

«CFD-Simulation von Gasaustritten – ein Schlüssel zur Quantifizierung des Gefahrenpotenzials und zur Massnahmenplanung»



«In vielen Fällen kann das Gefahrenpotenzial einer Freisetzung gasförmiger Stoffe bereits aufgrund von Erfahrungswerten oder einfachen Abschätzverfahren grob quantifiziert werden. Immer wieder sind aber auch genauere Kenntnisse zum Ausbreitungs- und Abbrandverhalten von Gasen nötig, beispielsweise für die Massnahmenplanung. Dann werden situationsspezifische Betrachtungen notwendig, wo einfachere Methoden oft an ihre Grenzen stossen. In dieser Situation können CFD-Simulationen einen entscheidenden Lösungsbeitrag leisten. Sie zeigen die im konkreten Ereignis ablaufenden Prozesse detailliert auf und liefern so die Grundlage für eine realistische Einschätzung der Gefahrensituation und für wirksame Schutzmassnahmen.»



Von Dipl. phil. nat.
David Thurnherr*

Sicherheitsbetrachtungen für gasförmige Stoffe mit Gefahrenpotenzial

Gasförmige Stoffe mit Gefahrenpotenzial aufgrund ihrer Brennbarkeit oder Toxizität sind insbesondere als Energieträger sowie als Ausgangs- und Zwischenprodukte chemisch-industrieller Prozesse in unserem Umfeld weitverbreitet. Dank eines hohen technischen Stands und einer intakten Sicherheitskultur wird uns diese Tatsache jedoch nur äusserst selten durch Unfälle in Erinnerung gerufen. Sowohl beim Transport wie auch bei der Lagerung von Erdgas, Flüssiggasen, Ben-

zin etc. existieren für viele Bereiche standardisierte Sicherheitsbestimmungen und Beurteilungsmethoden, Normen oder eine etablierte Praxis, welche den Umgang mit diesen Stoffen im Normalfall vereinfachen und weitgehend unproblematisch machen.

Trotzdem gibt es immer wieder besondere Situationen, welche von den vorhandenen Standards nicht oder nur ungenügend abgedeckt werden. Im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen oder Risikoanalysen ist aber auch für diese Spezialfälle oft eine möglichst gute quantitative Einschätzung der Gefahrensituation nötig. Dabei geht es bei den gasförmigen Stoffen um eine Vorhersage, wie rasch und an welchen Orten bei allfälligen Freisetzungsszenarien welche Gaskonzentrationen entstehen und wie lange es dauert, bis sich das Gas auf eine unbedenkliche Konzentration verflüchtigt

