

**Ingenieurbüro Lohmeyer  
GmbH & Co. KG**

**Immissionsschutz, Klima,  
Aerodynamik, Umweltsoftware**

An der Roßweid 3, D-76229 Karlsruhe

Telefon: +49 (0) 721 / 6 25 10 - 0

E-Mail: [info.ka@lohmeyer.de](mailto:info.ka@lohmeyer.de)

URL: [www.lohmeyer.de](http://www.lohmeyer.de)

**Messstelle nach §§ 26, 28 BImSchG**

---

**ORGAMIR  
ORGANISATIONSÜBERGREIFENDE GEFAHREN-  
ABWEHR ZUM SCHUTZ VON MENSCHEN UND  
KRITISCHEN INFRASTRUKTUREN DURCH OPTIMIERTE  
PRÄVENTION UND REAKTION (AZ 18VERKEHR07)**

**TEILVORHABEN: SIMULATION (TP 3)**

Auftraggeber: Bundesministerium für Bildung und  
Forschung, Berlin

Projekträger: VDI – Technologiezentrum  
Bereich PT, Düsseldorf

Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2008 - 31.01.2011,  
kostenneutral verlängert bis 31.07.2011

Förderkennzeichen: 13N9625 ORGAMIR

Dr.-Ing. Th. Flassak

Dr.-Ing. W. Bächlin

Januar 2012  
Projekt 60965-07-10  
Berichtsumfang 48 Seiten

## **I N H A L T S V E R Z E I C H N I S**

<b>ERLÄUTERUNG VON FACHAUSDRÜCKEN .....</b>	<b>1</b>
<b>I. KURZDARSTELLUNG.....</b>	<b>3</b>
<b>1 AUFGABENSTELLUNG.....</b>	<b>3</b>
<b>2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE.....</b>	<b>3</b>
<b>3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS.....</b>	<b>4</b>
<b>4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE.....</b>	<b>5</b>
<b>5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN .....</b>	<b>6</b>
<b>II. EINGEHENDE DARSTELLUNG.....</b>	<b>7</b>
<b>1 DARSTELLUNG DER VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND DES ERZIELTEN ERGEBNISSES .....</b>	<b>7</b>
1.1 Anforderungen an das U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodell für das OrGaMIR-Gesamtsystem .....	7
1.2 Das U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodell U-BSAM .....	8
1.2.1 Einsatz des Lagrangeschen U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodells in der Selbstrettungsphase.....	9
1.2.2 Einsatz des Lagrangeschen U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodells nach der Selbstrettungsphase.....	10
1.3 U-Bahnhof Hermannplatz .....	11
1.4 Simulation der Strömung mit dem CFD-Programm PHOENICS.....	11
1.5 Geschwindigkeitsklassen an den Tunnelportalmündern und am Ausgang zur Ausgangsebene U7 .....	14

1.6	Das <u>L</u> agrangesche <u>A</u> usbreitungsmodell <i>LAU-B</i> zur Simulation der Gefahrstoffausbreitung im <u>U</u> -Bahnhof.....	19
1.7	Simulation der Strömung und der Ausbreitung für das SF <sub>6</sub> -Ausbreitungsexperiment am 03.12.2008 .....	21
1.8	Bestimmung des Freisetzungsortes auf Basis der Gefahrstoffsensoren und der Geschwindigkeitsmessungen im U-Bahnhof.....	32
1.9	Abschätzung des Freisetzungsmassenstromes auf Basis der von den Gefahrstoffsensoren gemessenen Konzentrationen .....	35
1.10	Einbindung der Softwaremodule in Verschaltungen des OrGaMIR-Gesamt-Softwaresystems.....	36
1.11	Ergebnisse der Arithmetiken A50, A51, A52 und A66 für verschiedene Szenarien.....	38
1.11.1	Definition Strömungsszenario 1: Häufigste Strömungsgeschwindigkeiten und stabile Schichtung .....	38
1.11.2	Definition Gefahrstoffszenario 1: Stoff-Detektion an Gefahrstoffsensorplattform 9 .....	39
1.11.3	Definition Gefahrstoffszenario 2: Stoff-Detektion an Gefahrstoffsensorplattform 3 .....	43
1.12	Gegenüberstellung erzielter Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen.....	45
1.12.1	Änderungen bei den gewählten modelltechnischen Ansätzen im Projekt gegenüber der Antragsplanung .....	45
1.12.2	Änderungen zwischen den geplanten und den im Projekt realisierten Arbeiten.....	45
<b>2</b>	<b>WICHTIGE POSITIONEN DES ZAHLENMÄSSIGEN NACHWEISES .....</b>	<b>46</b>
<b>3</b>	<b>NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT ..</b>	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>VORAUSSICHTLICHER NUTZEN .....</b>	<b>46</b>

<b>5 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN. ....</b>	<b>47</b>
<b>6 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DER ERGEBNISSE</b>	<b>47</b>
<b>7 LITERATUR.....</b>	<b>47</b>

Hinweise:

**Vorliegender Bericht darf ohne schriftliche Zustimmung des  
Ingenieurbüros Lohmeyer GmbH & Co. KG  
nicht auszugsweise vervielfältigt werden.**

Die Tabellen und Abbildungen sind kapitelweise durchnummeriert.

Literaturstellen sind im Text durch Name und Jahreszahl zitiert. Im Kapitel Literatur findet sich dann die genaue Angabe der Literaturstelle.

