

## Reproducción con TRACE de un LOCA de tamaño intermedio en la instalación experimental PKL

D. Blanco<sup>1</sup>, C. Berna<sup>1</sup>, A. Escrivá<sup>1</sup>, J.L. Muñoz-Cobo<sup>1</sup>, M. Sanchez<sup>2</sup> & J. Perez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería Energética  
Universitat Politècnica de València

Camino de Vera 14, 46022 Valencia (España)

Tel.: 0034-963879245, Fax: 0034-963877639, Email: [dablade@upv.es](mailto:dablade@upv.es)

<sup>2</sup>Consejo de Seguridad Nuclear

Calle Pedro Justo Dorado Dellmans 11, 28040 Madrid (España)

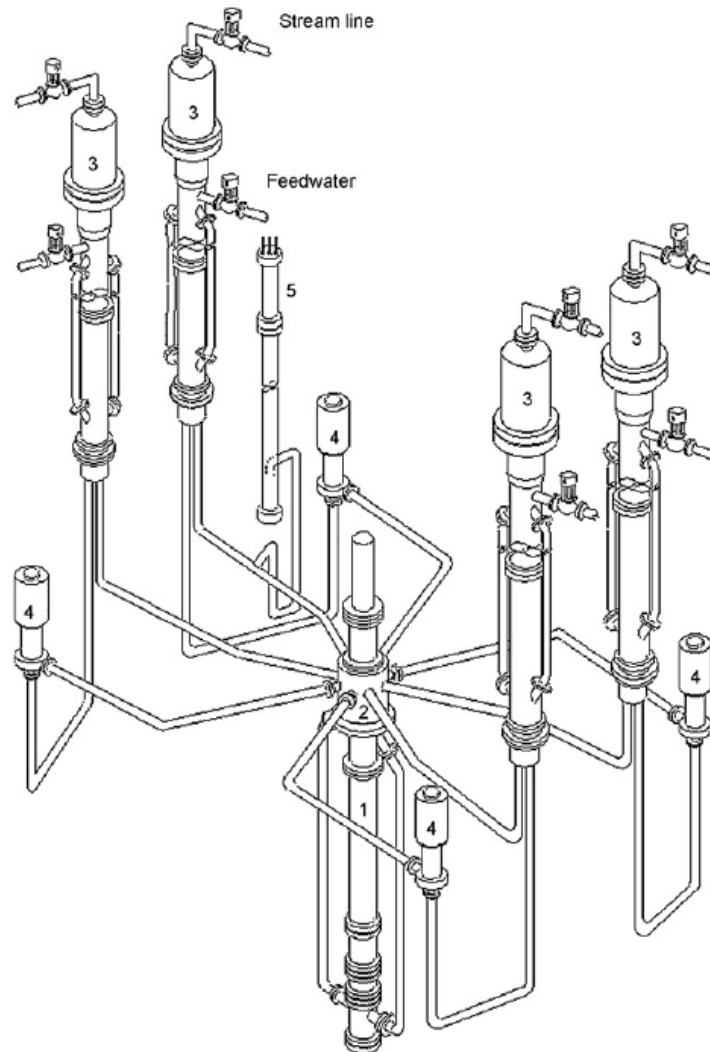
**Resumen** – El desarrollo de códigos termo-hidráulicos lleva muchos años avanzando debido a los esfuerzos invertidos en ellos. Mediante ellos, se reproduce el comportamiento ante accidentes y transitorios en reactores consiguiendo unos resultados cada vez más próximos a la realidad. Acuerdos entre la NRC y el CSN en el área de investigación en seguridad nuclear han dado como resultado el acceso del CSN a los códigos best-estimate en fase de desarrollo de la NRC, como el código TRACE.

Con la previsión del uso del código TRACE en un futuro próximo para las simulaciones efectuadas en las actuales centrales nucleares, se están realizando numerosas series experimentales en diferentes instalaciones a escala de una planta comercial, que permiten obtener y comparar resultados reales para evaluar la capacidad del código. Este es el caso de PKL4, una instalación experimental a escala de un reactor comercial PWR de 1300MWe.