EDITORIAL



Schlüssel zur realistischen Einschätzung von Risiken

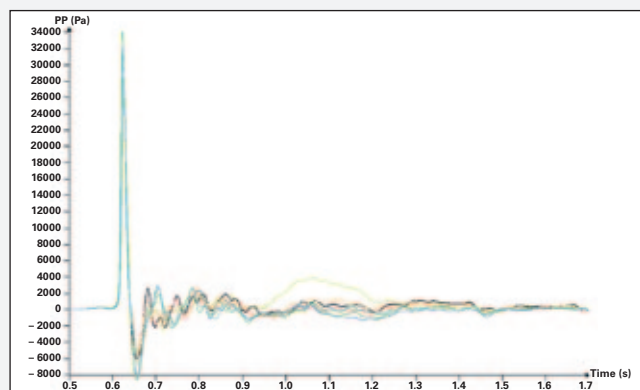
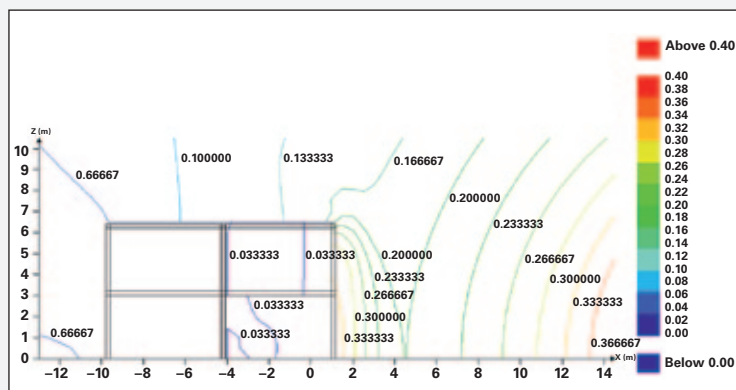
Unser menschliches Gehirn ist unfähig, mit Wahrscheinlichkeiten umzugehen. Und trotzdem arbeiten wir in der Praxis des Risikomanagements mit Wahrscheinlichkeitsaussagen. Wir quälen unsere Risikoverantwortlichen regelmässig mit Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten und präsentieren dem Management Risikolandkarten mit Aussagen zu Eintrittswahrscheinlichkeiten. Dabei wissen wir, dass uns ein intuitives Verständnis für Wahrscheinlichkeiten fehlt. Oder können Sie den Unterschied zwischen 62 und 69 Prozent Eintrittswahrscheinlichkeit erklären, wenn die statistische und vergangenheitsorientierte Datenbasis fehlt oder ungenügend ist? In der Wissenschaft wird hierbei von «Neglect of Probability» (Vernachlässigung der Wahrscheinlichkeit) gesprochen. Dies führt in der Praxis oft zu Entscheidungsfehlern und regelmässig auch zu Krisen.

Simulationen und Tests wirken dieser Tatsache entgegen. Situationspezifische räumliche und zeitliche Betrachtungsweisen wie die CFD-Simulation unter Berücksichtigung der Prozessdynamik sind somit für eine qualitativ hohe Risikobeschreibung und Sicherheitsbeurteilung entscheidend. Beispielsweise ist die Definition von Freisetzungsszenarien, welche Gaskonzentrationen entstehen kann und wie lange es dauert, bis sich das Gas auf eine unbedenkliche Konzentration verflüchtigt hat, kein leichtes Unterfangen. Ausgeprägtes «perspektives» Prozessdenken und Analytik, aber auch die notwendige Risikomanagement-Expertise sind hier unabdingbar.

Eugen Leibundgut
Partner bei RM Risk Management AG

Beispiele CFD-Simulation

Beispiel 1:



Aufprall einer von rechts kommenden Druckwelle auf ein Gebäude und dabei auftretende Reflexionen. Links: Maximaler statischer Überdruck in Bar. Rechts: An Messpunkten auf der Gebäudefassade ermittelter Verlauf des statischen Überdrucks in Pascal. Anhand dieser Ergebnisse kann beispielsweise beurteilt werden, ob das Gebäude der Druckwelle standhält und

eine Abschätzung potenzieller Schäden vorgenommen werden bzw. es können Anforderungen an die bauliche Erhärtung definiert werden, damit das Gebäude nicht über ein bestimmtes Mass beschädigt wird. Ebenfalls können Abstandskriterien definiert werden.

hat. Bei brennbaren Gasen stehen zudem die Druck- und Temperaturverhältnisse im Fall einer Zündung eines brennbaren Gas-Luft-Gemischs im Vordergrund.

Die Ausbreitung von Gasen ist aber typischerweise sehr stark von einer Vielzahl von teilweise von Fall zu Fall hoch variablen Parametern abhängig. Dazu gehören insbesondere der Druck- und Temperaturverlauf des Gasaustritts, die Zusammensetzung eines allfälligen Gasgemischs, Art, Grösse und Form der Austrittsöffnung, die Geometrie des örtlichen Umfelds sowie die Strömungsverhältnisse der Umgebungsluft.

Auch das Abbrandverhalten eines zündbaren Gas-Luft-Gemischs wird durch ähnlich variable Parameter bestimmt: Auch hier ist die örtliche Geometrie eine entscheidende Grösse, beispielsweise dafür, wie rasch der Abbrand verläuft und welche Volumina daran beteiligt sind. Hinzu kommen der Druckwiderstand der vorhandenen baulichen Strukturen, die Mischungsverhältnisse innerhalb der

Gaswolke sowie deren Grösse, die Art und der Ort der Zündung sowie eine Reihe weiterer Parameter.