Es werden Dezimalpunkte (= wissenschaftliche Darstellung) verwendet, keine Dezimalkomas. Eine Abtrennung von Tausendern erfolgt durch Leerzeichen.

## ERLÄUTERUNG VON FACHAUSDRÜCKEN

### Diagnostisches Strömungsmodell

Bei einem diagnostischen Strömungsmodell wird als einzige Erhaltungsgleichung die Massenbilanz erfüllt. Hierzu muss eine elliptische Differentialgleichung numerisch gelöst werden. Gewünschte Strömungsmuster (z.B. Nachlaufwirbel hinter einem Gebäude) müssen parametrisiert werden.

### Eulersches Ausbreitungsmodell

Bei einem Eulerschen Ausbreitungsmodell wird auf einem numerischen Gitter eine partielle Differentialgleichung gelöst. Die partielle Differentialgleichung ist die Massenbilanz des betrachteten Schadstoffes. Die Rechenzeit wird bestimmt durch die Anzahl und Größe der durch das numerische Gitter definierten Rechenzellen.

### False negative

In diesem Kontext ist ein Ergebnis „**false negative**“, wenn das Ausbreitungsmodell fälschlicherweise ausgibt, dass eine Schadstoffkontamination nicht vorhanden (also negativ) ist. Eine Schadstoffkontamination ist also tatsächlich vorhanden, wird aber vom Ausbreitungsmodell nicht erkannt.

### False positive

In diesem Kontext ist ein Ergebnis „**false positive**“, wenn das Ausbreitungsmodell fälschlicherweise ausgibt, dass eine Schadstoffkontamination vorhanden (also positiv) ist. Eine Schadstoffkontamination ist also tatsächlich nicht vorhanden, wird aber vom Ausbreitungsmodell berechnet.

### Instationär

Prozess hängt von der Zeit ab. D.h. der Wert relevanter Variablen ändert sich im Laufe der Zeit.

### Lagrangesches Ausbreitungsmodell

Bei einem Lagrangeschen Ausbreitungsmodell wird die Flugbahn von einzelnen Luftpaketen, die jeweils eine gewisse Schadstoffmenge transportieren, berechnet und die Konzentration durch Auszählen von Luftpaketen in einem Auszählvolumen bestimmt. Die Rechenzeit kann gesteuert werden über die Anzahl von freigesetzten Luftpaketen pro Zeit (=Teilchenrate) und der Größe des Auszählvolumens. Die statistische Sicherheit der berechneten Konzentra-

tionsverteilung ist korreliert mit der Anzahl der freigesetzten Luftpakete. (D.h. hohe statistische Sicherheit = viele Luftpakete pro Zeit = hohe Rechenzeit). Die Verdünnung durch turbulente Diffusion wird bei Lagrangeschen Ausbreitungsmodellen durch einen Zufallsprozess (Markow-Kette) nachgebildet.

### **Prognostisches Strömungsmodell**

Bei einem prognostischen Strömungsmodell wird die Erhaltungsgleichung für Massenbilanz, Impuls und ggf. Energie numerisch gelöst.

Wie bei diagnostischen Strömungsmodellen muss eine elliptische Differentialgleichung (für den Druck) numerisch gelöst werden. Gewünschte Strömungsmuster (z.B. Nachlaufwirbel hinter einem Gebäude) ergeben sich aus der (numerischen) Lösung der Erhaltungsgleichungen.

### **Stationär**

Prozess hängt nicht von der Zeit ab. D.h. zu jeder Zeit haben alle relevanten Variablen den gleichen Wert.

## I. KURZDARSTELLUNG

### 1 AUFGABENSTELLUNG

Das Verbundprojekt OrGaMIR (Organisationsübergreifende Gefahrenabwehr zum Schutz von Menschen und kritischen Infrastrukturen durch optimierte Prävention und **R**eaktion) ist Teil des Programms "Forschung für die zivile Sicherheit" im Rahmen der High-Tech-Strategie der Bundesregierung und wird im Bereich "Schutz von Verkehrsinfrastrukturen" vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Das Ziel von OrGaMIR ist es, ein System zu entwickeln, das die Beurteilung der vorherrschenden und der **voraussichtlichen Kontamination** eines U-Bahn-Systems mit gefährlichen Stoffen ermöglicht, u.a. mit dem Ziel der dynamischen Fluchtweglenkung. Der Schwerpunkt hierbei liegt in der Entwicklung neuer Methoden der **Informationsbereitstellung** und deren Implementierung in bestehende Prozesse, übergreifend über alle beteiligten Organisationen. Insbesondere die Betreiberorganisation und die Rettungskräfte sind wesentliche Informationsadressaten.

Im Speziellen ist vom Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG (im folgenden LOH genannt) im Teilprojekt TP3 des Verbundprojektes OrGaMIR ein Modul konzipiert und in das OrGaMIR-Gesamtsystem integriert worden, mit Hilfe dessen die Ausbreitung von Substanzen in U-Bahnhöfen zeitnah (geforderte Rechenzeit <10 min) für den Istzustand und für einen Zeitpunkt in der Zukunft (Prognose, z.B. nach einer Stunde) unter vereinfachenden Annahmen simuliert werden kann.

### 2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

Millionen Menschen benutzen regelmäßig U-Bahnen. Die große Anzahl von Personen auf beschränktem Raum besonders zur Hauptverkehrszeit macht U-Bahn-Systeme zu einem potentiellen Ziel für terroristische Angriffe.

