubernas area. I Figur 5 visas fördelningen mellan dessa areor för TVO 1&2 och i Figur 6 visas detta även för reaktorerna F3/O3 och O1.

Figur 6 visar att dessa nämnda areor är relativt lika för de behandlade reaktorerna. Vid en höjd på 3.5 m kan vi avläsa följande areor: Den fria tvärsnittsarean innanför moderatortanken som är karakteristisk för kylning av en djup fragmenterad rasbädd är mellan 5.8 – 8.3 m². Reaktortankväggens fria invändiga area, som tillsammans med CRD- och instrumenttubernas yttre väggarea är karakteristisk för gapkylning är mellan 49 – 62 m² och instrument och CRD-tubernas totala yttre väggarea vid 3.5 meters höjd är mellan 300 – 380 m².

Figurerna 7 och 8 visar den procentuella fördelningen mellan dessa areor som funktion av höjden för reaktorerna TVO 1&2 och F3/O3. Figurerna visar att den största kylarean upp till en höjd av 0.5 meter, är den övre fria tvärsnittsarean (~ större än 50%) och reaktortankväggens invändiga area (~30 %). I samband med detta kan vi nämna att maximala höjden på rasbädden i TMI-fallet var 46 cm och snitthöjden var ~30 cm från tankbotten. Om rasbäddens höjd når upp till ca 1 meter, blir CRD-tuberna den dominerande kylarean. Vid en rasbäddshöjd på 3,5 m från tankbotten är den procentuella uppdelningen följande: övre tvärsnittsarean ~2 %, reaktortankens invändiga area ~13%, instrumenttubernas yttre area ~9 % och CRD-tubernas yttre area är ~76%.

2.3 Reaktortankens och tankgenomföringarnas kylmekanism vid härds smälta.

2.3.1 Härds smältans nedringning och fragmentering

Man förutsätter att härds smältan bildas först i reaktortankens härdregion och dess nedringning till tankens botten sker genom gravitation. Figur 11 och 12 visar artistiska skisser hur detta

förlopp kunde gått till vid TMI-2 olyckan. Avståndet mellan patronuppställningsplattan och reaktortankens botten i TMI-2 var endast 2.2 m och enligt Figur 12 fanns det tre ganska tjocka plattor - flödesfördelare mm. i detta utrymme.

Motsvarande avstånd mellan patronuppställningsplattan och reaktortankbotten är 5.5 m i reaktorerna F3/O3 och F1/F2. I detta utrymme finns det t.ex. 169 CRD-tuber och 64 instrumenttuber i F3/O3, som upptar mer än hälften av moderatortankens tvärsnittsytta. Förhållandena är likartade i de övriga nordiska BWR. Detta är grunden till vår bedömning att sannolikheten är större för att smältan rinner längst en CRD-tub eller instrumenttub, än att smältan rinner fritt ner och fragmenteras i ett djup vattenvolum.

Småskaliga experiment tyder på att det finns en kylmekanism (Ref, Apr-99) som innebär att en eventuell härdsmlta är kylbar i reaktortankens botten om det finns rikligt vatten där. Hörnplarna i detta kylmekanism i reaktortanken är följande:

- Små sprickor och ojämnheter på innerytan av reaktortanken är fyllda med vatten när ytan är våt. Smälta som kommer till väggen stelnar och bildar en sammanhängande krusta mycket nära väggen. Vatten som är fångat i sprickor och dylikt förångas snabbt på grund av värmen och det tryck som bildas i samband med detta påverkar den stelnade krustan med en kraft riktad bort från väggen. Krustan kommer att befinna sig mycket nära väggen, men den är inte fastsvetsad vid denna.
- Smältans krympning vid stelning och väggarnas krypning vid uppvärmning eller belastning leder till att det bildas en spalt mellan stelnad smälta och tankvägg. Spalten medför att väggen kyls om vatten finns tillgängligt i tankens nedre plenum.

Ref. Apr-99 uppger en uppmätt kyleffekt 300 kW/m^2 vid reaktortankväggen. De småskaliga experimenten tyder på att motsvarande kylmekanism kan finnas också runt CRD- och instrumenttubernas yttre vägg.

För att belysa betydelsen av dessa kylmekanismer kan vi göra följande sifferexperiment. Anta att kylningen är 300 kW/m^2 vid reaktortankväggen och 100 kW/m^2 vid instrument- och CRD-tubernas vägg. De stora areorna vid dessa väggar (62 m^2 vid reaktortankväggen och 380 m^2 vid CRD- och instrumenttubernas vägg i F3/O3) resulterar i följande kyleffekter:

- 18,6 MW vid reaktortankväggen
- 38 MW vid instrument och CRD-tubernas vägg.

Dessa antagna kyleffekter tillsammans är en faktor 1.77 gånger större än den i Tabell 2 identifierade kylbehovet. Förutsättningen för att detta kylmekanism skall fungera är att det förs in i storleksordning 20 kg/s vatten i reaktortanken för att ersätta det vattnet som förångas i samband med kylningen. Här ser vi experimentella behov för att bekräfta dessa antaganden.

En annan grundläggande förutsättning är att det finns tillräckligt med vatten i tankens botten före smältans nedrinning. Enligt [Lin 97] är denna vattennivå bara ca 3 meter. Tvångsnedblåsning anses inträffa automatiskt i en BWR under ett härdsmlteförlopp. Detta kyler härden, men orsakar också stora förluster av kylmedel. Enkla handberäkningar visar att nära 40 % av reaktortankens kylvatten blåses ut under denna process. Om tvångsnedblåsning sker vid ca 10 meter vatten i reaktortanken, blir det ca 6 meter vatten kvar i tanken efter tvångsnedblåsning och inte 3 meter som är fallet enligt beräkningarna i [Lin-97].

2.3.2 Kylbarhet av en rasbädd - kylning genom den övre fria kylningsarean

Tidigare har man grovt utgått ifrån att kylarean för eventuella härdrester är den tillgängliga fria tvärsnittsarean mot vattnet som kan finnas ovanpå härdresterna i en reaktortanken. Den invändiga arean i en tank med 5 meters diameter (F3/O3) är 20 m². Mer än hälften av denna area upptas av CRD-tuber och instrumentrör. Den resterande fria arean – som framgår av avsnitt 2.3 Tankbottens detaljerad geometri – är 8,3 m², bedömdes vara alldeles för litet för att kyla bort 32 MW resteffekt, vilket enligt punkt 2.2 - grunddata för en härdsmälta - är den dimensionerande resteffekten i tankbotten, vid 1.4 timmar efter snabbstopp i en reaktor med en termisk effekt på 3300 MW.

Omfattande teoretiska studier och experiment har genomförts under de gångna 20 åren för att öka kunskaperna om kylbarheten hos värmealstrande partikelbäddar. För att en bädd skall anses vara kylbar i detta sammanhang har det förutsatts att någon återsmältning ej får inträffa i den. Kriteriet för detta har definierats som att någon torrkokning (dry out) ej får erhållas i bädden. Värmeflöden då sådan torrkokning erhållas benämnes kritiskt värme flöde (CHF eller dry out). I vissa bäddar behöver ej någon återsmältning inträffa trots att torrkokning har erhållits, dvs. bädden är kylbar. Det ovannämnda kriteriet återger således det lägsta värdet för bäddens kylbarhet.

Beträffande kylningen av en högaktiv värmealstrande bädd så presenteras en mycket omfattande litteraturstudie i [Fre-86 och i Lin-00-2]. Studien [Fre-86] baseras primärt på 50 referenser och sekundärt på flera hundra tekniska rapporter, vilka i huvudsak har presenterats under åren 1978-1986. Studien [Lin-00-2] som har beställts av APRI 4 och kommit ut i dagarna visar resultaten/sammanfattningen av de senaste årens omfattande antal experiment. Flera av dessa experiment har genomförts med prototypiskt material. Studiernas [Lin-00-2 och Fre-86] slutsatser är att [Lin-84], d.v.s. Lipinski's modell är den som i särklass ger bästa överensstämmelsen med experimentresultaten för att prediktera global dryout.

De i [Lin-00-2 och Fre-86] refererade experiment täcker in både botten- och/eller toppkylda värmealstrande porösa partikelbäddar med olika bädddata. För att klarställa om en radioaktiv värmealstrande bädd är kylbar måste vetenskapen om partikelfördelningen (skiktningen) och partikelspektrat (storleken) vara fastställd. Dessa bädddata bestäms då smältan rinner ned i vattnet. För partikelstorleken gäller att endast ett fåtal rapporter har hittats som experimentellt kan ge en indikation om hur stora partiklarna är. Vad beträffar skiktningen är det självfallet ännu sämre beställt med experimentellt underlag, ty skiktningen styrs ju i huvudsak av geometriska data i aktuell reaktoranläggning, dvs. tankens botten, och utflödestiden från härdregionen.

[Lin-00-1 och Lin-00-2] sammanfattar de genomförda experimenten angående "best estimate" partikelstorlek och skiktning. Enligt [Lin-00-1] finns det två huvudtyper av experiment, nämligen s.k. "simulant" material och "corium" tests. Medianvärdet på de erhållna partiklarna varierar mellan 1,7 - 4 mm, beroende på testtyp, vattnets underkylning, och mängden material som var involverad i testerna. Partiklar under en mm i diameter har endast erhållits i samband med ångexplosion och att ångexplosion kunde endast åstadkommas med artificiell utlösning vid användandet av corium material. De större partiklarna har erhållits vid större materialmängder och kylning med vatten vid nära mättnadstemperatur. Kylning med underkyllt vatten och mindre materialmängder gav de mindre partiklarna.

Att den effektiva partikelstorleken är en mycket viktig parameter, framgår av Figur 10. Figuren visar att om den effektiva partikeldiametern ändras från 1 till 4 mm, ökar den kritiska värmeflödet från 300 kW/m^2 till över 1000 kW/m^2 .

Baserad på de tillgängliga experimentella rekommendationer [Lin-00-2] att man väljer 3.5 mm som effektiv partikeldiameter. Detta ger nära 1000 kW/m^2 avkylningsbar effekt, enligt Figur 10. Summerat på en yta av 8.3 m^2 blir resultatet för kritisk värmeflöde genom den övre tvärsnittsarean 8,3 MW.

Man kan nämna att det är ingalunda säkert att utrustningen som berörs av bädden skadas allvarligt även om bädden återsmälter på lokala platser, ty utrustningen kan skyddas av den krusta som finns i randen mot smältan. Ovanstående beräkning gäller för en bädd utan de strukturer som finns i botten av en reaktortank. Där finns det t.ex. 169 CRD-tuber och 64 instrumenttuber i F3/O3. Motsvarande siffror för TVO 1&2 är 121 och 50. För att belysa strukturernas effekt på kylbarheten av en partikelbädd, pågår det ett experimentserie kallad MOSES hos VTT i Finland. [Lin-99]

3 Värdering av kunskapsläget gällande smältans kylbarhet i reaktortanken

De i ovan presenterade räkneexemplen har vi använt för att med siffror belysa de olika möjliga kylmekanismernas effekter.

Vi kan konstatera att de största osäkerheterna kan finnas i härds smältans väg till tankens nedre botten. Enligt referenserna Lin-97 och Lin-00 förväntas smältan att kylas ner och fragmenteras i den relativ stora vattenmängden som kan finnas kvar under härden. Avståndet mellan patronuppställningsplattan och reaktortankbotten är 5.5 m i reaktorerna F3/O3 och F1/F2. Motsvarande avstånd var 2.2 m i TMI-2 enligt Figur 12 och ref Tmi-94.