Se ha llevado a cabo la simulación de un caso de pérdida de refrigerante por un orificio de tamaño intermedio (IBLOCA). El transitorio replica la reproducción de una rotura situada en la rama fría del lazo uno de la instalación, y tiene un tamaño del 17% respecto a esta. Los eventos que se producen debido a esta situación, tales como la activación de sistemas auxiliares de inyección de refrigerante, parada de bombas o decaimiento de potencia del núcleo, vienen dados a consecuencia de la despresurización en el circuito primario. Los resultados presentados en esta ponencia completan la simulación del transitorio y el análisis post-test de estos se centra en la comparación con las medidas reales. Con el presente trabajo, se contribuye a la evolución del código TRACE, constituyendo un paso hacia delante más en el testeo de sus capacidades.

### 1. INSTALACIÓN PKL

La planta experimental PKL (Figura 1) se utiliza para la investigación del comportamiento del sistema termohidráulico bajo situaciones de accidentes, tanto con como sin pérdida de refrigerante. Es una instalación basada en un reactor comercial de la clase PWR de 1300MW en la que se distingue la totalidad del sistema primario, con los cuatro lazos, y las partes esenciales del circuito secundario. Todas las elevaciones de la instalación corresponden a las dimensiones reales del reactor debido a la importancia de la gravedad durante los accidentes. El volumen total y el factor de escala de potencia es 1:145. Con el fin de tener en cuenta todos los fenómenos importantes en las ramas calientes, tales como la separación del flujo y las limitaciones por el flujo a contracorriente, en el diseño de las bases de las ramas calientes se ha conservado el número de Froude. También han sido considerados en su diseño los resultados de los experimentos llevados a cabo en la instalación experimental UPTF, cuya escala es 1:1.



**Figura 1. Esquema de la Instalación Integral PKL: (1) Vasija del Reactor; (2) Downcomer; (3) Generadores de Vapor; (4) Bombas; (5) Presionador. Escalado: Volumen 1:145 y Elevaciones 1:1; Potencia máxima 2.5 MW.**

## 2. TEST I2.2 RUN 3

El test reproducido en la instalación PKL denominado i2.2 es de tipo IBLOCA, con la rotura localizada en una de las ramas frías del lazo 1 teniendo un tamaño del 17%.

En este transitorio se activan los principales sistemas de inyección de refrigerante de emergencia. Las bombas de inyección de alta presión (sistema HPI), las de baja presión (LPI) y la descarga de los acumuladores situados en las ramas frías serán los puntos más relevantes de la secuencia de eventos.

El transitorio se inicia en unas condiciones iniciales parejas a las que se encontraba la instalación tras la toma de datos de las medidas experimentales de los test.

Se ajustan los niveles en el núcleo, en el presionador y en los acumuladores, así como la presión en el primario y la potencia del núcleo. El modelo elaborado en TRACE estabiliza estos parámetros y mantiene el estado estacionario durante 4000s. Tras este periodo de tiempo se simula la rotura y comienza el transitorio.

El inicio del test lo origina el comienzo de la pérdida de refrigerante por la rotura, que en este caso supone la apertura de la válvula de la rama de descarga. Tras este suceso, los calentadores del presionador paran su funcionamiento, así como las bombas dando paso al cierre de sus válvulas de mariposa. Se activan los sistemas de alimentación de emergencia, en primer lugar el HPI, además de producirse de la caída de potencia del reactor. Los tanques de inyección de refrigerante se descargan unos segundos más tarde y, tras un tiempo, el último sistema de inyección que se activa es el LPI.

**Tabla 1. Secuencia de eventos del test i2.2 run 3.**

Evento
Rotura (Inicio)
Apagado de los calentadores del presionador
Parada de la bomba de Feedwater
Cierre de las válvulas de la línea de vapor del lazo 3, aislamiento del generador de vapor 3
Cierre de las válvulas de la línea de vapor del lazo 4, aislamiento del generador de vapor 4
Inicio del paro de las bombas de recirculación
Cierre de las válvulas de la línea de vapor del lazo 2, aislamiento del generador de vapor 2
Cierre de las válvulas de la línea de vapor del lazo 1, aislamiento del generador de vapor 1
Parada completa de las bombas de recirculación
Cierre de las válvulas de mariposa de las bombas
Activación del sistema HPSI en los lazos 2 y 3 ( $P_{\text{prim}} < 32\text{bar}$ )
Inyección de los acumuladores en las ramas frías de los lazos 2 y 3 ( $P_{\text{prim}} < 16.8\text{bar}$ )
Activación del sistema LPSI en los lazos 2 y 3 ( $P_{\text{prim}} < 6.7\text{bar}$ )

### 3. MODELADO CON TRACE.

El objetivo de este trabajo es comparar los resultados experimentales con las predicciones realizadas mediante el código de simulación SNAP-TRACE. Para ello se dispone de un modelo de la instalación experimental PKL.