Diese Vielzahl von teilweise hoch variablen Parametern macht einen konkreten Fall einer Gasfreisetzung oft zu einem Einzelfall, was zu einer entsprechenden Unsicherheit bei der Einschätzung des Gefahrenpotenzials und der Planung sinnvoller und wirksamer Massnahmen führt.

Die Lösung in dieser unbefriedigenden Situation kann ein situationspezifisches Erfassen des Ausbreitungs- und Abbrandverhaltens des freigesetzten Gases bringen. Diese situationsbezogenen Kenntnisse können dazu benutzt werden, die entscheidenden Prozesse bei der Ausbreitung und beim Abbrand mittels gezielter Massnahmen zu stoppen oder in eine günstige Richtung zu beeinflussen und die Wirksamkeit dieser Massnahmen für den konkreten Fall zu prüfen und nachzuweisen. Dazu können spezialisierte CFD-Lösungen einen wesentlichen Beitrag leisten.

Die Lösung für situationspezifische Analysen: CFD

Die Abkürzung CFD steht für «Computational fluid dynamics», zu Deutsch übersetzbar als «Numerische Strömungsmechanik». In diesem Teilgebiet der Strömungsmechanik werden numerische Methoden und Algorithmen verwendet, um strömungsmechanische Probleme – allenfalls unter Einschluss chemischer Reaktionen – approximativ zu lösen. Typisch für CFD-Berechnungen ist die Aufteilung des betrachteten Volumens in sogenannte Kontrollvolumen, für welche die Erhaltungsgleichungen gelöst werden. CFD-Codes ermöglichen die Simulation von Fluiden in komplexen, dreidimensionalen Geometrien. Ein für die Berechnung von

Gasausbreitungs- und Explosionsszenarien spezialisiertes CFD-Paket ist FLACS (FLACS steht für «Flame Acceleration Simulator»), mit welchem auch die nachfolgenden Beispiele berechnet wurden. Das FLACS-Paket wird von der Firma GEXCON in Bergen, Norwegen, entwickelt und vertrieben (GEXCON = Gas Explosion Consultants).

Im Gegensatz zu einfacheren, oft eindimensionalen Gasausbreitungsmodellen und Abschätzverfahren für Explosionsdrücke ermöglichen CFD-Simulationen eine situationspezifische, dreidimensionale Betrachtung der Gasausbreitung und eines allfälligen Abbrandes eines zündbaren Gas-Luft-Gemischs. Dies ist oft entscheidend für eine richtige Einschätzung der Folgen eines Gasaustritts, da die Ausbreitung und ein allfälliges Abbrandverhalten je nach Austrittsort, Umgebung des Austritts, Strömungsverhältnissen etc. völlig unterschiedlich ablaufen können. Einfachere Modelle, welche die konkrete Situation nicht genügend erfassen können, müssen deshalb teilweise von einer Kombination ungünstiger Umstände ausgehen, um zu vermeiden, dass die Konsequenzen eines Gasaustritts unterschätzt werden. In diesem Fall liefern sie ein sehr konservatives Ergebnis, ungeachtet dessen, ob diese ungünstigen Umstände tatsächlich vorhanden sind. Andernfalls kann es passieren, dass aufgrund eines unpassenden Modells die Konsequenzen eines Gasaustritts falsch eingeschätzt werden.