Figur 13 visar en skiss från MAAP 4 som vill illustrera hur förflyttningen från härdregionen till tankens botten kan gå till. Figuren 11 och 12 visar hur detta förlopp kunde ha gått till vid TMI-2 olyckan.

Referensen Lin-97 anger 5020 s som tidpunkt för den första omflyttningen av en liten del av smältan till tankbotten i fallet F3/O3. En motsvarande analys för TVO 1&2, med ett annat beräkningsverktyg gav över 4 timmar som tidpunkt för den första omflyttningen – i och för sig då en större del av smältan - till tankbotten.

Man kan konstatera att analysen av de komplicerade härds smälteförloppen i reaktortanken, som har stor betydelse för kylbarhet- och ev. genomsmältningsförlopp, är dock - även med de gjorda framstegen - fortfarande mycket osäker.

Den största andelen kyla i reaktortankens botten (se punkt 2.2) är instrument- och CRD-tubernas yttre väggarea. Detta innebär både risker och möjligheter. Riskerna finns i att härds smältan eventuellt kan bränna av några genomföringar och reaktortankens integritet därmed förloras. Möjligheterna kan finnas i att dessa genomföringar fungerar som möjlig kylarea när inte de normala kylmekanismerna har fungerat.

Det finns både experimentella och teoretiska analyser gjorda för antagandet om att det finns redan en smältpöl i tankbotten (Seh-98), eller om att en jetstråle av smältan träffar en tom tankvägg (Din-97). De experimentella studierna är småskaliga studier och gäller endast för de antagna specifika randvillkoren. Vi har svårt att se att dessa idealiserade randvillkor överhuvudtaget kan existera i verkligheten. De teoretiska studierna har också idealiserade randvillkor och de tar t. ex. inte hänsyn till att strålen kyls ner och fragmenteras på vägen till tankbotten. Man kan naturligtvis dra vissa slutsatser även från dessa mycket idealiserade fall. Studien Din-97 visar t. ex. att mindre jetstråle under längre tid är farligare än större jetstråle under kortare tid.

Sammanfattningsvis kan sägas att TMI-2 olyckan är det enda storskaliga fall, där både smälta, tankvägg och vatten existerar tillsammans. Ref TMI-94 sammanfattar iakttagelserna för reaktortankens genomföringar från olyckan så här:

- 13 st av 52 st instrumentrör har skadats vid olyckan. Skadorna på 5 st instrumentrör var mycket omfattande, så att instrumentrörens integritet har förlorats. Skadornas mönster och nivå visar att ett flytande smälta ovanpå den stelade krustan i tankens botten som har orsakat instrumentrörens skador.
- Smältan har täppt till de instrumentrör vars integritet har förlorats. Reaktortankens integritet vidmakthölls eller återställdes under olycksförloppet. Referensen Ham-93 har undersökt detta förlopp i detalj och med experiment visade hur smältan stelnade och täppte till den testade genomföringen. Se Figur 14.
- Smältflödet har flutit i flera olika riktningar i tankbotten eftersom vissa genomföringar var mycket skadade och andra närstående genomföringar har inte visat några skador.
- Styrstavsmaterial (Ag, Cd, In, Zr, Fe, men inte U) kom till tankbotten först, före den stora omflyttningen av smältan till tankbotten.
- Utöver de värmerelaterade skadorna (avsmältning) var det skador som har orsakats av en kemiska reaktioner, gasutveckling och "balooning". Intergranulär inträngning av Zr, Ag-Cd i stutsens material som har lett till de kemiska reaktionerna.
- Den stora omflyttningen av smältan till tankbotten skedde 3 timmar och 44 minuter efter snabbstopp.

Grovt kan vi säga att TMI-2 olyckan visar att 10 % av instrument genomföringarna har blockerats av smältan. Smältan i tankbotten utgjorde endast 15 % av härdzonens totala materialmängd. Vad kan vi förvänta oss i en BWR-anläggning? Vi kan konstatera att vattenmängden under härden är mycket större i en BWR jämfört med en PWR. Detta kan göra att smältan – kyls ner innan genomföringarna skadas. Här finns det fortfarande betydande osäkerheter kvar innan man på ett acceptabelt sätt kan visa att kylningen fungerar och att reaktortankens integritet kan bibehållas.

Tabell 4 visar en lista över pågående experimentella program angående smälta-reaktortank växelverkan.

I Tabell 5 innehåller en lista över olika fenomen, experimentella bevis och några ord om värderingen av kunskapsläget för respektive fenomen.

Figur 15, (liksom Tabell 5) innehåller också en sammanställning av huvudhändelser/frågor runt härdsmälteförlopp i lättvattenreaktorer.

**Tabell 4 Lista över experimentella program angående smälta-reaktortank växelverkan.
[Grs-98]**

In-vessel Corium Quenching	Heat Transfer from a Molten Pool	Particle Bed Heat Transfer	Gap Cooling Mechanism	RPV Failure Mechanism
FARO (JRC-Ispra, EC) ALPHA (JAERI, Japan)	RASPLAV (RRC-KI, Russia) COPO2 (Finland) SIMECO (KTH, Sweden) BALI (CEA, France) ACOPO, (UCSB, USA)	German Debris/RPV-Program (IKE, TUM)	ALPHA (JAERI, Japan) SONATA-IV (KAERI, South-Korea) EPRI/FAI (USA) German Debris/RPV-Program (TUM, Siemens)	LHF (SNL, USA) FOREVER (KTH, Sweden) CORVIS (PSI, Switzerland)

Tabell 5 Lista över fenomen angående smältans kylbarhet i reaktortanken och värdering av den aktuella kunskapsläget.

	Fenomen	Experiment (frånsett TMI olyckan)	Referenser	Bedömning av kunskapsläget/anmärkningar. Subjektiva bedömningar, skala 1-5, där 5 är bäst.
1	Nedsmältningsförlopp i härden: a) kylning i vatten- och i ångfas b) metall-vattenreaktion, H ₂ produktion c) nedsmältning av boxar och styrstavar d) smältans sammansättning, kemiska reaktioner mellan beståndsdelarna e) frigörelse av fissionsprodukter	FLHT-tests CORA-tests PHEBUS	Beräkningar: Maap Melcor Scadaprelap5 ram-89 ram-91	Detta område är utanför det genomgående ämnet för vår rapport.
2	Ansamling av smälta i hårdzonen/blockering av kylkanaler	FLHT-tests CORA-tests PHEBUS	Ram-89 Ram-91	Viktig som randvillkor till smältans förflyttning till tankbotten. I de småskaliga experimenten förekommer det både blockeringar/icke blockeringar. TMI-2 tyder på en stor sammanhängande blockering. Kunskapsläge 4
3	Förflyttning av smältan från hårdzonen till tankens botten	Småskaliga experiment med olika flöden mm.	San-93 San-97 Grs-98	Antas ske m.h.a. gravitation. Viktig som randvillkor. Många osäkerheter. T. ex. vattenmängd i tanken, smältstrålens tjocklek, mm. Kunskapsläge 2
4	Smältans fragmentering	FARO och småskaliga experiment med specifika randvillkor	Gar-98 Grs-98	FARO-experimenten visar att det blev "debris cake" i vissa fall, ca 15-50% av smältan vid större smältmängder. Kunskapsläge 3
5	Växelverkan mellan smälta och genomföringar i tankbotten	FAI's och KTH's småskaliga experiment	Apr-99 FOREVER	Kunskapsläge 2
6	Kylmekanism i reaktortankbotten, "Crust formation and stability"	FAI's och JAERI's småskaliga experiment, "Gap-cooling" experiments	Apr-99	Kunskapsläge 2-3
7	Tankgenomsmältning	KTH-vessel hole ablation	Seh-98	Förutsätter att vatten är borta ifrån reaktortanken Kunskapsläge 4

4 Tänkbara forsknings- och experimentella insatser

En del av målet med detta uppdrag är att bedöma behovet av att genomföra nya experiment inom området och så långt det är möjligt lägga kostnads-nyttaspekter på dem.

Genomgången av kunskapslägen enligt de föregående kapitlen visar att de är lägst när det gäller smältans förflyttning från härdzonen till tankens nedre botten och för reaktortankbottens kylmekanism. De experiment som ligger till grund för t.ex. kylmekanismen i reaktortankbotten är endast småskaliga experiment med sk. simulat material. Materialmängderna och värmeenergin i experimentens material är mycket små jämfört med det som man kan tänka sig i ett härdsmälteförlopp i full skala.

Figur 16 visar en del av reaktortankens botten. CRD-genomföringarna bildar ett återkommande mönster. Genom att analysera endast en bit av reaktortankens botten och att applicera symmetrirandvillkor (dvs isolerade ränder) kommer man till mer hanterbara storlekar och materialmängder.

För att undersöka hur materialet kan rinna ned längst instrument och CRD-tuberna kan man tänka sig ett experiment där man avgränsar en bit av tanken enligt Figur 16. Höjden på testsektionen behöver vara 4 - 5 meter. Nästa steg är man fyller testsektionen med vatten och att man håller smält material uppifrån i denna testsektion. Lämpligast är att använda icke radioaktiv urandioxid som i MACE-experimenten, men experimenten skulle kunna genomföras i FARO-projektens experimentanläggning. Man kan eventuellt använda termitmältor som är mycket billigare och har samma volymetrisk värmekapacitet som urandioxid. Problemet med termitmältorna är att deras densitet är mycket lägre jämfört med urandioxid. Dessutom är explosionsrisken mycket stor med termitmältor. Man behöver också undersöka på vilket sätt det smälta materialet skall hållas i testsektionen (antalet jetstrålar och strålarnas diameter). Testinstrumenteringen bör vara mätning av temperatur på många olika ställen. Fördelarna med några sådana experiment är många. Experimentet skulle visa i detalj hur nedrinning, segmentering sker och hur det smälta materialets växelverkar med reaktortankbottens strukturer. Man förväntar sig att kunna dra slutsatser om krustbildning och krustans stabilitet.

Nackdelarna med experimentet - utöver kostnaderna är att smältans rörelse är begränsad i förväg i praktiskt taget i en dimension. En annan nackdel är att randvillkoren hur fort smältan hålls i testsektionen är fortfarande en okänt parameter. Man inser lätt att kostnaderna för några sådana experiment är enorma. Man behöver dessutom planera för flera experiment (minimum 3 st) för att det är alltför många fallgror på vägen när det gäller sådana nya experiment. Den enda möjligheten att genomföra sådana experiment är att det sker genom ett internationellt samarbete på ett liknande sätt som MACE-experimenten.

Ett annat mer genomförbart experiment kan vara att undersöka hur kylbarheten av en debrisbed påverkas av de strukturer som kan finnas i reaktortankbotten. Man skär ut en bit av reaktortankens botten enligt Figur 16. Man fyller denna sektion med partiklar med 3.5 mm enligt rekommendationen från [Lin-00-2] och undersöker "dryout heat flux" med och utan strukturer i bädden. Resultaten för en bädd utan strukturer borde bli ungefär det som kan beräknas ifrån korelationen enligt [Lip-84]. Det experimentet kommer att visa också om bäddens uppvärmning påverkar bäddens CHF. Som steg nummer två upprepar man experimenten med de fyra CRD-tuber och en instrumenttub i bädden enligt Figur 16. Ett tredje experiment kan vara att man pumpar ett vattenflöde genom CRD-tuberna (~0,12 kg/s per CRD-tub). Flödet skall mot-

svara det kylflöde som krävs för resteffektkylning. Sådana experiment liknar mycket till de POMEKO-experimenten som är under genomförande vid KTH. Vi bedömer att dessa experiment kan genomföras hos KTH och förhoppningsvis till en kostnad som ryms inom budgeten för APRI 4.