In U-Bahnhöfen ist meist eine Fluchtwegbeschilderung vorhanden, die statisch ist, d.h., nicht abhängig ist z.B. vom Freisetzungsort, von der aktuellen Strömungsrichtung im U-Bahnhof und weiteren, sich zeitlich verändernden Parametern. Eine Entfluchtung, die durch die Tunnel erfolgt, ist bisweilen aus verschiedenen Gründen nicht vorgesehen, obwohl dieser Weg oft der ist, der nicht kontaminiert oder im Brandfall nicht verraucht ist. Die statische Flucht-

wegbeschilderung weist i.d.R. den kürzesten Weg aus dem U-Bahnhof ins Freie. Dieser kürzeste Weg ist in vielen Situationen jedoch in Bezug auf die Überlebenschancen nicht der optimale.

Im Ereignisfall sind die Informationswege von U-Bahn-Betreibergesellschaft, Feuerwehr, Rettungsdienst und Polizei zum Teil sehr unterschiedlich und inhomogen. Dies führt zu einem uneinheitlichen Informationsstand, der einen optimalen Einsatz von Ressourcen hemmt.

In den Bereich der dynamischen Fluchtweglenkung fließt das Wissen von einer Vielzahl von unterschiedlichen wissenschaftlichen und technischen Disziplinen ein. Die betroffenen Teilbereiche sind im wesentlichen die Informationstechnologie und -verarbeitung, der Bereich der Stoffdetektion und Klimamesstechnik, die Tunnelklimatologie und Verhaltenspsychologie sowie der Bereich der Strömungs- und Ausbreitungssimulation.

Ziel von OrGaMIR ist es, das Wissen aus den o.g. Teilbereichen zu bündeln und für die Akteure nutzbar zu machen.

### 3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Auf Initiative des Institutes für Computeranwendung und Integration in Konstruktion und Planung der Universität Paderborn (UPB) wurde das Verbundprojekt in 2007 geplant und beantragt. Die Laufzeit des Vorhabens war bewilligt vom 01.02.2008 bis zum 31.01.2011. Für LOH wurde eine kostenneutrale Verlängerung bis 31.07.2011 genehmigt.

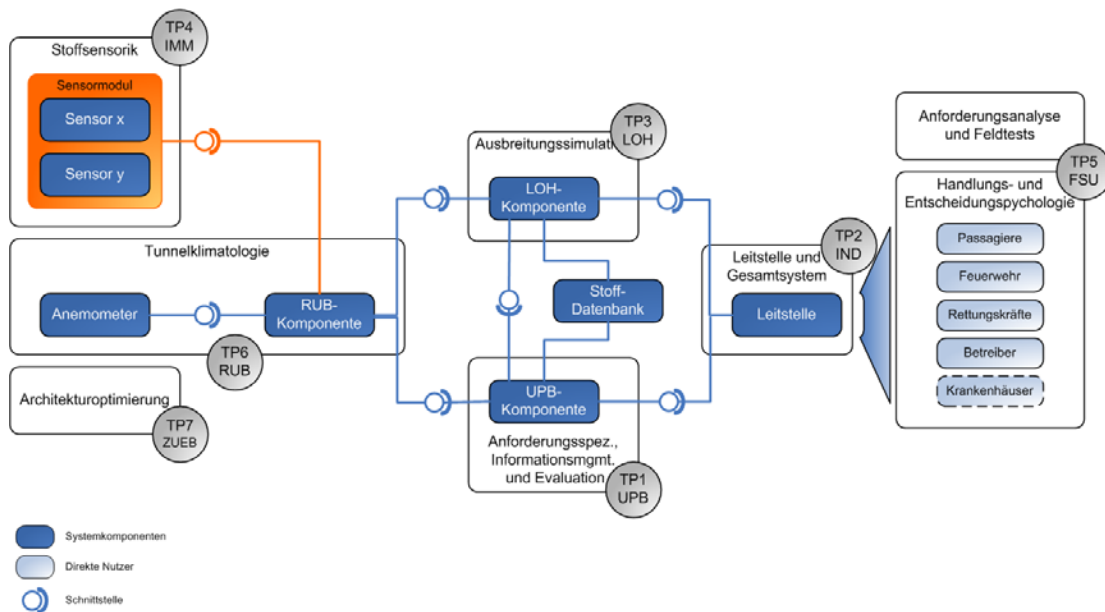
In der Planungs- und Antragsphase umfassten die Arbeiten von LOH in Teilprojekt 3 (TP3) im Wesentlichen die Bereitstellung eines U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodells, eines U-Bahnhof-Schadstoffvisualisierungsmoduls und eines Gesamtsystem-Gefährdungsbereich-Visualisierungsmoduls.

Die Einbindung der Arbeiten in TP3 in das OrGaMIR-Gesamtsystem ist in **Abb. 3.1** dargestellt.

Änderungen bei den gewählten modelltechnischen Ansätzen im Projekt gegenüber der Antragsplanung werden Kap. in 1.12.1 beschrieben. Änderungen zwischen den geplanten und den im Projekt realisierten Arbeiten sind im Kap. 1.12.2 dargelegt.

Von LOH konnten alle während der Projektlaufzeit definierten Arithmetiken für das OrGaMIR-Gesamtsystem funktionsfähig bereitgestellt werden.