Erfassen der räumlichen und zeitlichen Prozessdynamik als zentrale Grundlage für Sicherheitsbeurteilung und Massnahmenplanung

Da sich Gase nach einem Austritt sehr rasch ausbreiten können, ist ein genaueres Verständnis des zeitlichen und räumlichen Verlaufs als Grundlage für Sicher-

Herausgeber:

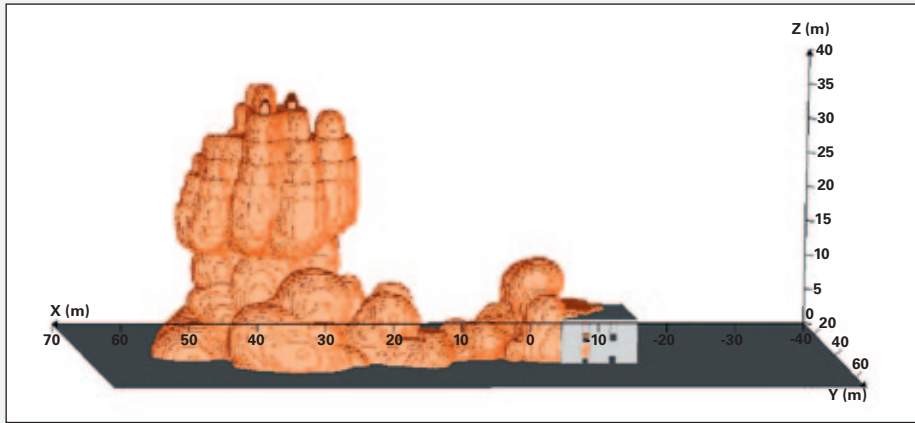


SSI, Schweizerische Vereinigung unabhängiger Sicherheitsingenieure und -berater

Sekretariat
Güstrasse 46
8700 Küsnacht

Telefon 044 910 73 06
www.ssi-schweiz.ch
sicherheitsingenieure@bluwin.ch

Beispiel 2:

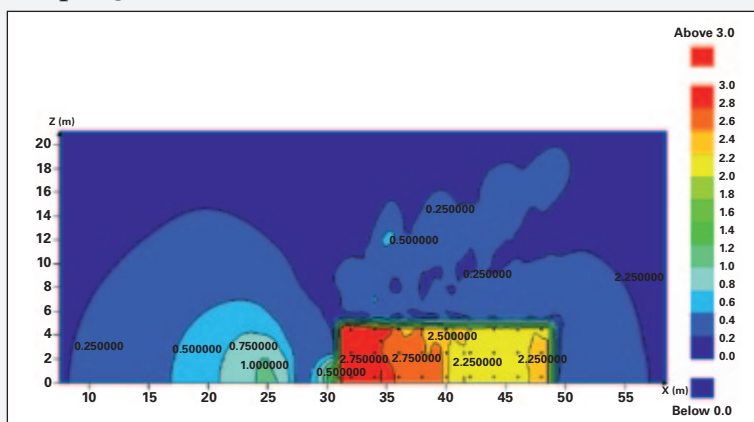


Stichflamme infolge einer heftigen Gaswolkenexplosion in einem Gebäude und Aufrall der Stichflamme auf ein benachbartes Gebäude. Das Gebäude, in dem sich die Explosion ereignet, ist im Bild nicht sichtbar. Es befindet sich im linken Teil der Stichflamme und wird zerstört. Anhand der Simulationsergebnisse können Abstandskriterien bestimmt werden. Ebenfalls kann beispielsweise der Temperaturverlauf auf der Fassade im Verlauf der Zeit berechnet werden, sodass Schutzmassnahmen am Gebäude definiert werden können.

heitsbetrachtungen und für die Massnahmenplanung von zentraler Bedeutung. Es kann entscheidend sein, ob sich eine toxische oder zündbare Gaswolke innert weniger als einer Minute über eine grössere Fläche ausbreitet, oder ob dies erst nach einer Viertelstunde oder noch später der Fall ist. Ebenfalls ist entscheidend, an welchen Orten wann welche Konzentrationen auftreten, bzw. im Fall einer Zündung, an welchen Orten welche Drücke auftreten. CFD-Berechnungen liefern ein detailliertes Bild des zeitlichen Ablaufs für eine Vielzahl von Parametern in hoher räumlicher Auflösung, wobei bei Gasausbreitungsberechnungen vor allem Informationen zu den beteiligten Volumina sowie den Mischungsverhältnissen von Interesse sind, während bei Explosionsberechnungen vor allem verschiedene Pa-