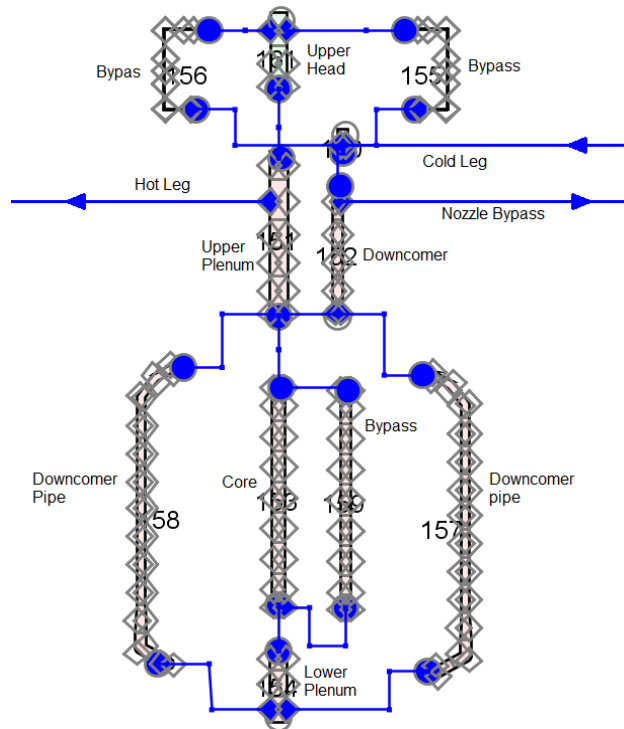
#### 3.1. Modelo utilizado y modificaciones realizadas.

El análisis post-test ha supuesto la revisión y modificación de varios aspectos en el modelo utilizado en el test ciego, realizado previamente. Para llegar a este punto, se tiene en cuenta que la preparación del modelo para la ejecución del test ciego ha dado resultados con una margen de mejora que se pretende reducir.

Las actualizaciones adicionales más importantes, a las ya realizadas para la ejecución del pre-test, constan de un reajuste de la geometría de los componentes de la vasija, así como de las ramas calientes y sellos de las bombas. Además, se han incluido los nuevos baipases del downcomer y se han ajustado las caídas de presión nuevamente. Este último paso, ha requerido de un testeo completo de todos los elementos termohidráulicos del modelo, actualizando los coeficientes de pérdidas K de cada unión, así como la revisión de los parámetros característicos de las bombas, tales como las curvas homólogas.

Inicialmente se ha llevado a cabo la actualización geométrica de los elementos de la vasija (Figura 2). Algunos elementos diferían ligeramente de su volumen real, lo que ha llevado a ajustar las dimensiones para reducir su error al mínimo posible.

Con la misma configuración del componente, se han obtenido unos volúmenes muy ajustados a la geometría real.



**Figura 2. Esquema de la nodalización de la vasija de PKL y volúmenes de los elementos incluidos.**

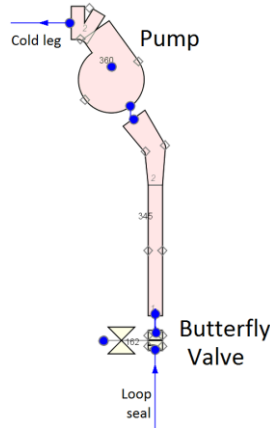
Otros ajustes de componentes termohidráulicos se centran en conseguir un modelo de más precisión geométrica. Algunos de los elementos afectados son las ramas calientes y los sellos de las bombas, donde podíamos encontrar ángulos o codos que no se correspondían con los de la planta real.

El funcionamiento de la bomba también requería un ajuste. Tras observar los resultados del pre-test y enfrentar las caídas de presión en estado estacionario respecto a las medidas en la instalación real, se determinó necesario revisar las características de la bomba, así como sus curvas homólogas. Durante este proceso se ajustaron algunas desviaciones en las pérdidas a lo largo del circuito primario, lo que se realizó mediante el necesario reajuste de los coeficientes K, llevando a cabo un tedioso proceso iterativo.