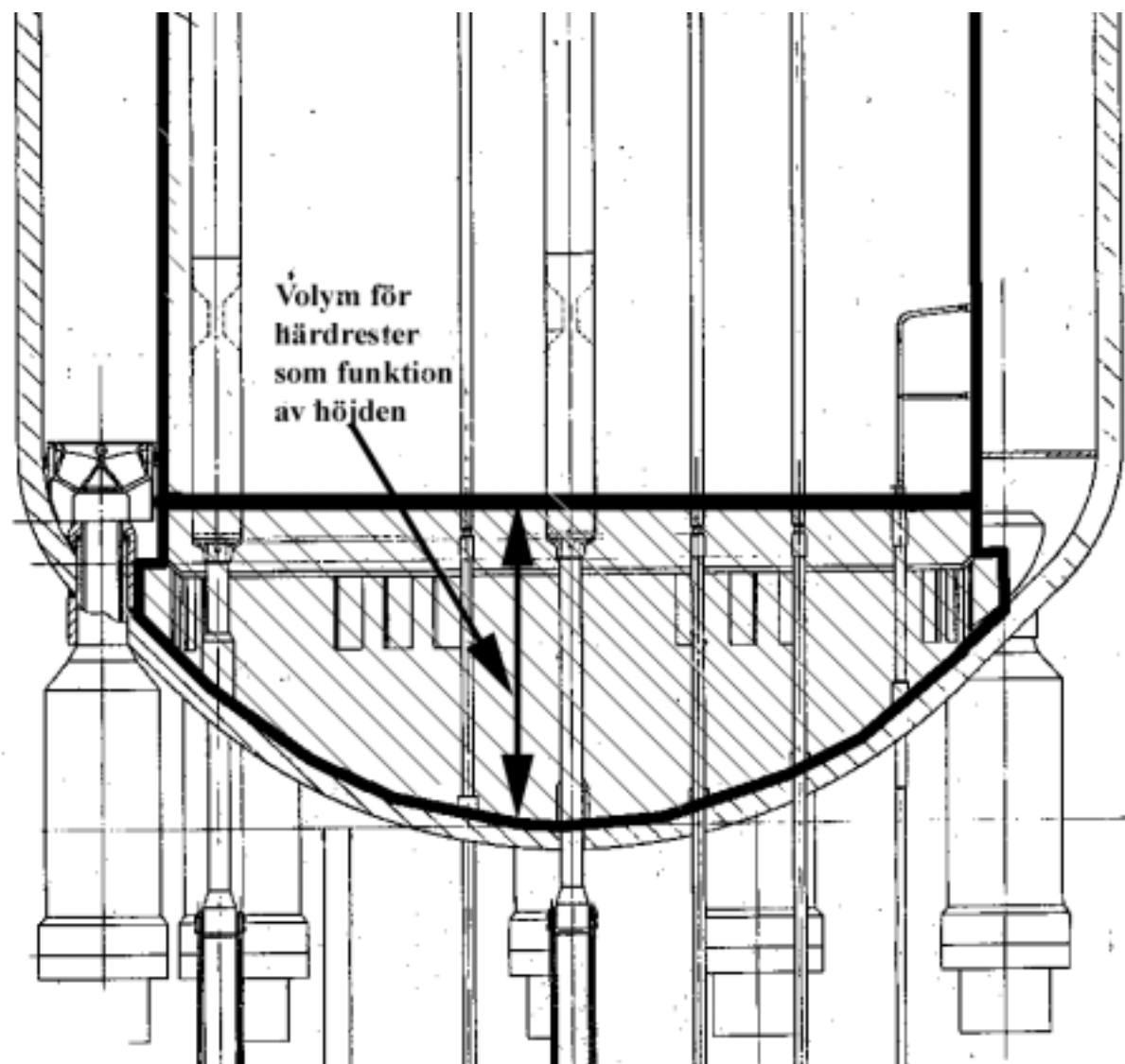
Utöver dessa experiment föreslår vi att man genomför några beräknings- och utredningsinsatser. Som vi har nämnt tidigare, är en grundläggande förutsättning för kylningen av härdsmältan inom reaktortanken att det finns tillräcklig med vatten i tankens botten före smältans nedrinning. Vi misstänker att noggrannheten på beräkningskoderna för härdsmälteberäkningar är otillräckliga eftersom vi har sett en alltför stor spridning av beräkningsresultaten för denna vattenmängd. Vi föreslår därför att den kvarvarande vattenmängden efter tvångsnedblåsning och utan vattenpåfyllning bör kontrollräknas, helst med en licensierad beräkningskod, t. ex. GOBLIN eller RELAP 5. Vi anser att det bästa sättet för dessa beräkningar är att man genomför parallella jämförelseberäkningar t. ex. mellan RELAP 5 och MAAP4. Som ett nästa steg i ett sådan studie kan vara att man analyserar i detalj hur flödesförloppet för smältan från härdregionen till reaktortankens botten är simulerat i MAAP 4.

Det kan nämnas att vissa kodjämförelser har redan gjorts inom NKS-projekten [Lin-97]. Där har det konstaterats att skillnaderna i kodernas beräkningsresultat berodde mest på nodalisering, d.v.s. hur den geometriska beräkningsdomänen delas in i kontrollvolymmer och noder.

5 Referenser

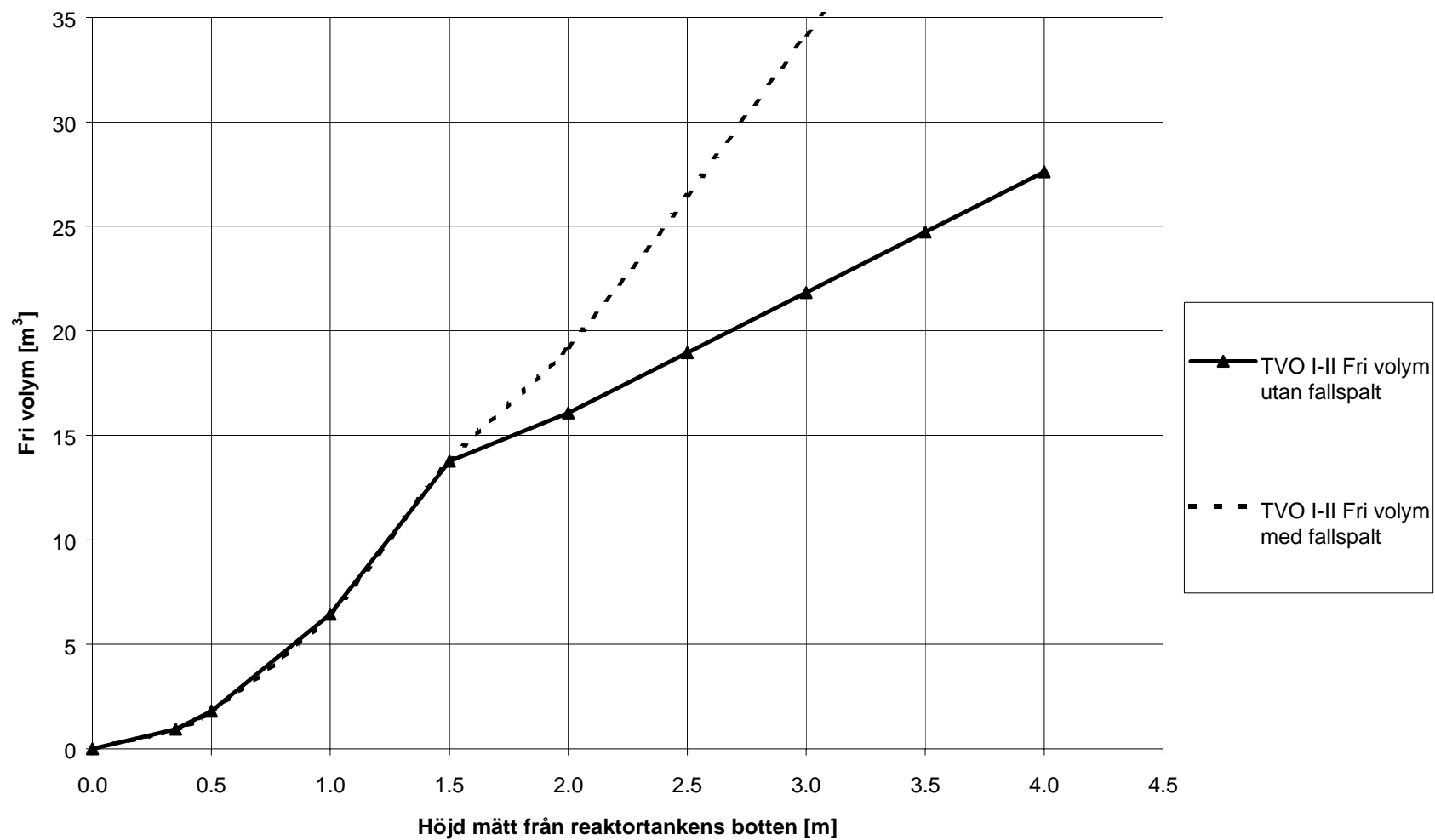
- Apr-99 APRI 3 Accident Phenomena of Risk Importance
Slutrapport. SKI Rapport 99:34
Juli 1999
- Din-97 ‘Melt Jet Attack of the Reactor Vessel Wall: Phenomena and Prediction method. T. N. Dinh et. al., Division of Nuclear Power Safety, Royal Institute of Technology, 100 44 Stockholm, Sweden sehgal@ne.kth.se. Eighth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NU-RETH-8) Kyoto, Japan, Sep 30 - Oct 4, 1997.
- Fre-86 Forsmark 1, 2 och 3 – Beräkningsmodell för kylning av “härmdälta”. Etapp 1. Asea Atom rapport.
Jan Fredell 1986-08-21.
- Gar-98 OECD, NEA; CSNI Workshop:
In-Vessel Core Debris Retention and Coolability
Workshop Proceedings
3-6 March 1998
Garching, Germany
- Grs-98 Potential for In-Vessel Melt Retention through Internal Cooling Mechanisms. K. Schaaf, C. Müller, K. Trambauer
GRS mbH, 1998. <http://www.grs.de/fg98/fg98saa.htm>
- Ham-93 Probabilistic Safety Assessment International Topical Meeting, Clearwater Beach, Florida, January 26-29, 1993.
Experiment to address lower plenum response under severe accident conditions
R. J. Hammersley, et. al., Fauske & Associates, Inc. 16WO70
West 83rd Street, Burr Ridge, IL 60521
- Lin-97 On Core Debris Behaviour in the Pressure Vessel Lower Head of Nordic Boiling Water Reactors. I. Lindholm, et. al.
NKS/RAK-2 (97)TR-A4.
- Lin-99 Some notes on heat transfer and coolability of hot particle beds. I. Lindholm and K. Ikonen
VTT Energy, Technical Report MOSES 2/99
12th April 1999
- Lin-00-1 Core debris fragmentation by jet break-up during fall-through in a deep water pool. VTT Energy Report 10/2000.
I. Lindholm, , June 2000

- Lin-00-2 A review of dryout heat fluxes and coolability of particle beds. VTT Energy Research Report ENE4/29/2000. I. Lindholm, Nov 23, 2000
- Ram-89 Handbok över haveriförlopp i svenska reaktorer. Slutrapport från RAMA III. Rapport RAMA-III 89-01
Erik Söderman et. al.
December 1989
- Ram-91 Containment severe Accident Thermohydraulic Phenomena. RAMA III Final Report, Rapport RAMA-III 89-04
Wiktor Frid, SKI
August 1991
- San-93 Late-Phase Melt Progression Experiment: MP-2, Results and Analysis. NUREG/CR-6167, SAND93-3931
R.D. Gasser, R.O. Gauntt, S.C. Bourcier, R.C. Schmidt, L.L. Humphries, K.O. Reil, May 1997
- San-97 Final Results of the XR2-1 BWR Metallic Melt Relocation Experiment NUREG/CR-6527, SAND97-1039, R.O. Gauntt, L.L. Humphries, August 1997
- Seh-98 Experiments and Analyses on Melt-Structure-Water Interactions During Severe Accidents. SKI Report 98:21,
B. R. Sehgal et. al.
April 1998
- Seh-99 Accomplishments and challenges of the severe accident research. B.R. Sehgal, Division of Nuclear Power Safety, Royal Institute of Technology, 100 44 Stockholm, Sweden
sehgal@ne.kth.se. Ninth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9) San Francisco, California, October 3 - 8, 1999.
- Stö-87 Handbok över processamband vid störningar i svenska kokarreaktorer. Internpumpsanläggningar. AB Asea Atom och ES-konsult AB på uppdrag av SKI
Juli 1987
- Tmi-94 TMI-2 Vessel Investigation Project Integration Report. NUREG/CR-6197. INEL, R.J. Wolf et.al.
March 1994.