rameter zum statischen und dynamischen Druck sowie zur Temperatur und allenfalls zu den Geschwindigkeitsverhältnissen und dem Ausbreitungsverhalten der Abbrandprodukte betrachtet werden. Besonders interessant sind Informationen zu Wechselwirkungen des abbrennenden Gas-Luft-Gemisches mit festen Strukturen wie Gebäuden oder Teilen davon, Anlagen, Installationen, Vegetation etc. Wechselwirkungen bedeutet, dass einerseits Druck und Temperatur auf die festen Strukturen einwirken und sie deformieren können, andererseits die festen Strukturen aber auch einen entscheidenden Einfluss auf das Abbrandverhalten eines zündbaren Gas-Luft-Gemisches und die damit verbundenen Druckverhältnisse haben. So werden Turbulenz und Flammenfaltung beim Ab-

Beispiel 3:



Gaswolkenexplosion in einem Gebäude, maximaler statischer Überdruck in Bar. Die Simulation zeigt deutlich, dass in dieser Konstellation die grösste Druckentlastung durch das Portal auf der linken Seite erfolgt und zu einem geringeren Teil durch Druckentlastungsöffnungen im Dach, obwohl das Gebäude im Verlauf der Explosion zerstört wird. Eine optimale Ausrichtung des Gebäudes bzw. der Zugänge kann somit bereits wesentlich zur Verminderung von Schäden im Umfeld des Gebäudes im Fall einer Explosion beitragen.

SSI-Mitglieder stellen sich vor:

MARQUART Sicherheit Security AG

«Wenn es um Sicherheit geht, sind wir kompromisslos.» – Schon ein Jahr nach der Gründung der MARQUART Sicherheit Security AG sind die Sicherheitsspezialisten aus Buchs SG und Winterthur in die SSI aufgenommen worden. «Entscheidend in der Sicherheitstechnik sind nicht nur innovative Produkte, sondern was wir für unsere Kunden daraus machen», betont Inhaber Urs Marquart. Moderne Sicherheitssysteme bestehen häufig aus einer Vielzahl von Komponenten unterschiedlichster Hersteller. Aufgrund fundierter Markt- und Produktkenntnisse setzen unsere Spezialisten für jedes Projekt die geeignetste Technologie ein.

Professionelle Planung

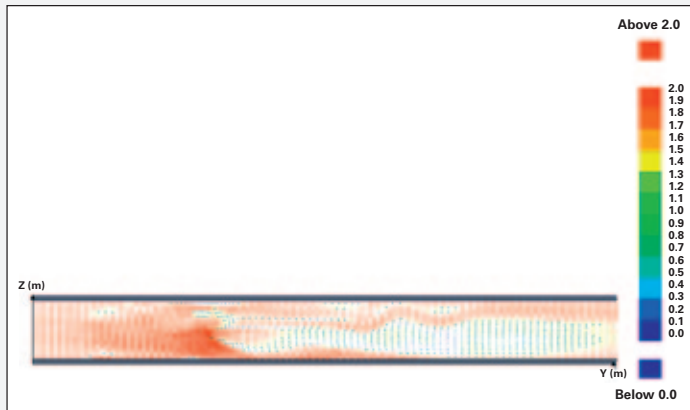
Viele Unternehmen und Privatobjekte in der Schweiz und Liechtenstein setzen auf unsere Sicherheitskonzepte, um ungestört und geschützt arbeiten und wohnen zu können, um gesichert die Produktionsziele zu erreichen oder Finanzdienstleistungen zu erbringen, umsichtig ein Einkaufszentrum zu managen oder um lebensnotwendige Funktionen im Spital sicherzustellen. Denn mit der Sicherheit verhält es sich wie mit einer Kette, die nur so stark ist wie ihr schwächstes Glied. «Less risk, more fun» ist denn auch das Credo der Sicherheitsplaner von MARQUART, die mit ihrer Arbeit mehr als ein gutes Gefühl vermitteln.