**Abb. 3.1:** Teilprojekte des OrGaMIR-Verbundes. (Abkürzungen siehe: : <http://www-cik.uni-paderborn.de/Forschung/orgamir/Konsortium>)

#### 4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, AN DEN ANGENÜPFT WURDE

Software für die Simulation der Strömung und der Ausbreitung von Luftbeimengungen in komplexen Geometrien ist verfügbar (z.B. PHOENICS, FLUENT, CFX, etc.), kann jedoch im Rahmen des hier beantragten Projektes online nicht eingesetzt werden, da die Rechenzeiten derartiger Programme im Bereich von Stunden bis hin zu Tagen liegen. Somit liegen die Ergebnisse viel zu spät vor.

Mit dem Prinzip einer „Strömungsfeldbibliothek“, d.h. der Vorab-Berechnung dreidimensionaler Strömungsfelder, hat LOH mit dem selbst entwickelten Störfallsystem SAM-S und installiert bei der BASF AG gute Erfahrungen gemacht. Diese Vorgehensweise ist damit Stand der Technik. Das in SAM-S angewandte Prinzip „Strömungsfeldbibliothek“ musste jedoch bei der Übertragung auf U-Bahnhöfe methodisch erweitert werden, da in diesem Fall dreidimensionale Strömungsfelder für die verschiedenen, an den Tunnelportalmündern klassifizierten Strömungsgeschwindigkeiten und für unterschiedliche thermische Stabilitäten vorab simuliert werden müssen.

Das Argonne National Laboratory, Chicago, USA hat das System PROTECT<sup>1</sup> entwickelt. PROTECT ist ein automatisiertes Hardware- und Software-System. Es beinhaltet Stoff-Detektoren, Videoüberwachung, eine Ausbreitungsmodellierung und hat das Ziel die Erkennung und Reaktion auf komplexe terroristische Angriffe mit chemischen Kampfstoffen in U-Bahnsystemen zu verbessern. Informationen zu PROTECT sind zu finden unter:

- [http://www.anl.gov/techtransfer/pdf/Profile\\_Protect\\_9-3-04.pdf](http://www.anl.gov/techtransfer/pdf/Profile_Protect_9-3-04.pdf)
- [http://www.anl.gov/Media\\_Center/Frontiers/2003/b5excell.html](http://www.anl.gov/Media_Center/Frontiers/2003/b5excell.html)

Weitere Veröffentlichungen zu PROTECT sind nicht bekannt.

## 5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Im Rahmen des Verbundprojektes ergab sich eine rege und konstruktive Zusammenarbeit zwischen den Partnern des Konsortiums. Eine Auflistung der OrGaMIR-Konsortialpartner ist zu finden unter: <http://www-cik.uni-paderborn.de/Forschung/orgamir/Konsortium>.

Im Bereich der in OrGaMIR eingesetzten Methode „Strömungsfeldbibliothek“ für Ausbreitungssimulationen ist Dr. Flassak u.a. aktiv und tauscht sich aus in der VDI-Arbeitsgruppe VDI 3783, Blatt 16 „Umweltmeteorologie, Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle, Verfahren zur Anwendung in Genehmigungsverfahren nach TA Luft“. Im Rahmen dieser Arbeiten werden Strömungsfeldbibliotheken für andere Anwendungsfälle standardisiert. Im Zusammenhang mit dem Einsatz von numerischen Strömungs- und Ausbreitungsmodellen, die für Störfälle geeignet sind, besteht eine Zusammenarbeit mit der Murdoch Universität in Australien. Gemeinsam erzielte Ergebnisse sind in Donnelly et al. (2009) veröffentlicht.

---

<sup>1</sup> Program for Response Options and Technology Enhancements for Chemical/Biological Terrorism.

## II. EINGEHENDE DARSTELLUNG

### 1 DARSTELLUNG DER VERWENDUNG DER ZUWENDUNG UND DES ERZIELTEN ERGEBNISSES

Im folgenden wird das im OrGaMIR-System integrierte U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodell (U-BSAM) eingehend beschrieben.

#### 1.1 Anforderungen an das U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodell für das OrGaMIR-Gesamtsystem

U-BSAM wird u.a. eingesetzt für die dynamische Fluchtweglenkung. Das U-BSAM soll in diesem Zusammenhang erkennen, welche Teilbereiche des U-Bahnhofs bzw. welche Ausgänge kontaminiert sind und welche nicht. Aus dieser Aufgabe lassen sich folgende Anforderungen an das U-BSAM ableiten:

1. „False negative“-Ergebnisse des Modells, d.h. wenn eine Schadstoffkontamination tatsächlich vorhanden ist, aber vom Ausbreitungsmodell nicht erkannt wird, müssen mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können.
2. „False positive“-Ergebnisse des Modells, d.h. wenn eine Schadstoffkontamination tatsächlich nicht vorhanden ist, aber vom Ausbreitungsmodell fälschlicherweise prognostiziert wird, sollten nicht zu häufig auftreten. Grund für diese Anforderung ist, dass z.B. nicht Ausgänge fälschlicherweise als kontaminiert ausgewiesen und als Fluchtweg nicht vom OrGaMIR-System angeboten werden, obwohl sie als Fluchtweg hätten genutzt werden könnten.
3. Die Rechenzeit des Modells sollte für die Anwendung in der Selbstrettungsphase deutlich unter der in Antrag geforderte Rechenzeit von 10 min liegen.
4. Für die Anwendung in der Selbstrettungsphase werden keine weiteren Anforderungen an das Modell formuliert, z.B. Genauigkeitsanforderungen bezüglich dem Verhältnis von prognostizierter und vorhandener Schadstoffkonzentration. Grund hierfür ist, dass für die Anwendung in der Selbstrettungsphase alleinig eine belastbare und schnelle Aussage auf die Frage „Schadstoff vorhanden? Ja oder Nein“ erforderlich ist. Hinzu kommt, dass in der Selbstrettungsphase der freigesetzte Massenstrom nicht bekannt ist und auch nicht, wie z.B. bei SF<sub>6</sub>, über die gemessene Konzentration abgeschätzt werden kann (vgl. Kap. 1.9). Grund hierfür ist, dass die Gefahrstoffsensoren außer beim SF<sub>6</sub> nur Folgeprodukte messen, sogenannte Hydrolyseprodukte. Auf die Konzentration des Schadstoffes selbst kann nicht geschlossen werden. Somit