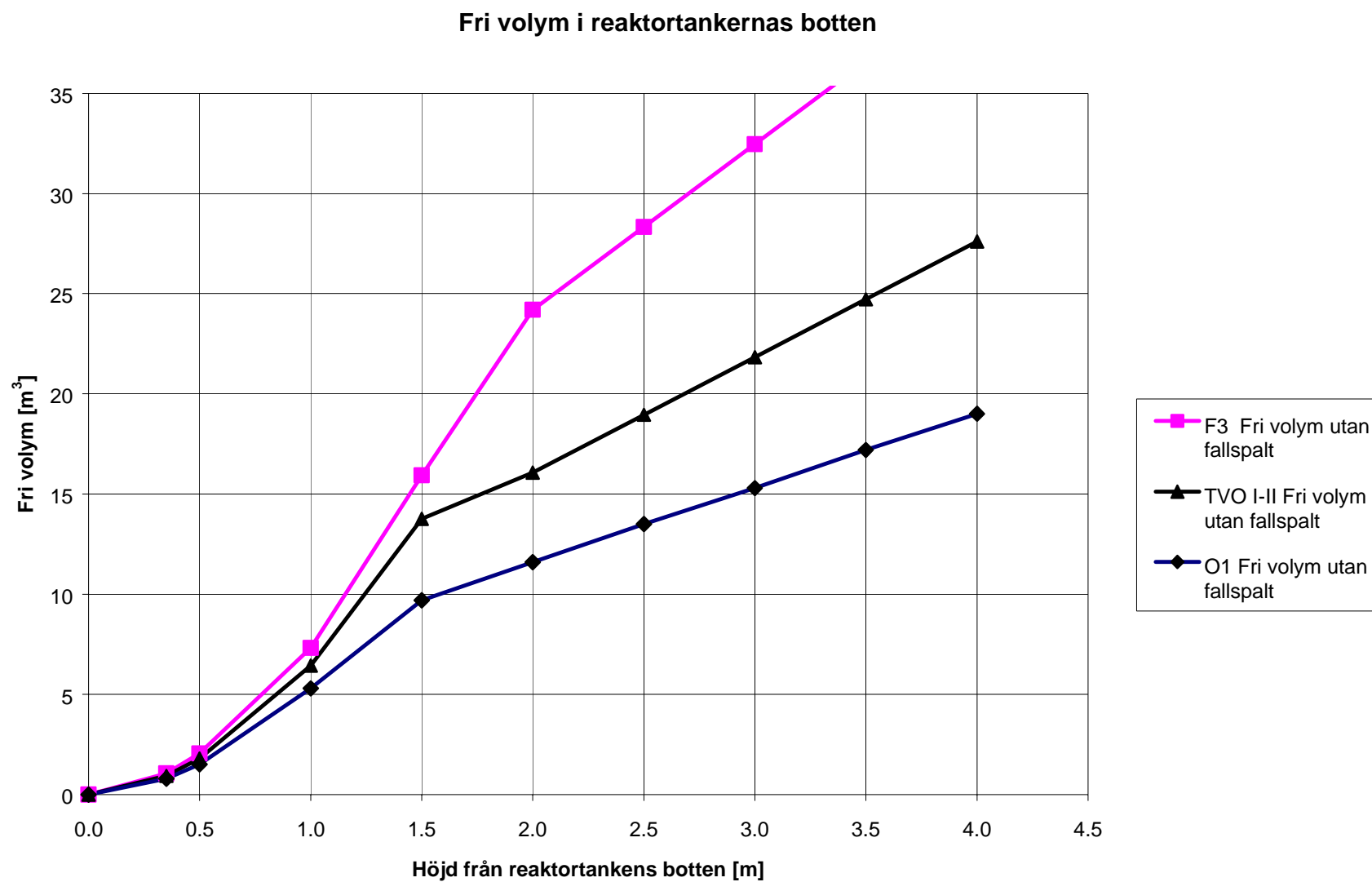


Figur 1. Möjlig fri volym för härdrer i reaktortankens botten. (Illustration för Figur 2.)

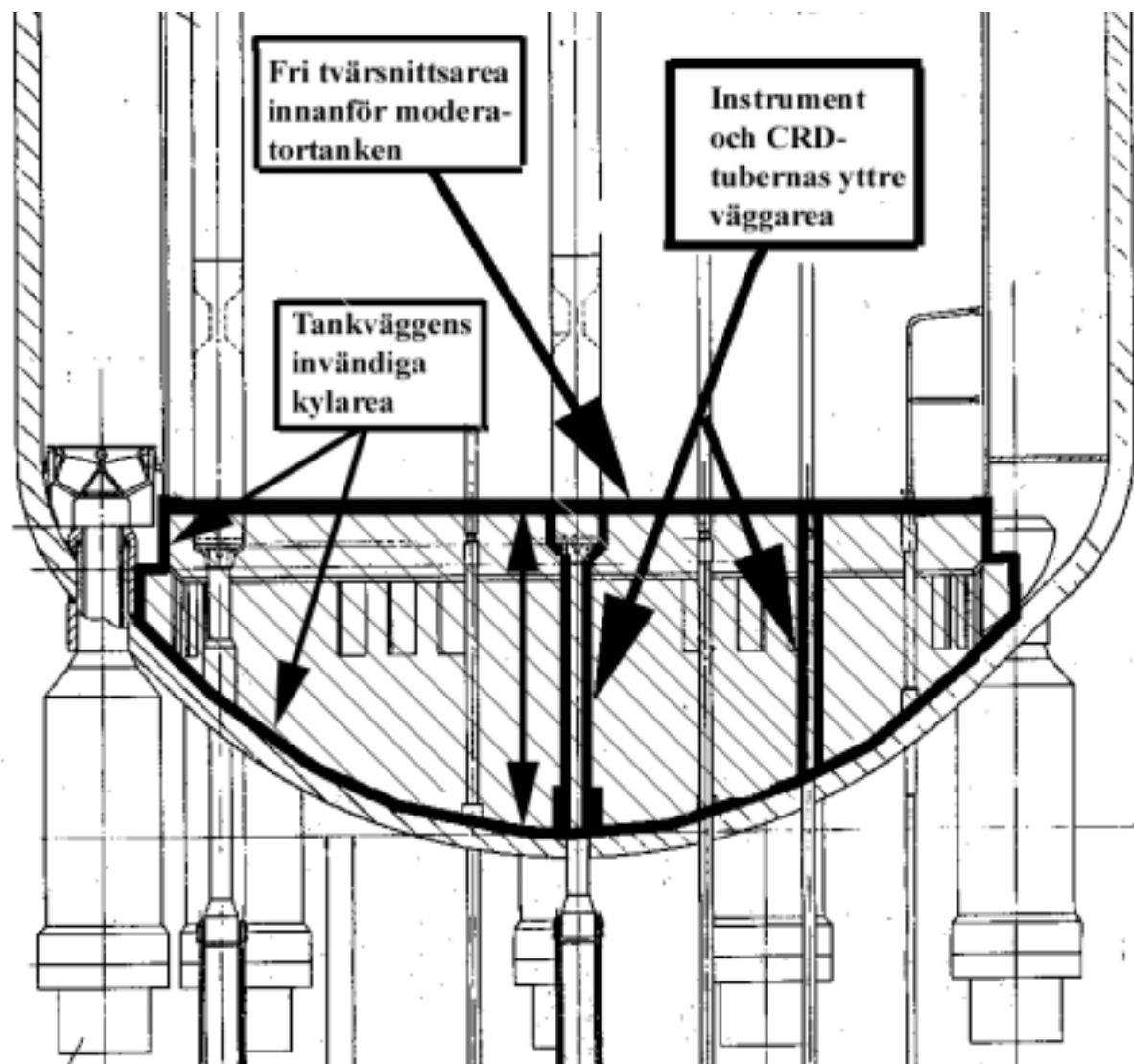
TVO 1&2 Fri volym i reaktortankens botten



Figur 2. TVO 1&2. Beräkning av fri volym i reaktortankens botten, som funktion av höjden.