Typisch MARQUART sind Dienstleistungen wie:

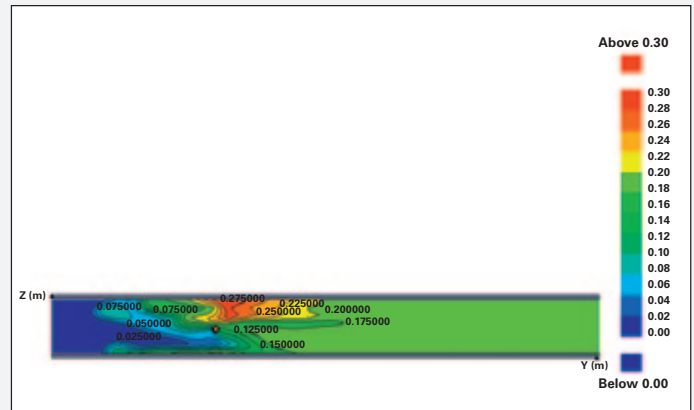
- Betriebs- und Sicherheitskonzepte
- Risikoanalysen und -management
- Sicherheitsaudits
- Sicherheitsplanungen (Bau/Technik/Organisation)
- Kommunikationsplanung
- Türengineering
- Integrierte Tests
- Beratungsmandate
- Begleitung und Coaching von Projekten
- Bauherrenvertretung

MARQUART Sicherheit Security AG
9470 Buchs/8400 Winterthur
Tel. 0848 48 80 80
www.maqs.ch

Beispiel 4:



Schnitt in der Y-Z-Ebene mit Strömungsvektoren (links, m/s) und Gaskonzentration (rechts, % Volumen) bei einem Erdgasaustritt unter hohem Druck in einem von links nach rechts durchströmten Tunnel. Das austretende Gas verursacht zusammen mit der Strömung im Tunnel eine hohe Turbulenz, sodass sofort eine praktisch homogene Durchmischung



über den Tunnelquerschnitt stattfindet. Das Mischungsverhältnis liegt nahe am zündbaren Bereich, sodass bei ähnlichen Gasaustritten die Gefahr eines zündbaren Gemischs über grössere Distanzen im Tunnel besteht. Diese Informationen können als Grundlage für eine Optimierung der Lüftung dienen.

brand und infolgedessen die Abbrandgeschwindigkeit und der Explosionsdruck massgeblich durch die Art und Dichte der festen Strukturen im Bereich des Abbrands bestimmt. Ebenfalls führen Reflexionsphänomene insbesondere an Flächen (Wänden, Fassaden etc.) quer zur Ausbreitungsrichtung der Druckwelle zu einer örtlichen Erhöhung des Explosionsdrucks. CFD-Simulationen können diese Interaktionen realistisch abbilden. Die Beeinflussung der Turbulenz und Flammenfaltung durch feste Strukturen und damit des Abbrandverhaltens wird in der CFD-Simulation rechnerisch wiedergegeben. Ebenfalls wird die Reflexion von Druckwellen an Hindernissen wie beispielsweise Gebädefassaden berechnet, sodass ein realistisches Bild des Verlaufs der Druckeinwirkung auf ein Hindernis entsteht. Dadurch, dass mit CFD-Lösungen das Ausbreitungs- und Abbrandverhalten von Gasen sehr situationspezifisch berechnet werden kann, stellen sie ein hervorragendes Instrument für die Massnahmenplanung dar. Die Wirkung verschiedener Massnahmen kann berechnet, verglichen und belegt werden. Da die Simulation der Ausbreitung und des Abbrands für eine konkrete Geometrie erfolgt, wird die Wirkung von Änderungen am Anlagenlayout, an Gebäuden, der Umgebung, den Luftströmungsverhältnissen etc. im Simulationsergebnis direkt ersichtlich. Mit FLACS lässt sich beispielsweise auch die Wirkung von Lüftungen berechnen. Bei Explosionssimulationen mit FLACS können zudem Sprinkleranlagen, Inertgas, Druckentlastungseinrichtungen sowie teilweise die Zerstörung von festen Strukturen in die Berechnung einbezogen werden.