kann in diesem Fall kein absoluter Wert der Schadstoffkonzentration simuliert werden.

## 1.2 Das U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodell U-BSAM

Das erstellte Konzept sieht vor, das U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodell U-BSAM zusammenzusetzen aus einer

- Strömungsfeldbibliothek mit vorberechneten dreidimensionalen Strömungsfeldern auf Basis des CFD-Programmes PHOENICS zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse in U-Bahnhöfen und einem
- Lagrangeschen Ausbreitungsmodell zur Beschreibung der Ausbreitung von Luftbeimengungen.

Auf Basis des aus der Strömungsfeldbibliothek ausgewählten, vorberechneten dreidimensionalen Strömungsfeldes wird die Ausbreitung von Luftbeimengungen mit einem Lagrangeschen Ausbreitungsmodell<sup>2</sup> berechnet. Eine vollständige Beschreibung ist z.B. zu finden in VDI 3945, Blatt 3 (VDI, 2000). Derartige Lagrangesche Ausbreitungsmodelle sind in diesem Kontext besser geeignet als Eulersche Ausbreitungsmodelle. Die in diesem Projekt umgesetzte Realisierung eines Lagrangeschen Ausbreitungsmodells ist in Kap. 1.6 beschrieben.

Um die Konzentrationsverteilung in U-Bahnhöfen berechnen zu können, muss zusätzlich zu den o.g. Punkten der

- Ort der Freisetzung und die
- Quellstärke (d.h. Menge pro Zeit)

bekannt sein.

Der Ort der Freisetzung kann entweder manuell in das System eingegeben werden oder kann in der Selbstrettungsphase unter zu Hilfenahme der Sensoren zur Detektion von CBNRE-Gefahrstoffen (im folgenden Gefahrstoffsensoren genannt, näheres hierzu siehe TP4<sup>3</sup>, IMM<sup>4</sup>) und den im U-Bahnhof sowie in den angrenzenden Tunnelportalmündern ange-

---

<sup>2</sup> vgl. Kap. ERLÄUTERUNG VON FACHAUSDRÜCKEN

<sup>3</sup> TP4 = Teilprojekt 4 im OrGaMIR-Gesamtprojekt

<sup>4</sup> Projektpartner IMM: Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH

brachten Ultraschall-Anemometern zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit (TP6<sup>5</sup>, RUB<sup>6</sup>) näherungsweise bestimmt werden (vgl. Kap. 1.8).

Die Quellstärke kann entweder manuell in das System eingegeben werden oder es wird eine Einheitsquellstärke angenommen. In letztgenanntem Fall sind die berechneten Konzentrationen nur als relative Konzentrationswerte zu interpretieren. Ein Rückschluss auf die absolute Höhe der Konzentration ist nicht möglich. Die Möglichkeit die Quellstärke unter Zuhilfenahme der von den Gefahrstoffsensoren gemessenen Konzentrationen abzuschätzen, wird in Kap. 1.9 erläutert. Diese Vorgehensweise wird derzeit jedoch nur für SF<sub>6</sub>-Freisetzung eingesetzt.

Das selbe Lagrangesche U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodell wird verwendet zum einen in der sogenannten Selbstrettungsphase und zum anderen nach der Selbstrettungsphase mit einer erhöhten Genauigkeit und mit Prognoseoptionen.

### **1.2.1 Einsatz des Lagrangeschen U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodells in der Selbstrettungsphase**

In der Selbstrettungsphase wird das Lagrangesche U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodell so betrieben, dass die Berechnung der Verteilung der Schadstoffwolke im U-Bahnhof möglichst schnell vorliegt. Hier kommt es vor allem darauf an, eine Aussage zu liefern, ob an vorgegebenen Orten (z.B. Aufgängen ins Freie) mit einer Schadstoffkontamination zu rechnen ist oder nicht. Die Höhe der Schadstoffkonzentration kann nicht bestimmt werden, da zu diesem Zeitpunkt die freigesetzte Schadstoffmenge nicht bekannt ist und mit einer Einheitsquellstärke gerechnet werden muss. Die Simulation wird beendet, wenn ein quasi-stationärer Zustand erreicht worden ist. Es erfolgt keine Prognoserechnung.

Im OrGaMIR-Gesamtsoftwaresystem wird dieses Modul in der Arithmetik A51 eingesetzt. Die Rechenzeit für eine Simulation z.B. für den U-Bahnhof Hermannplatz in Berlin (vgl. Kap. 1.3) beträgt ca. 10 s. Somit ist die erforderliche Rechenzeit ca. 60 mal geringer als die in der Antragsphase geforderte Rechenzeit<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> TP6 = Teilprojekt 6 im OrGaMIR-Gesamtprojekt

<sup>6</sup> Projektpartner RUB: Ruhr-Universität Bochum, Geographisches Institut

<sup>7</sup> Bei einer Übertragung der Rechenzeiten auf andere U-Bahnhöfe ist die jeweilige Komplexität des U-Bahnhofes zu berücksichtigen.