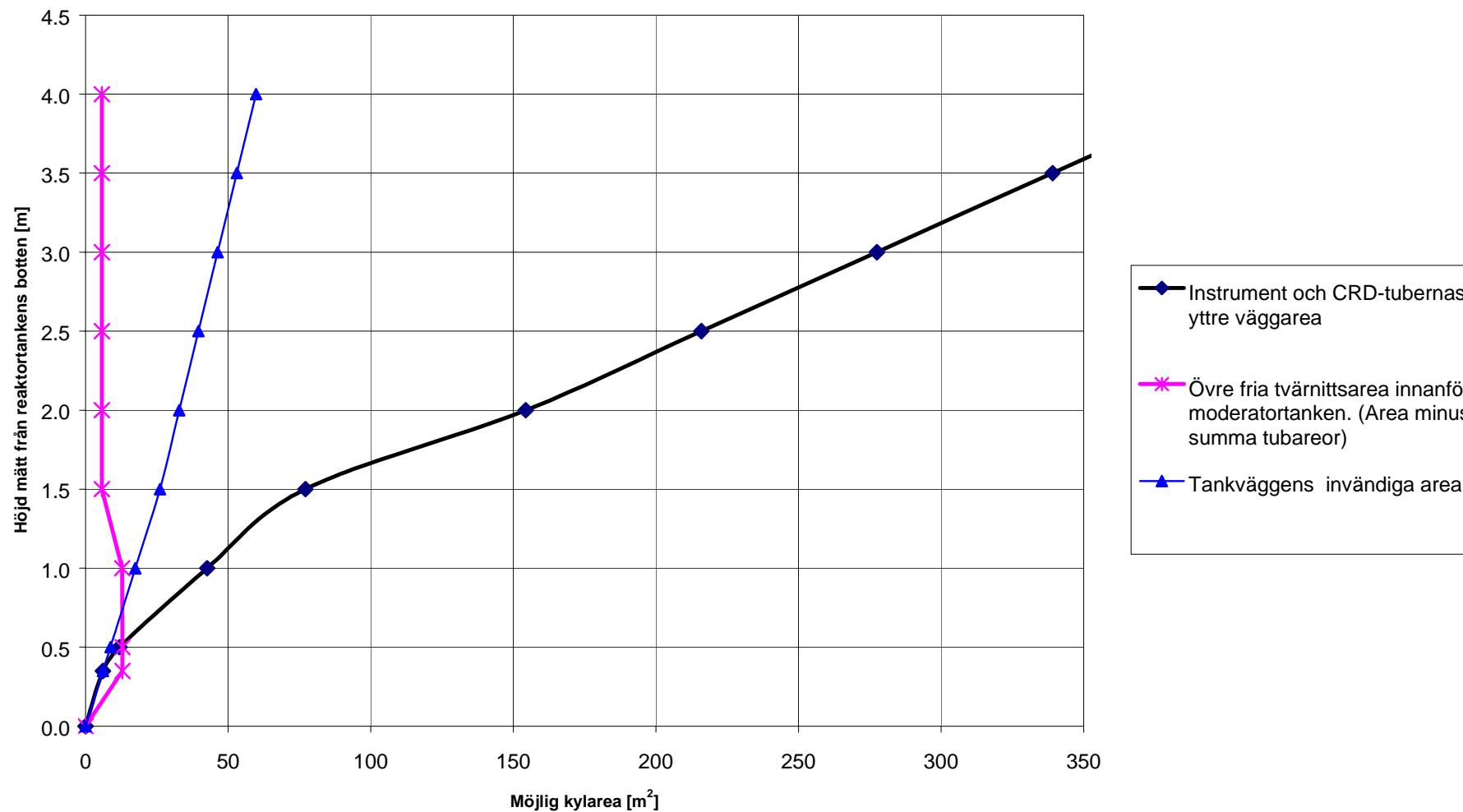


Figur 3. O1, TVO 1&2 och F3/O3. Beräkning av fri volym i reaktortankens botten, som funktion av höjden.

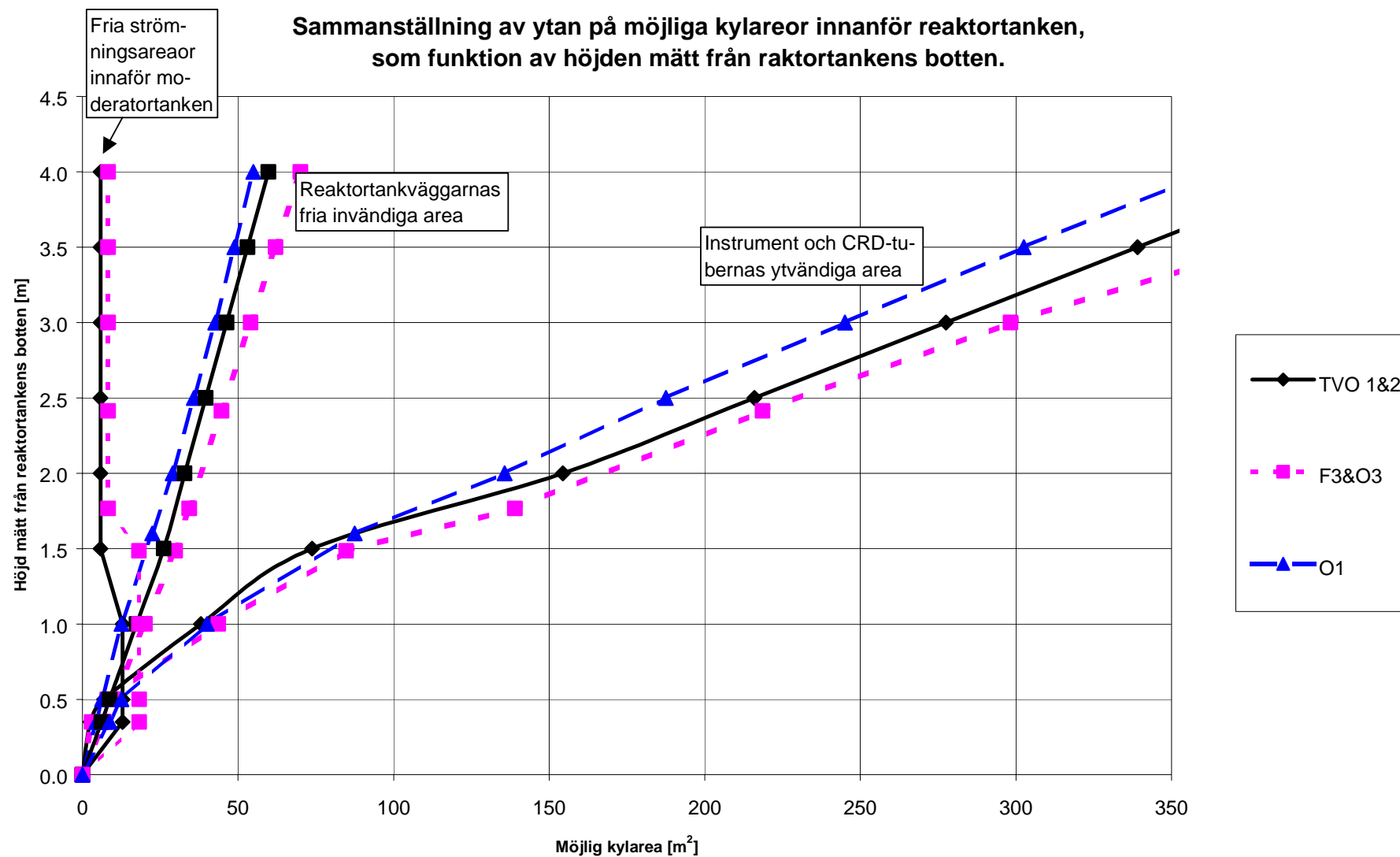


Figur 4. Beräkning av möjliga kylareor i reaktortankens botten. (Illustrationer för Figur 5)

TVO 1 & 2 Sammanställning av ytan på möjliga kylareor innanför reaktortanken, som funktion av höjden mätt från reaktortankens botten

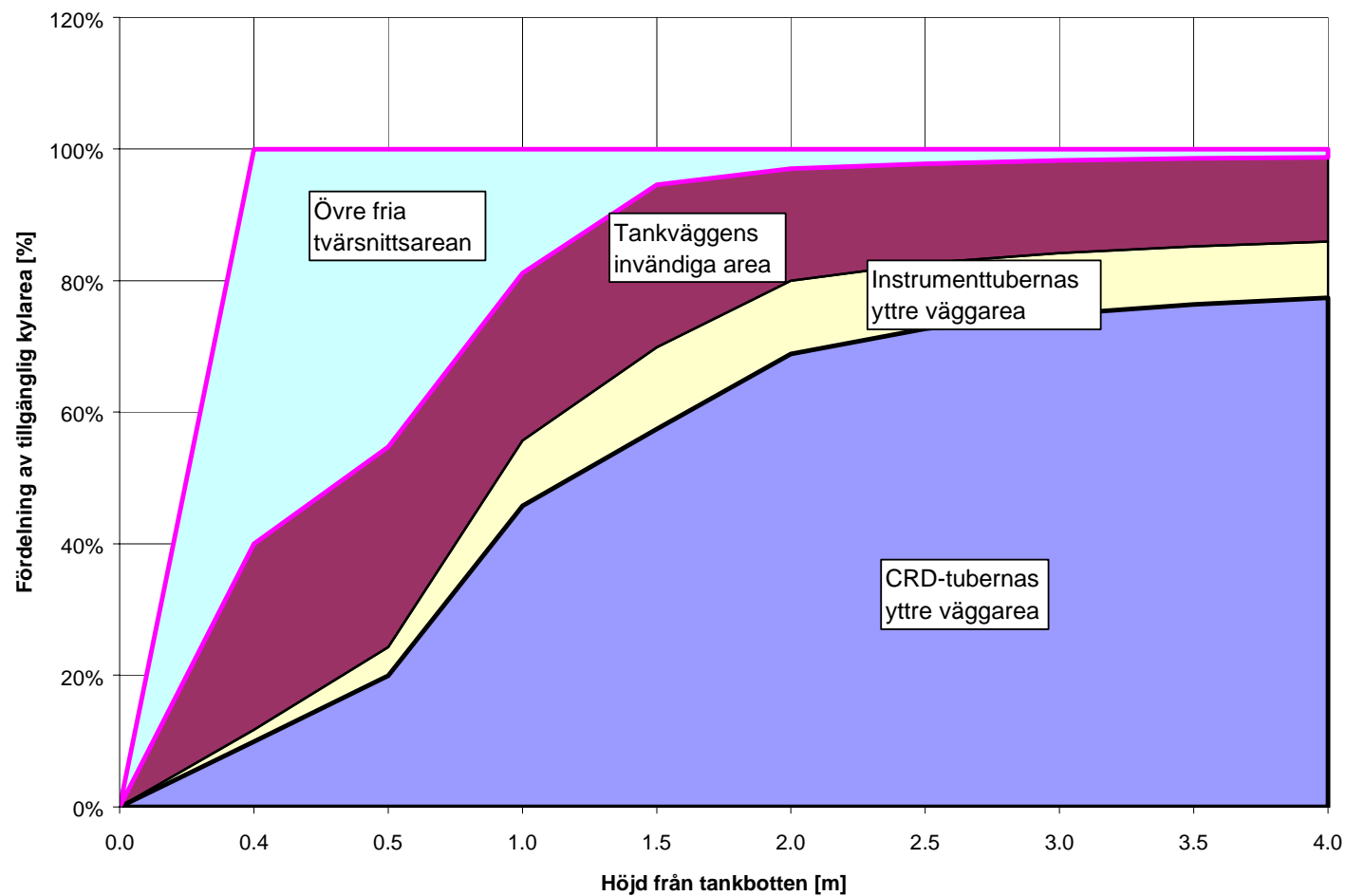


Figur 5. TVO 1&2. Möjliga kylareor i reaktortankens botten som funktion av höjden.