Aufwand

Die Programmierung und Auswertung einer CFD-Simulation bedingen in der Regel ein weitreichendes Fachwissen.

Ebenfalls ist für die Durchführung einer Simulation ein gewisser Arbeitsaufwand notwendig, da, um eine verlässliche Aussage für den konkreten Fall liefern zu können, dieser Fall auch mit allen relevanten Informationen in der Simulation abgebildet werden muss. Dazu sind beispielsweise eine genügend detaillierte, dreidimensionale Wiedergabe der Geometrie sowie, falls die Zerstörung von festen Strukturen in die Betrachtung miteinbezogen werden soll, eine realistische Beschreibung des Materialverhaltens im Modell notwendig. Zudem muss, um einen Gasaustritt im Modell hinreichend zu definieren, für eine Vielzahl von Parametern ein passender Wert gesetzt werden. Dieser muss oft erst berechnet oder abgeschätzt werden. Das FLACS-Paket stellt deshalb eine Reihe von Tools zur Verfügung, die für solche Berechnungen eingesetzt werden können. Dazu gehören Tools zur Berechnung der Austrittsbedingungen für einen Gasaustritt mit Überschallgeschwindigkeit, wie er oft bei Behältern oder Rohrleitungen mit hohen Drücken vorkommt, oder zur Berechnung des Verhaltens von Flüssiggasaustritten. Auch herstellereitig ist die Entwicklung einer soliden CFD-Lösung mit einem gewissen Aufwand verbunden, was sich im Preis für die Softwarepakete niederschlägt. So können beispielsweise die hohe Leistungsfähigkeit und Vielseitigkeit von CFD-Lösungen nur dann zum Tragen kommen, wenn auch eine entsprechende Validierung des CFD-Codes inklusive der Spezialfunktionen wie Sprinklerwirkung, Inertgas und dergleichen sowie der Zusatztools zur Berechnung von Eingabeparametern gesichert ist. Die Firma GEXCON betreibt unter anderem zu diesem Zweck ein eigenes Large-scale-Testgelände auf der Insel Sotra vor der norwegischen Küste, wo die Zuverlässigkeit der Simulationslösung an Experimenten überprüft werden kann.

Nutzen von CFD-Lösungen

Der relativ hohe Aufwand zur Durchführung einer CFD-Simulation wird jedoch reich entschädigt: Der Prozessablauf kann situationspezifisch nachvollzogen und visualisiert werden – ein unersetzliches Hilfsmittel bei der Entwicklung von situationsgerechten und innovativen Lösungen!

Dank der hervorragenden Visualisierungsmöglichkeiten können die Ergebnisse, insbesondere auch der Nutzen von präventiven und schadensmindernden Massnahmen, wirkungsvoll kommuniziert werden. Dies ist insbesondere im Zusammenhang mit Bewilligungsverfahren von grossem Wert. Deshalb lohnt sich der Einsatz von CFD-Simulationen insbesondere in Spezialfällen, für welche sich noch keine gängige Praxis entwickeln konnte und wo eine entsprechend grosse Unsicherheit besteht. Dabei überwiegt der Nutzen oft den Aufwand um ein Vielfaches, indem trotz fehlender Standards oder Erfahrungswerte nachweislich adäquate und damit wirtschaftliche Sicherheitsmassnahmen getroffen werden können und so unter Umständen ein Projekt erst ermöglicht wird. Richtig eingesetzt sind CFD-Lösungen deshalb ein wertvolles Instrument, um Antworten auf die entscheidenden Fragen zu erhalten.

* Über den Autor

David Thurnherr, Dipl. phil. nat., ist Sicherheitsspezialist bei der suisseplan Ingenieure AG Zürich. Zu seinen Spezialgebieten gehören CFD-gestützte Gasausbreitungs- und Explosionsanalysen. Er ist hauptsächlich in der Sicherheits- und Risikoanalytik für Erdgashochdruck-, LNG- und Flüssiggasanlagen sowie im Bereich der Erdölprodukte tätig.