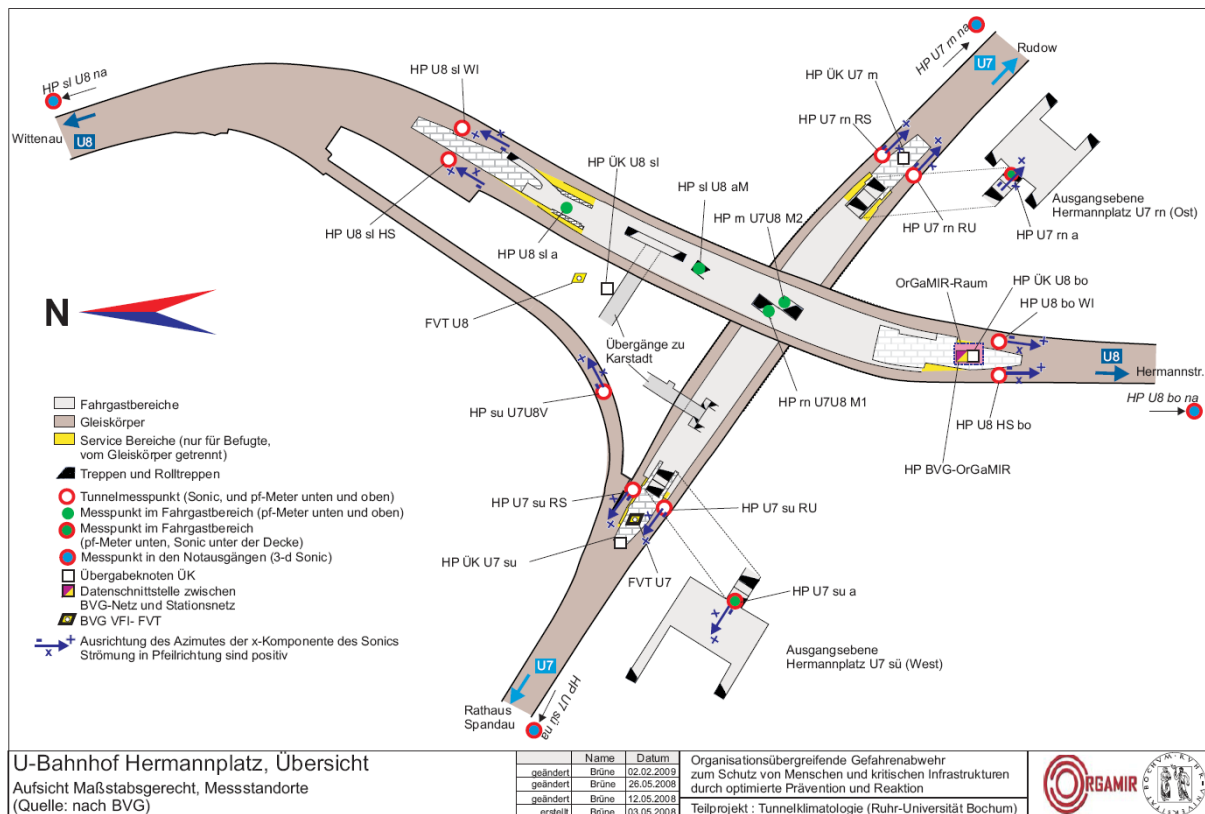
### 1.2.2 Einsatz des Lagrangeschen U-Bahn-Schadstoffausbreitungsmodells nach der Selbstrettungsphase

Nach der Selbstrettungsphase wird das Lagrangesche U-Bahn-Schadstoffausbreitungsmodell mit einer erhöhten Genauigkeit (=höhere Teilchenrate) betrieben. Es wird eine zeitabhängige Simulation durchgeführt. Ausgabezeitpunkte der berechneten Konzentration sind die aktuelle Zeit sowie Zeitpunkte in der Zukunft.

Die von den Gefahrstoffsensoren gemessene Konzentration wird in die Ausbreitungsrechnung mit einbezogen und zwar (bei SF<sub>6</sub>) für die Skalierung der berechneten Konzentrationsverteilung. Mit diesem Skalierungsfaktor kann die Quellstärke (d.h. die pro Zeit freigesetzte Menge) grob abgeschätzt werden.

Mit einer Prognose darüber, wie sich die Strömungsgeschwindigkeiten bis zu einem interessierenden Prognosehorizont (z.B. in einer Stunde) ändern, kann mit dem Ausbreitungsmodell auch die Konzentrationsverteilung in der Zukunft bei erwarteten Änderungen in der Tunnelklimatologie simuliert werden.

Im OrGaMIR-Gesamtsoftwaresystem wird dieses Modul in der Arithmetik A52 eingesetzt. Die Rechenzeit für eine Simulation z.B. für den U-Bahnhof Hermannplatz in Berlin (vgl. Kap. 1.3) beträgt ca. 5 min; ist somit geringer als die in der Antragsphase geforderte Rechenzeit.