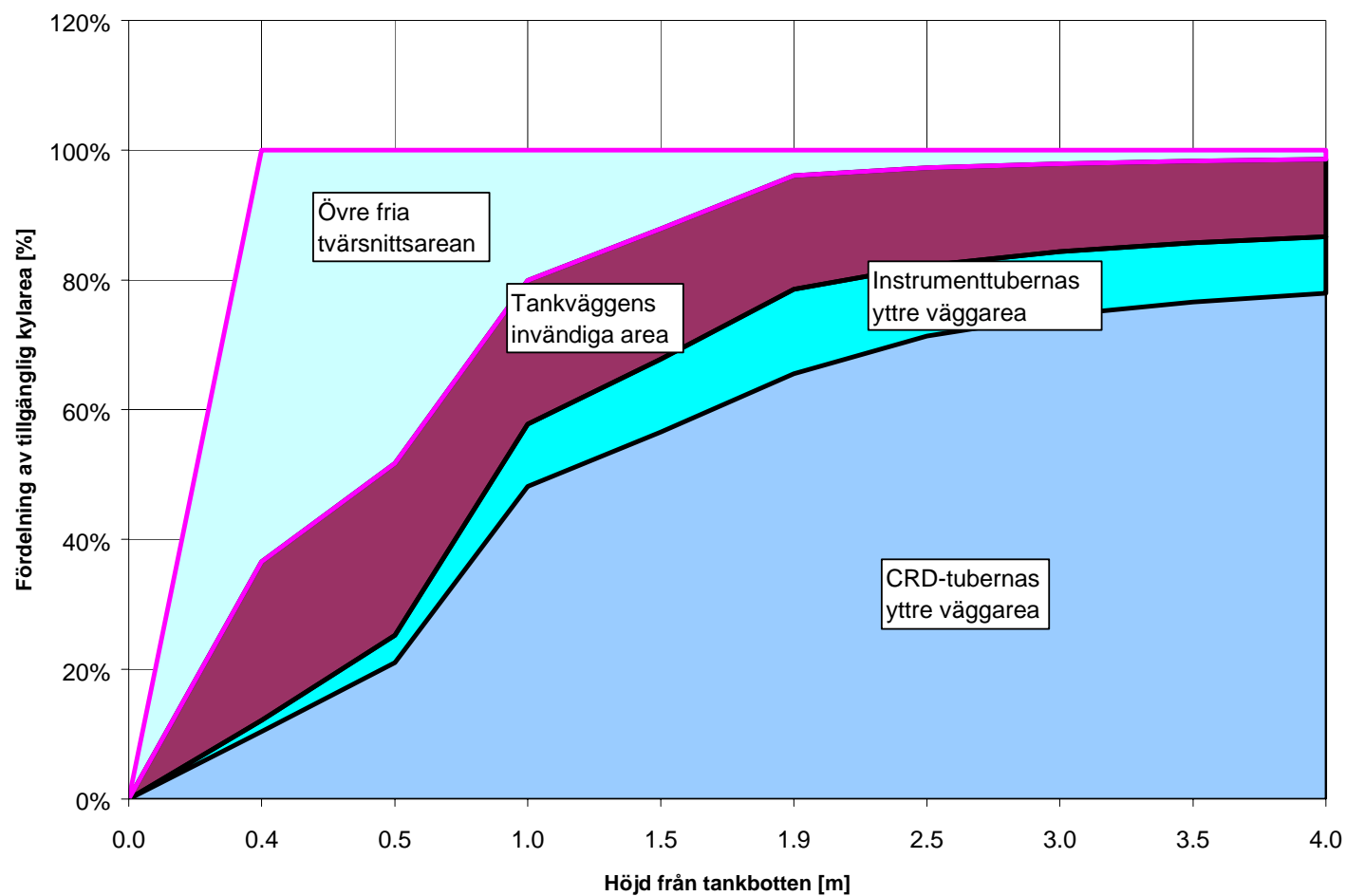
Figur 6. O1, TVO 1&2 och F3/O3. Möjliga kylareor i reaktortankens botten som funktion av höjden.

TVO 1&2. Procentuell fördelningen av möjlig kylarea innaför reaktortanken, som funtion av höjden från tankbotten.

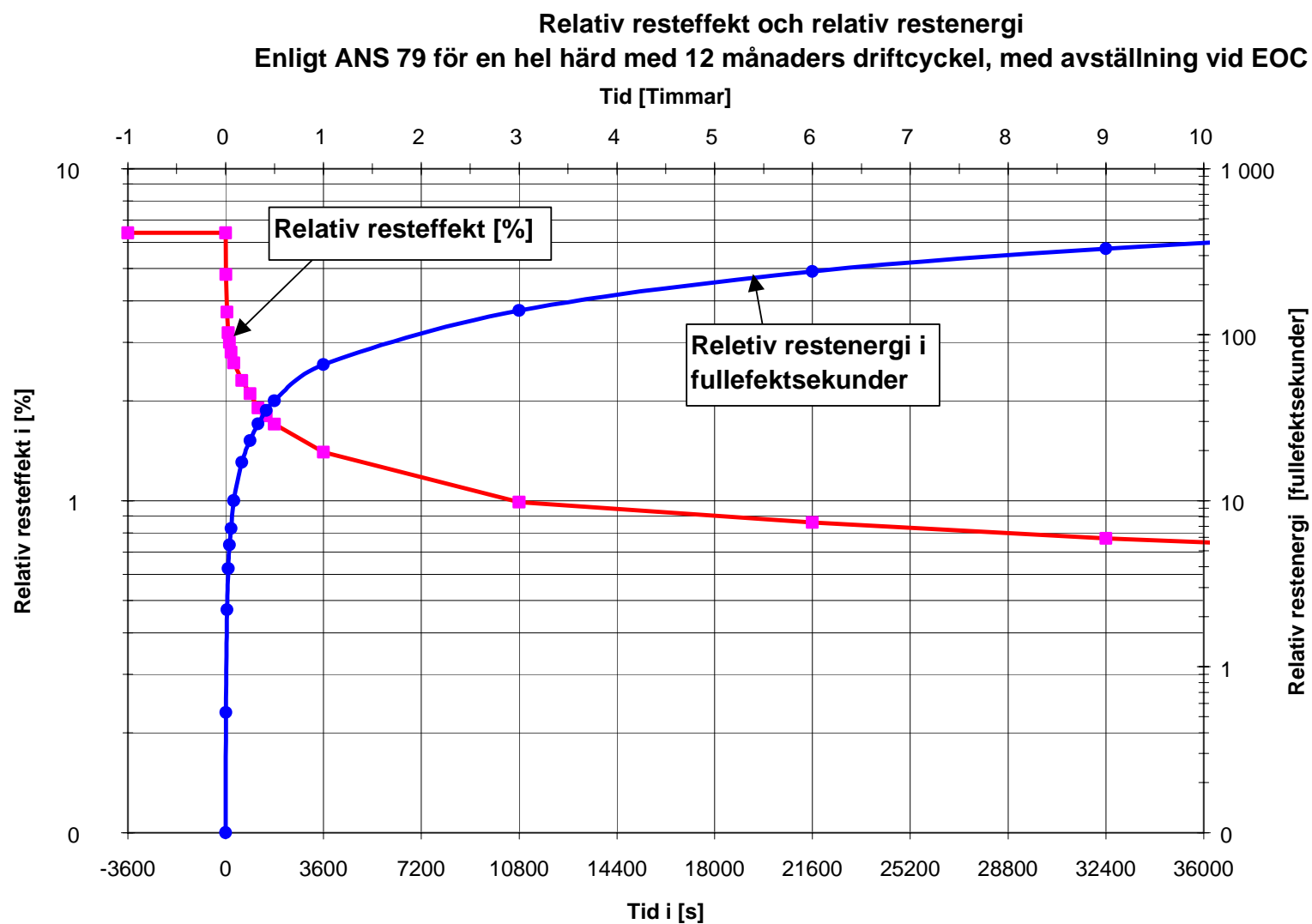


Figur 7. TVO 1&2. Procentuell fördelning av möjliga kylareor i reaktortankens botten som funktion av höjden.

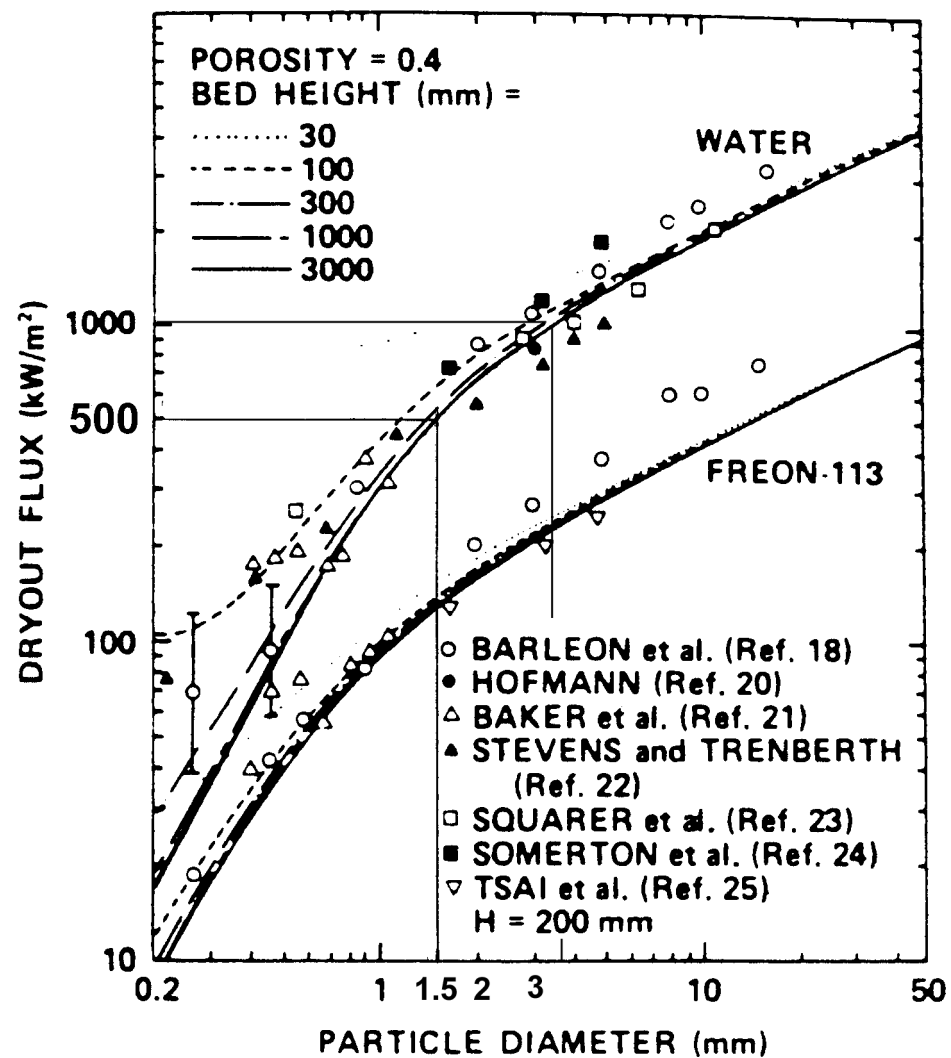
F3 - O3. Procentuell fördelningen av möjlig kylarea innaför reaktortanken, som funtion av höjden från tankbotten.



Figur 8. F3/O3 Procentuell fördelning av möjliga kylareor i reaktortankens botten som funktion av höjden.

