ETH zürich

ETH Library

Reentrainment von Aerosolen während der gefilterten Druckentlastung nach einem schweren Kernschmelzunfall

Doctoral Thesis

Author(s):
Müller, Markus

Publication date:
1997

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-001823695

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

24. Sep. 1997

Diss. ETH Nr. 12138

Reentrainment von Aerosolen während der gefilterten Druckentlastung nach einem schweren Kernschmelzunfall

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
MARKUS MÜLLER
dipl. Masch.-Ing. ETH
geboren am 28. Mai 1969
von Österreich

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Ph. Rudolf von Rohr, Referent
Prof. Dr. F. Widmer, Korreferent
Dr. U. Schmocker, Korreferent

Zürich 1997

24. 9. 97

Zusammenfassung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bestand in der experimentellen Quantifizierung des Aerosol-Reentrainments aus einem Containmentsumpf während einer kontrollierten, gefilterten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters nach einem schweren Kernschmelzunfall. Die Experimente mit wasserlöslichen und -unlöslichen Modellsubstanzen wurden an einem Versuchsstand mit einem linear verkleinerten Modellcontainment (1:20, 5 m^3) durchgeführt, welches die Simulation realer Störfallbedingungen erlaubt. Ein grosser Vorteil des Versuchsstandes besteht in der Möglichkeit, stationäre Zustände über beliebig lange Zeiträume einzustellen. Im Anschluss an die Experimente wurde ein deterministisches Modell aufgestellt, welches die Modellierung des Aerosol-Reentrainments nach schweren Störfällen in Kernkraftwerken und der Brüdenverschmutzung in verfahrenstechnischen Apparaten wie beispielsweise Rektifizierkolonnen oder Entspannungsverdampfern ermöglicht.

Die Experimente mit löslichen Modellsubstanzen zeigen unter stationären Bedingungen eine Zunahme des Aerosol-Reentrainments mit steigender Konzentration an Modellsubstanz in der siedenden Sumpfvorlage und mit zunehmender Gasgeschwindigkeit oberhalb der Sumpfoberfläche. Hingegen hat die thermische Betonzersetzungsreaktion keinen signifikanten Einfluss auf das Aerosol-Reentrainment. Die resultierende Gasproduktion ist gegenüber der Dampfproduktion vernachlässigbar. Ferner zeigen die Experimente, dass nur über siedenden Zonen des Sumpfes Aerosole gebildet und mitgerissen werden. Die Versuche mit unlöslichen Modellsubstanzen zeigen unter stationären Bedingungen zum einen Sedimentationsvorgänge im Sumpf, zum anderen erfolgt kein Mitriss von Aerosolen mit Durchmessern >3 µm in das Filtersystem. Die Reentrainmentfaktoren - der Anteil der aus dem Sumpf mitgerissenen Masse an Modellsubstanz - haben für wasserlösliche Modellsubstanzen die Grössenordnung 10^{-5} und für unlösliche 10^{-6}.

Venting-Simulationen reproduzieren einerseits die Ergebnisse der stationären Experimente, andererseits nimmt aufgrund der erhöhten Gasgeschwindigkeit oberhalb der Sumpfoberfläche das Aerosol-Reentrainment

mit einer grösser werdenden mittleren Druckabbaurate zu. Der instationäre Druckabbau hat in der Atmosphäre des Modellcontainments die Bildung eines Tröpfchennebels zur Folge, welcher wie ein Filter für die aufsteigenden Aerosole wirkt. Somit resultiert bei den Venting-Simulationen gegenüber der stationären Betriebsweise ein geringeres Aerosol-Reentrainment. Unter Berücksichtigung der mittleren Druckabbaurate an der Referenzanlage von nur 0,4 mbar/s ist eine Reproduktion der realen Ventingszenarien unter stationären experimentellen Bedingungen zulässig.

Die Simulation von Containment-Leckagen bestätigt einerseits die Ergebnisse der Venting-Experimente, andererseits gelingt durch die erfolgreiche Reproduktion zweier Experimente, die an einer Japanischen Pilotanlage durchgeführt wurden, der Nachweis, dass unter der Annahme ähnlicher Geometrie und Strömungsverhältnisse im Modellcontainment ein "Scaling-Up" der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zulässig ist. Das innere Volumen von 50 m^3 der Japanischen Pilotanlage ist gegenüber dem ETH-Containment zehnmal grösser.