**Abb. 1.1:** Schematische Darstellung des U-Bahnhofs Hermannplatz mit den Messstandorten (Bildquelle: RUB)

### 1.3 U-Bahnhof Hermannplatz

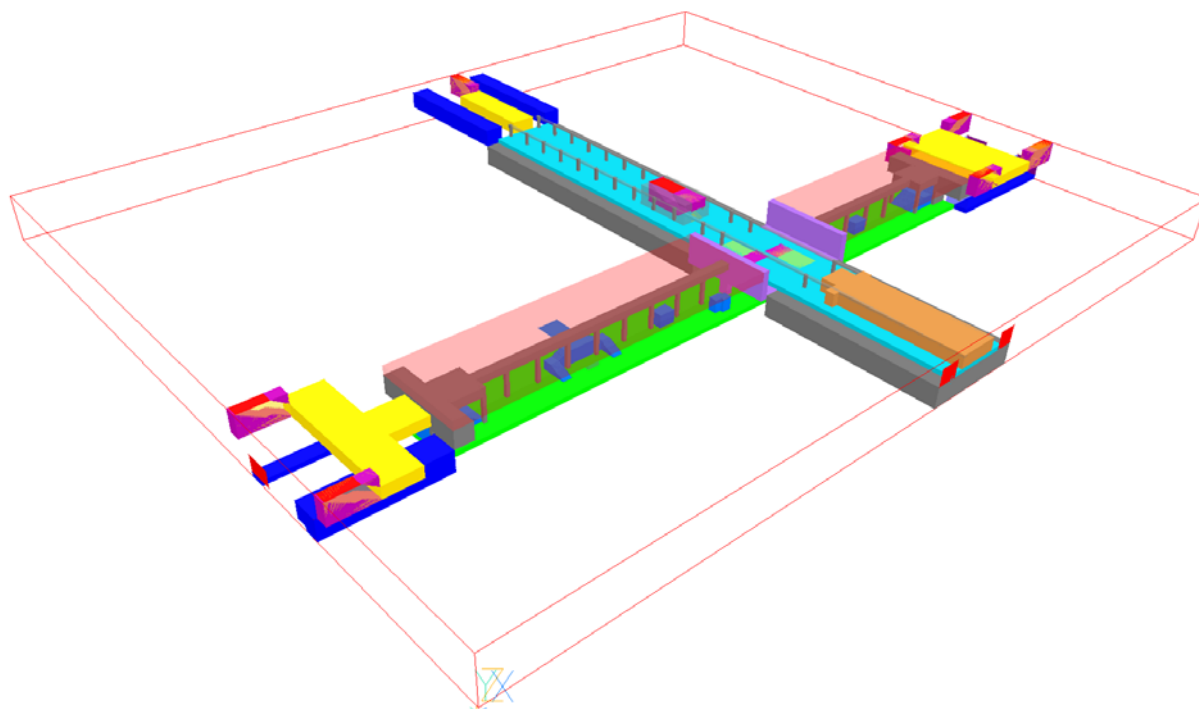
Das U-Bahnhof-Ausbreitungsmodell wird angewandt und die Funktion demonstriert am U-Bahnhof Hermannplatz, der sich im Norden des Berliner Bezirks Neukölln befindet. Schematisch ist er in **Abb. 1.1** dargestellt. Der Bahnhof wird befahren von den U-Bahnlinien U7 (in der unteren Ebene) und U8 (in der oberen Ebene), die sich nahezu im rechten Winkel schneiden. In **Abb. 1.1** sind die Messstandorte vollständig mit eingetragen. Messstandorte, die für die Strömungssimulation relevant sind, zeigt **Abb. 1.5**.

### 1.4 Simulation der Strömung mit dem CFD-Programm PHOENICS

Das dreidimensionale Strömungsfeld wird mit Hilfe des CFD-Programmes PHOENICS berechnet und zwar offline für eine Vielzahl von Situationen. Alle vorausberechneten Strömungsfelder bilden zusammen die Strömungsfeldbibliothek.

Das Modell des U-Bahnhofs Hermannplatz ist in **Abb. 1.1** dargestellt. Vereinfachend ist angenommen, dass der Bahnsteig von Linie U7 bzw. U8 konstant breit ist (hellgraue Flächen) und beide Linien sich in einem rechten Winkel schneiden.

Zur Berechnung der dreidimensionalen Strömung wird das in **Abb. 1.2** dargestellte Gebiet (Größe: 196 m x 161.3 m x 10.2 m) mit einem Netz von 120 x 111 x 38 Gitterzellen überzogen, auf dem die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen, die Energieerhaltungsgleichung und eine elliptische Differentialgleichung für den Druck numerisch gelöst werden.



**Abb. 1.2:** Modell für die CFD-Software PHOENICS des U-Bahnhofs Hermannplatz



**Abb. 1.3:** Detailfoto U-Bahnstation Hermannplatz, Ebene U7 und Nachbildung für die Strömungssimulation mit dem CFD-Programm PHOENICS





**Abb. 1.4:** Detailfoto U-Bahnhof Hermannplatz, Ebene U7 und Nachbildung für die Strömungssimulation mit dem CFD-Programm PHOENICS

**Abb. 1.3** und **Abb. 1.4** zeigen für zwei Perspektiven Detailfotos vom U-Bahnhof Hermannplatz in Ebene U7 sowie für die selben Perspektiven eine Darstellung der modellhaften Nachbildung für die Strömungssimulation mit dem CFD-Programm PHOENICS.