Respecto a la estructura del circuito primario en la zona de las bombas, se han recolocado las válvulas de mariposa a su posición precisa respecto a este elemento (Figura 3), según aparece en la información de la instalación.

A partir de las actualizaciones pertinentes y mejoras realizadas, la puesta a punto del modelo para la ejecución del test i2.2 run 3 pasa por un proceso de ajuste de pérdidas de presión que permita un comportamiento lo más cercano posible al de la instalación real. Este proceso se ha llevado a cabo obteniendo resultados con una buena precisión

En general, se ha logrado un mejor rendimiento del modelo TRACE, lo que nos permitirá realizar una ejecución del post-test con mejores resultados.



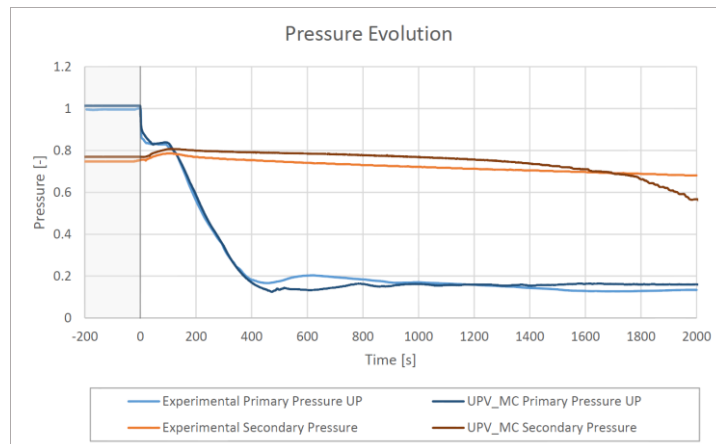
**Figura 3: Esquema de la nodalización de la bomba y válvula de mariposa.**

#### 4. RESULTADOS.

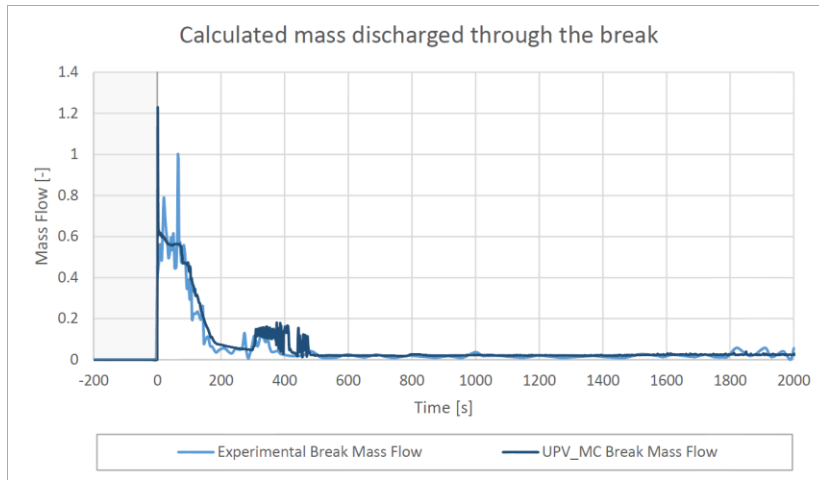
Tras llegar a un acondicionamiento adecuado para iniciar el test, se procede a la reproducción del transitorio. Las gráficas presentadas a continuación muestran los resultados obtenidos mediante el código TRACE. Estas graficas representan la evolución de la presión en el circuito primario y secundario, la descarga por la rotura, la inyección de los acumuladores y de los sistemas HPSI y LPSI y la evolución de las temperaturas de pico de vaina y de entrada en el núcleo.

Como comentario general, destacar que los resultados obtenidos en el test son satisfactorios. Después de realizar las mejoras explicadas en la sección anterior, se ha obtenido una buena aproximación en la evolución de los parámetros principales.