Das deterministische Modell berücksichtigt die beiden das Aerosol-Reentrainment bestimmenden Phänomene, den Quellterm im Containmentsumpf und das Sedimentationsverhalten der Aerosole oberhalb der siedenden Flüssigkeitsvorlage. Die freiwerdende Energie der an der Oberfläche berstenden Blasen hat die Ausbildung eines Flüssigkeitsjets mit der Ablösung von Aerosolen zur Folge, die Gasgeschwindigkeit über der Oberfläche des Sumpfes bestimmt deren Sedimentationsverhalten. Zu grosse Tropfen fallen in den Sumpf zurück und werden nicht mit der Gasströmung mitgerissen. Die freiwerdende Druckenergie der zerplatzenden Blasen ist von deren Grösse abhängig. Nach einer Abschätzung der mittleren Blasengrösse im Sumpf zeigt ein Vergleich der Messdaten mit dem berechneten Aerosol-Reentrainment eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Eine Dimensionsanalyse erlaubt einen "Scale-Up" auf bestehende Kernkraftwerke, da das linear verkleinerte Modellcontainment eine ähnliche Geometrie wie das Referenzcontainment aufweist und im Innern ähnliche Strömungsverhältnisse vorherrschen. Ein Vergleich des berechneten Aerosol-Reentrainments mittels der Dimensionsanalyse mit den Ergebnissen der Experimente zeigt für den stationären Betrieb eine zufriedenstellende Übereinstimmung.

Summary

The major objective of this project is the experimental determination of the aerosol reentrainment from boiling pool during controlled filtered venting of the containment vessel after a severe core melt accident. For this reason a linear downscaled (1:20) model containment with an inner free volume of 5 m^3 is provided. Both, water soluble and unsoluble model substances are used as fission product simulants. The major advantage of the pilot plant is the ability to run it at steady state conditions for any period of time. Further, modelling of the aerosol reentrainment from boiling pool allows upscaling of results on nuclear power plants. The deterministic aerosol reentrainment model can also be used to calculate entrainment phenomenas in the process industries such as at distillation columns or at flash evaporators.

Steady state experiments with water soluble model substances clearly reveal enhanced aerosol reentrainment from boiling pool due to increasing boiling pool concentration of fission product simulants and due to increasing gas velocities above the boiling pool surface. But, there can be seen no influence of corium concrete interactions on the aerosol reentrainment. Compared to the steam production due to the decay heat the resulting gas volume flux is neglectible. Next, there can be seen aerosol reentrainment from boiling pool only above boiling pool areas. Further, experiments under steady state conditions with unsoluble fission product simulants show on the one hand scrubbing effects in the boiling pool, on the other hand no aerosol reentrainment of solid particles >3 µm. The so called reentrainment factor - ratio between fission product simulant in the venting system and in the boiling pool - is for water soluble model substances in the range of 10^{-5}, for unsoluble fission product simulants in the range of 10^{-6}.

Venting simulations confirm the steady state results. An increase of the mean depressurization rate of the venting simulation leads to enhanced gas velocities above the boiling pool surface and therefore to an increase of aerosol reentrainment from boiling pool. Compared to steady state experiments the aerosol reentrainment during containment venting is

decreased. Unsteady depressurization of the containment leads to flashing of the liquid and to pressure decrease of the containment atmosphere and therefore to the formation of a droplet mist inside the model containment which acts as a filter for ascending aerosols. For this reason and in view of the fact that the mean depressurization rate of the real venting scenario at the Swiss reference plant is about 0,4 mbar/s reproduction of the reference venting scenario at steady state conditions is possible. The results are on the conservative side.

Simulation of containment leakage confirm on the one hand containment venting results on the other hand the results of two containment leakage experiments in Japan. Compared to the model containment of this project the inner free volume of the Japanese pilot containment is ten times higher (50 m^3). For this reason and under the assumption of similarity of geometry and flow pattern between model and reference containment upscaling of results of this study on nuclear power plants is proofed.

The determinsitic model is based on the two major processes which are influencing the aerosol reentrainment from boiling pool: the source term at the boiling pool surface and the aerosol sedimentation above the pool surface. Bubble breaking at the liquid surface leads to the formation of a liquid jet of which aerosols are carried away with the ascending gas flux. The aerosol source term respectively the pressure energy of ascending gas bubbles depends on their size. Decreasing bubble size leads to increasing aerosol reentrainment from boiling pool. Modelling of the aerosol reentrainment shows good results compared to the experiments.

Finally, the engineering formulation of dimensionless analysis which is based on dimensionless numbers allows under the assumption of similarity of geometry and flow pattern upscaling of results on the Swiss reference plant and on other nuclear power plants.