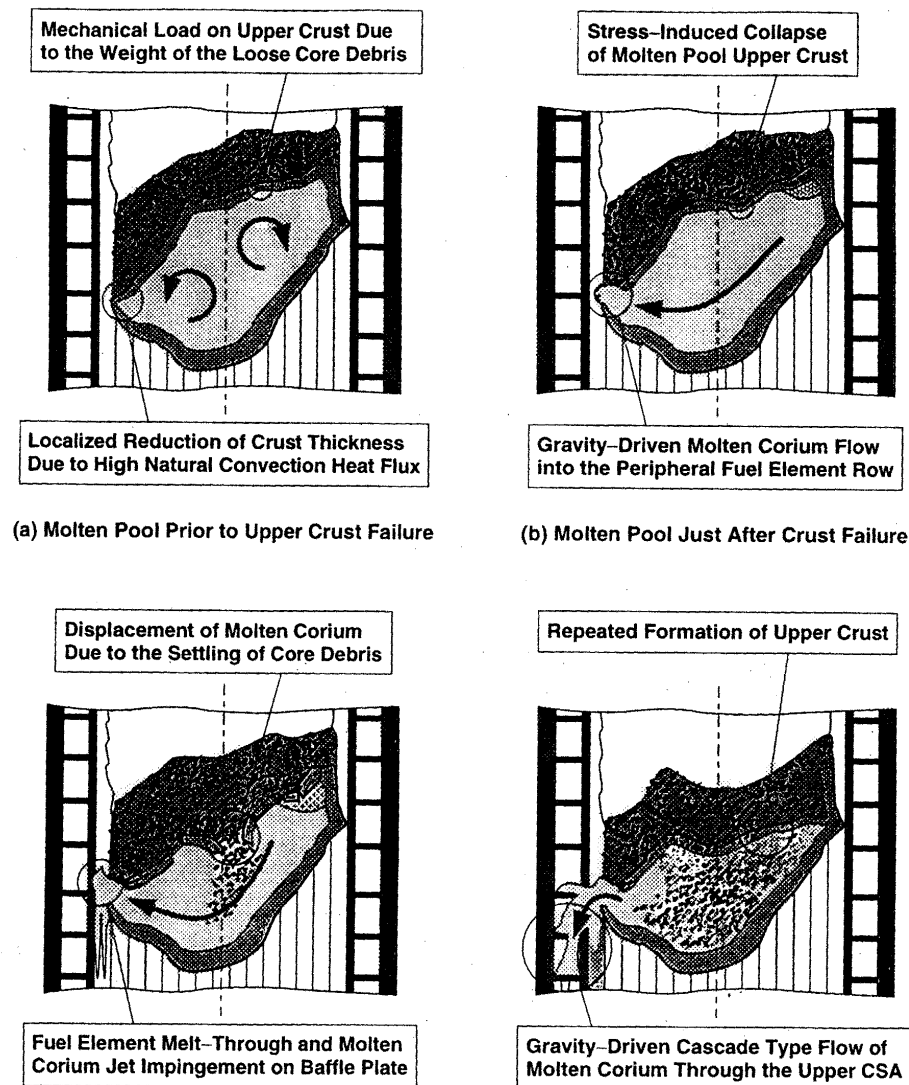


Figur 9. Utdrag ur ref. Stö-87. Relativ resteffekt och relativ restenergi som funktion av tiden.

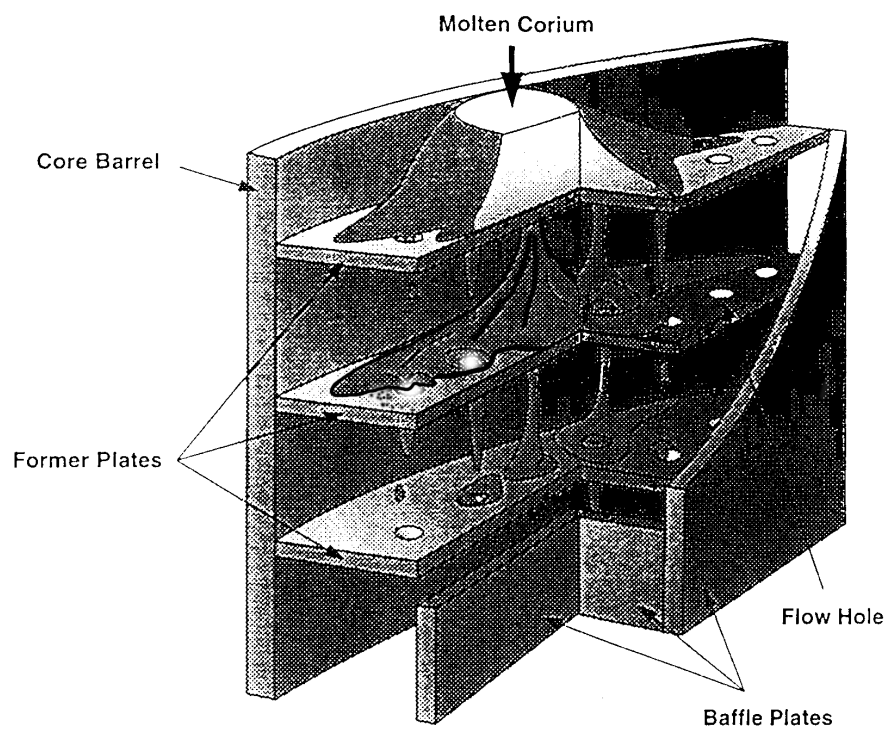


Dryout heat flux versus particle diameter.

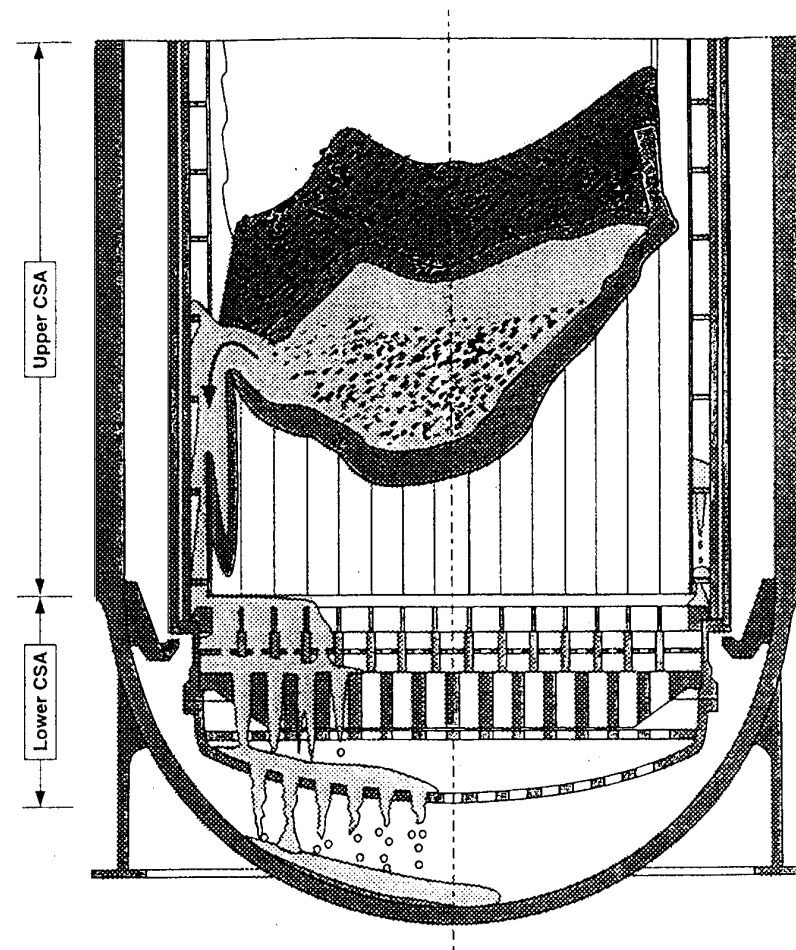
Figur 10. Utdrag ur ref. Lip-84. "Dryout heat flux versus particle diameter".



Figur 11. Utdrag ur ref. Gar-98. "Hypothesized scenario of TMI-2 molten pool failure and corium relocation"

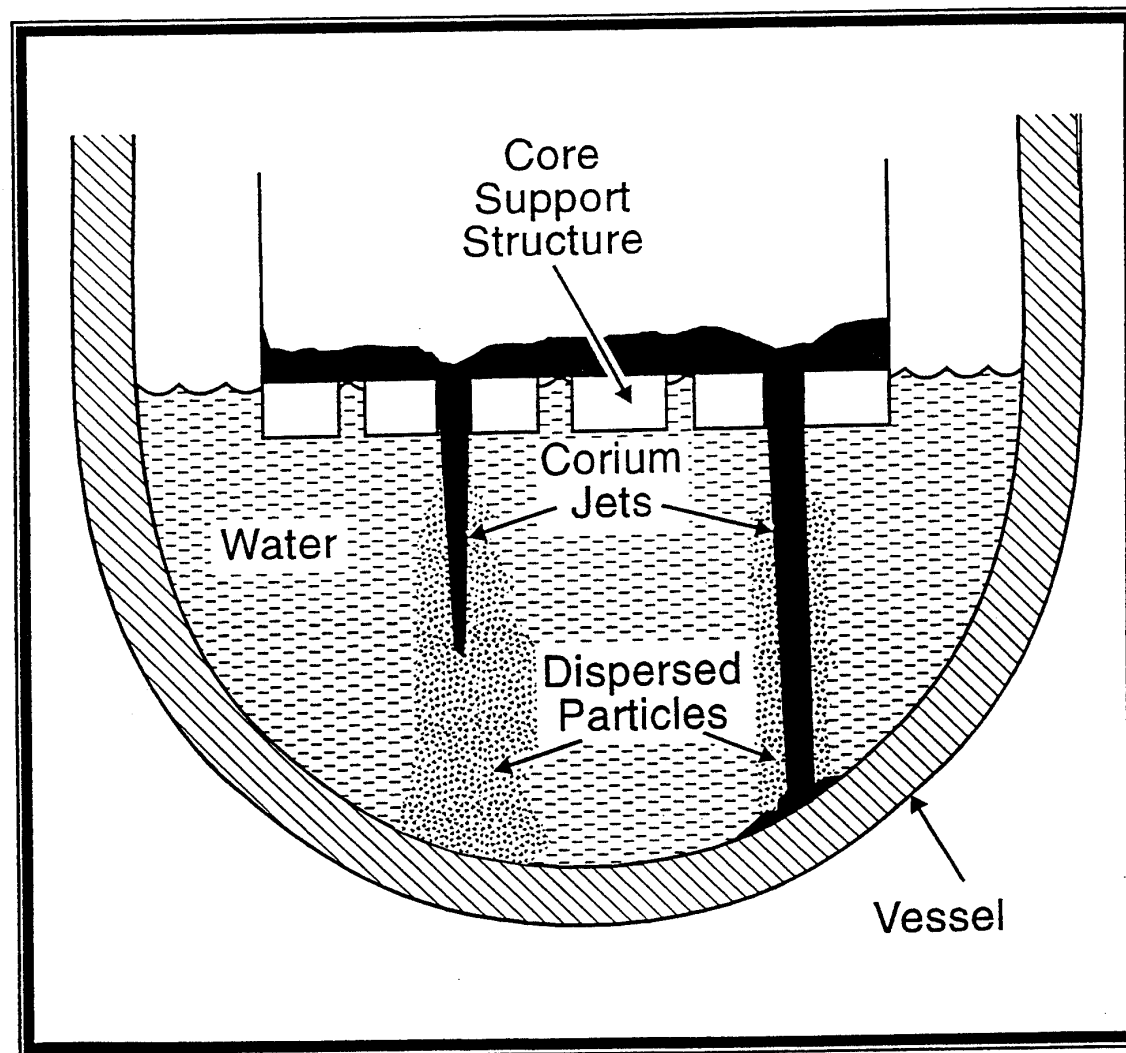


"Molten corium flow through the upper core support assemblies"