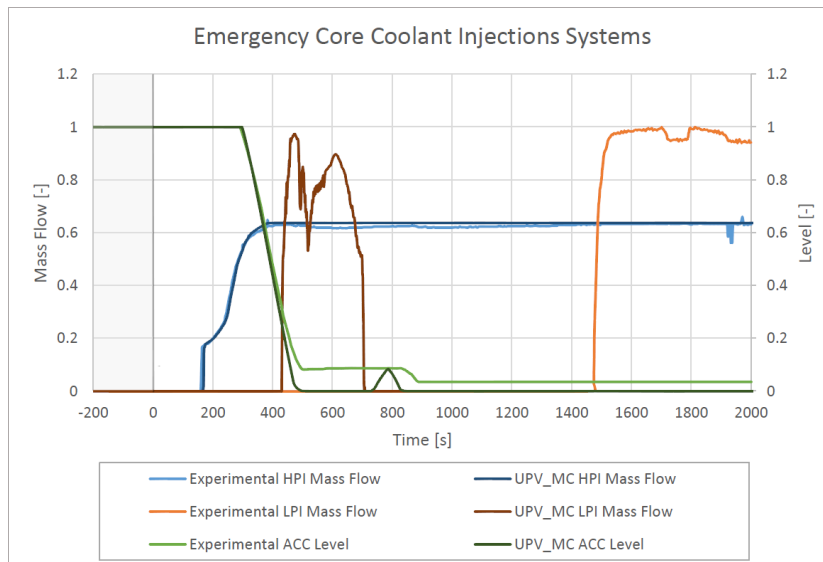
Se puede observar que las simulaciones obtenidas, se corresponden con los tiempos de manera bastante fiable, a excepción de la inyección del LPSI (Figura 7). Esta cuestión viene dada por una ligera variación de la presión en el circuito primario cuando se llega a una relativa estabilización, apreciable en la Figura 5 (datos normalizados respecto al valor máximo alcanzado en las medidas experimentales).



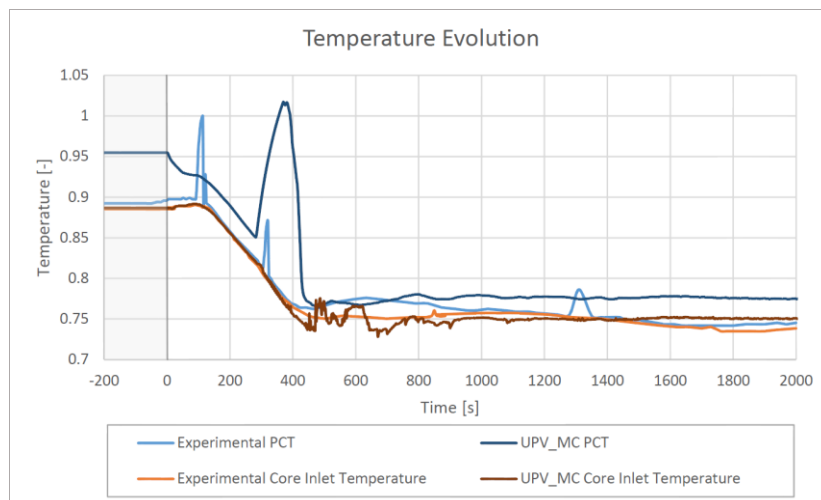
**Figura 5. Evolución de la presión en los circuitos primario y secundario.**



**Figura 6. Descarga calculada a través de la rotura.**



**Figura 7. Sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo.**



**Figura 8. Evolución de la temperatura de pico de la vaina y a la entrada del núcleo.**



Se puede apreciar como la evolución de la presión en la simulación tiene una gran similitud respecto a las medidas experimentales. En el primario, podemos ver cómo los resultados representan la caída inicial, causada por la rotura, de manera muy próxima al comportamiento de la instalación real. Al pasar los 400 segundos la presión de simulación en TRACE cae ligeramente por debajo de la de los datos de PKL. Este hecho es el que provoca una activación anticipada del sistema LPSI. Las diferencias entre los resultados obtenidos y los datos experimentales son pequeñas pero, como nos encontramos en un área muy sensible, esta pequeña diferencia tiene un efecto significativo en la activación de LPSI.

Para el lado secundario, la presión tiene un valor ligeramente mayor en la simulación TRACE que en los datos PKL, pero se ha alcanzado una evolución similar durante la mayor parte del tiempo.