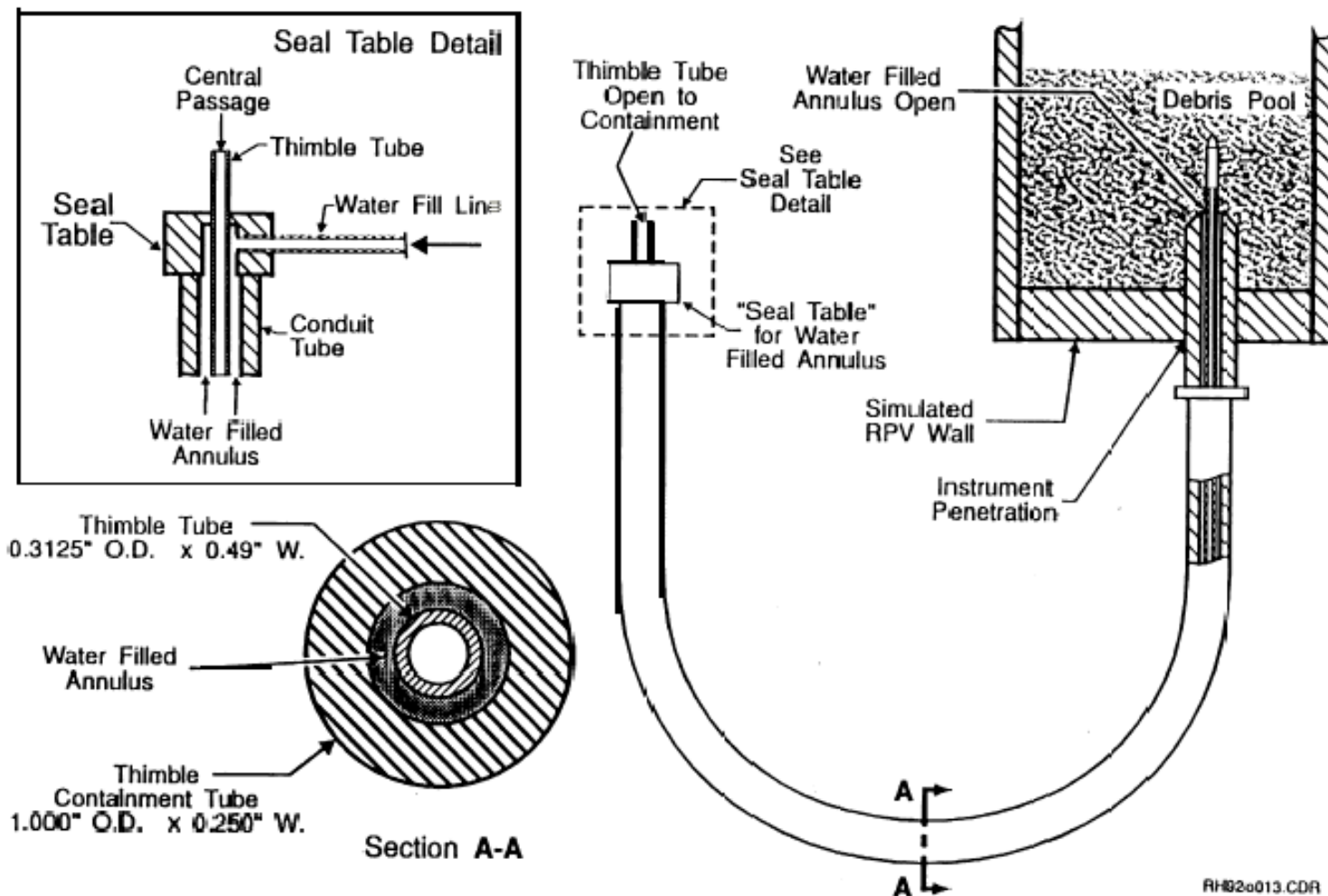


Molten corium flow through the upper and lower core support assemblies

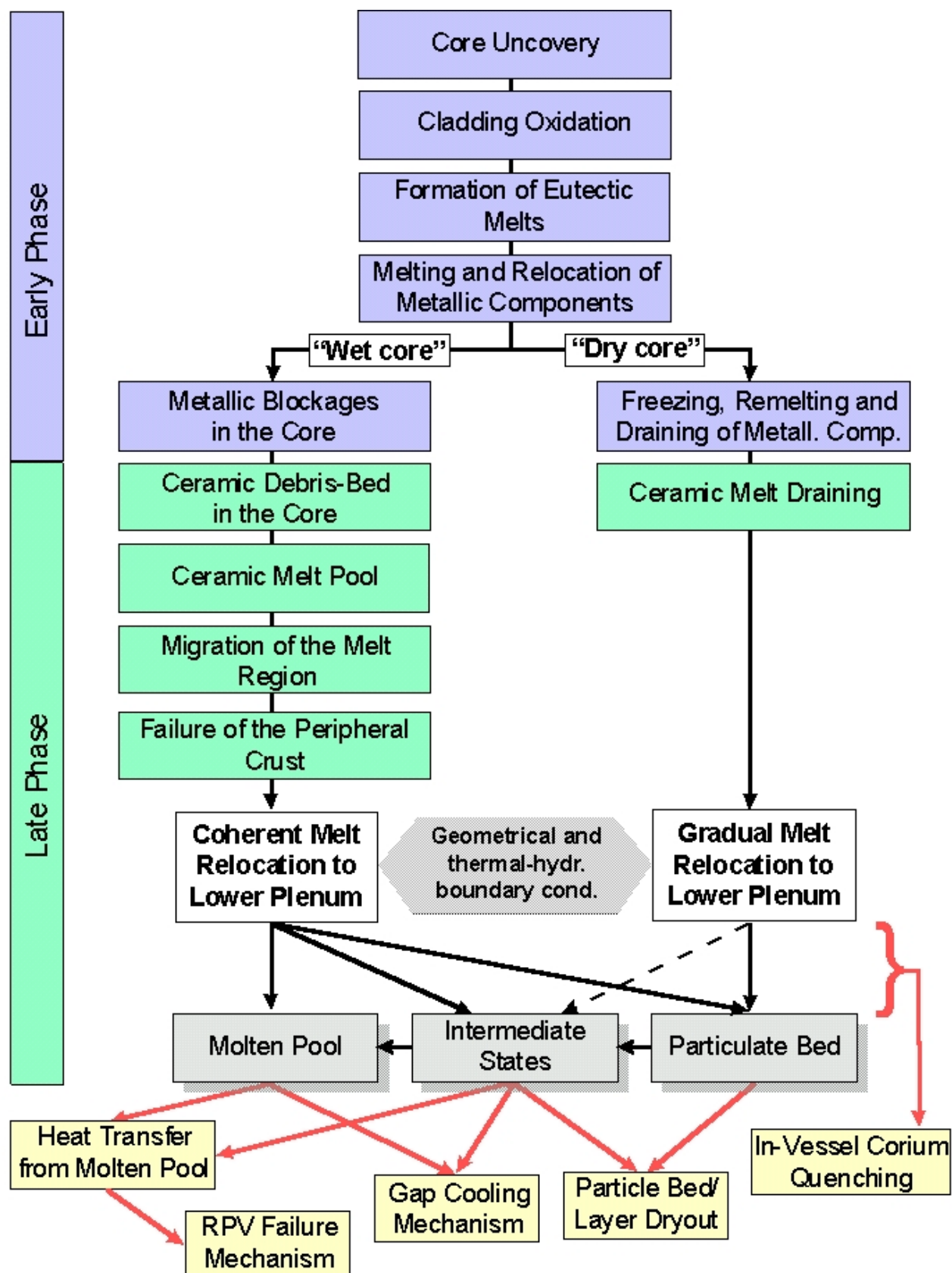
Figur 12. Utdrag ur ref. Gar-98. "Sketch of hypothesized scenario of TMI-2 molten corium flow through the upper and lower core support assemblies"



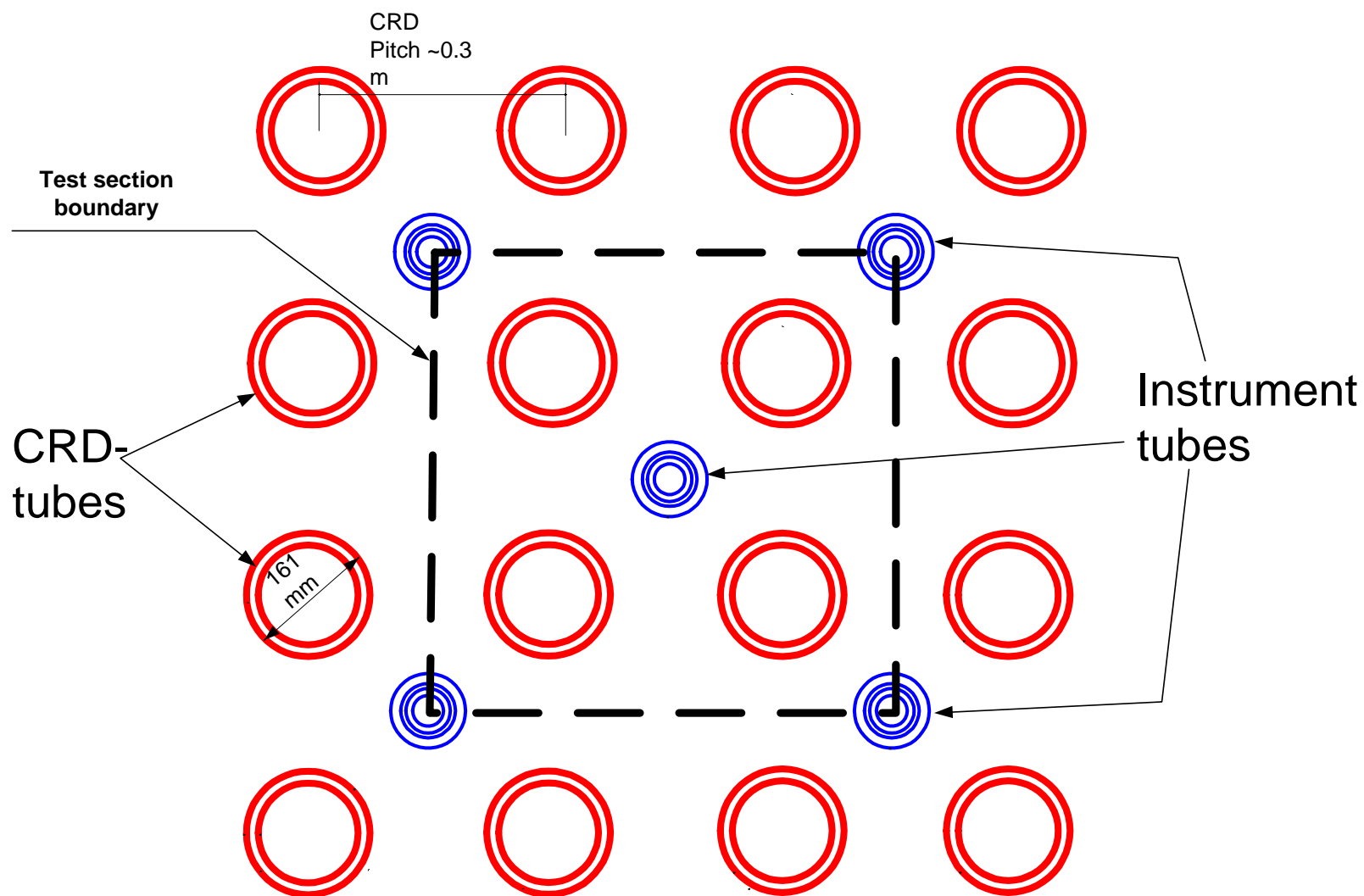
Figur 13. Utdrag ur ref. Lin-97. "MAAP 4 models of relocation of melt from core to lower plenum."



Figur 14. Utdrag ur ref. Ham-93. Försöksanordning vid test av en genomföring.



Figur 15. Utdrag ur ref. Grs-99. Sammanfattning a Försöksanordning vid test av en genomföring.



Figur 16. Möjlig testarrangemang för undersökning av strukturernas påverkan på kylbarheten av en partikelbädd.