La descarga de inventario de refrigerante se caracteriza por un alto flujo de masa inicial, tras este punto, hay una pequeña zona de fluctuación y una gran parte del test con una cantidad baja constante de fluido descargado. Podemos ver que las dos series de datos tienen una evolución similar. Existe un pico inicial de descarga de masa más alto y un comportamiento con menos fluctuaciones para los resultados de TRACE, pero la evolución se ajusta con precisión a los datos experimentales de PKL.

Los sistemas de inyección de refrigerante de núcleo de emergencia (ECC) actúan de manera dependiente a la presión del primario. Por parte del HPSI (inyección de seguridad a alta presión), podemos observar que el comportamiento de la simulación reproduce perfectamente la misma evolución que los datos experimentales y, de manera similar, la descarga de los acumuladores también alcanza una simulación precisa. Por otro lado, el sistema LPSI (inyección de seguridad de baja presión) muestra una activación anticipada, ya mencionada previamente, y una inyección final que no aparece en el tiempo de duración total del test. La dificultad para capturar el punto exacto de la inyección de LPSI proviene del hecho de que su punto de activación se encuentra en una zona de variación mínima de presión, encontrando una sensibilidad muy alta para sincronizar la activación del sistema, lo que produce estas discrepancias en el punto en que se produce el evento.

La temperatura de entrada del núcleo tiene un comportamiento similar desde el inicio de la prueba en ambos casos, la simulación TRACE y los datos experimentales PKL. Aparecen algunas diferencias tras la caída de temperatura inicial, apareciendo algunas fluctuaciones aceptables. En cuanto a la temperatura pico de vaina (PCT), hay que considerar que es un parámetro muy difícil de simular. En nuestro caso, tenemos una evolución similar pero con valores de temperatura ligeramente más altos durante la mayor parte del test.

## 5. CONCLUSIONES.

La simulación realizada con el código TRACE V5.0 Patch 4 del i2.2 run 3 post-test se ejecutó nuevamente después de mejorar el modelo tras la resolución del caso ciego. Las caídas de presión se han ajustado con precisión y algunos componentes hidráulicos han sido actualizados.

En general, todos los parámetros tienen una buena evolución durante el transitorio, por lo que podemos calificar los resultados como satisfactorios. Algunas variables podrían conseguir un comportamiento aún más preciso, como el caudal másico LPSI o la PCT, pero el comportamiento global del modelo TRACE está muy cerca de los datos experimentales.

Se pueden enfocar los trabajos futuros para la mejora de este modelo centrándonos en la adaptación de varios componentes como, por ejemplo, cambiar la configuración de la vasija con componentes 3D. La vasija actual está diseñada utilizando elementos unidimensionales. Mediante geometrías 1D, como las actuales, se puede guiar al flujo, pero es posible que un diseño en 3D permita un mejor rendimiento o comportamiento. Otra posible mejora del modelo TRACE podría ser

el aumento en el número de componentes o celdas para algunos elementos. Por ejemplo, definir varias longitudes de los tubos en U podría ser una posible mejora en el comportamiento de los generadores de vapor.

Estos últimos comentarios son solo posibles ideas para continuar con el desarrollo y perfeccionamiento del modelo, no obstante, los resultados obtenidos indican que el modelo TRACE actual tiene la capacidad para reproducir el comportamiento de la instalación PKL correctamente, como para este transitorio de IBLOCA.

## AGRADECIMIENTOS.

Los autores quieren agradecer la financiación de este trabajo, proveniente de los proyectos CAMP-OECD, al Consejo de Seguridad Nuclear en colaboración con la NRC.

## REFERENCIAS.

- 1 - Cold-leg IB-LOCA, Cold-side SI from 2 HPSI & 2 ACC, no Secondary-side Cool-down -Quick Look Report-  
Report D02-ARV-01-112-795, 2017-07-31.  
S.P. Schollenberger, B. Schoen, K. Umminger
- 2 - Description of the PKL III Test Facility.  
Report PTCTP-G/2012/en/00013, October 2012.  
R. Güneysu, L. Dennhardt, K. Umminger
- 3 - Determination of Heat Losses in the PKL III Test Facility  
Test Report NTT1-G/2006/en/0067, December 2006.  
Dr. T. Mull, Dr. H. Schmidt
- 4 - Determination of Individual Volumes and of Total Volume in the PKL III Test Facility  
Test Report NTCTP-G/2007/en/0011, December 2007.  
R. Güneysu, H. Kremin, K. Umminger