### **1.5 Geschwindigkeitsklassen an den Tunnelportalmündern und am Aufgang zur Ausgangsebene U7**

Für die Strömungsfeldbibliothek wird das dreidimensionale Strömungsfeld für diskrete Strömungsgeschwindigkeiten an den Ein- bzw. Ausströmrändern des Rechengebietes berechnet, die im folgenden als „Rechenwerte der Strömungsgeschwindigkeit“ bezeichnet werden. Die Rechenwerte der Strömungsgeschwindigkeit an den Ein- bzw. Ausströmrändern des Rechengebietes sind Eingangsgrößen für die Simulation und müssen geeignet gewählt werden, um die Anzahl der Simulationen für die Strömungsfeldbibliothek gering zu halten.

Diese Rechenwerte der Strömungsgeschwindigkeit werden festgelegt für die Messstellen HPU7su, HPU7rn, HPU8sl, HPU8bo, vgl. **Abb. 1.5**. Diese Messstellen befinden sich in den Tunnelportalmündern, beim Modell für die Strömungssimulation sind dort die seitlichen Einström- bzw. Ausströmränder (vgl. **Abb. 1.2**).

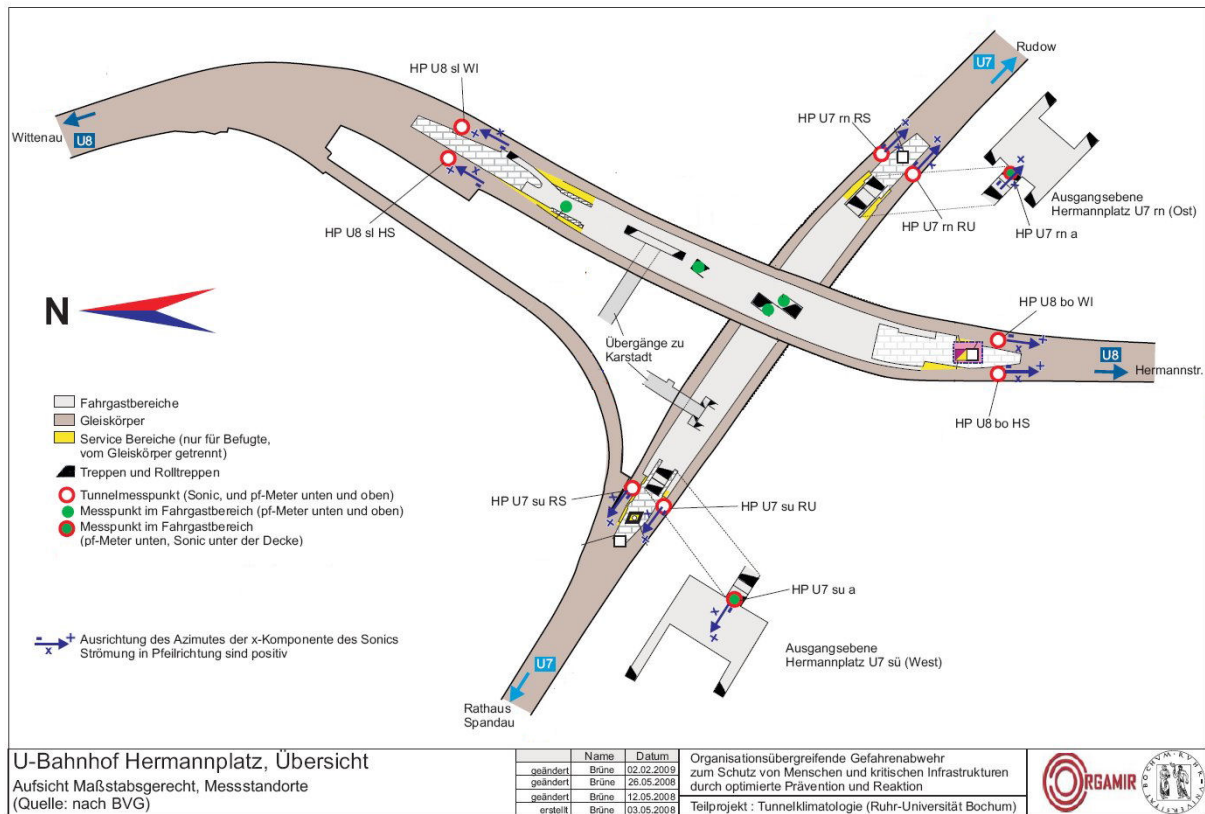
Es hat sich gezeigt, dass bei labile Temperaturschichtung auch an den Messstellen HPU7su a und HPU7rn a die Rechenwerte der Strömungsgeschwindigkeit festgelegt werden müssen, um eine eindeutige Strömungssituation im U-Bahnhof beschreiben zu können.

Die Messwerte an den o.g. Messstellen HPU7su, HPU7rn, HPU8sl, HPU8bo sind jeweils Mittelwerte über 2 benachbarte Tunnelportalmündern. (Beispiel: Wert für HPU7su ist Mittelwert aus Messwert bei HPU7suRS und HPU7suRU, vgl. **Abb. 1.5**).

Die Rechenwerte der Strömungsgeschwindigkeit werden auf Basis der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung (siehe **Abb. 1.6** und **Abb. 1.7**) festgelegt. Grund hierfür ist, dass nicht Werte für die Simulation ausgewählt werden, die überhaupt nicht vorkommen. Dies würde nur die Strömungsfeldbibliothek unnötigerweise aufblähen. Es wird der

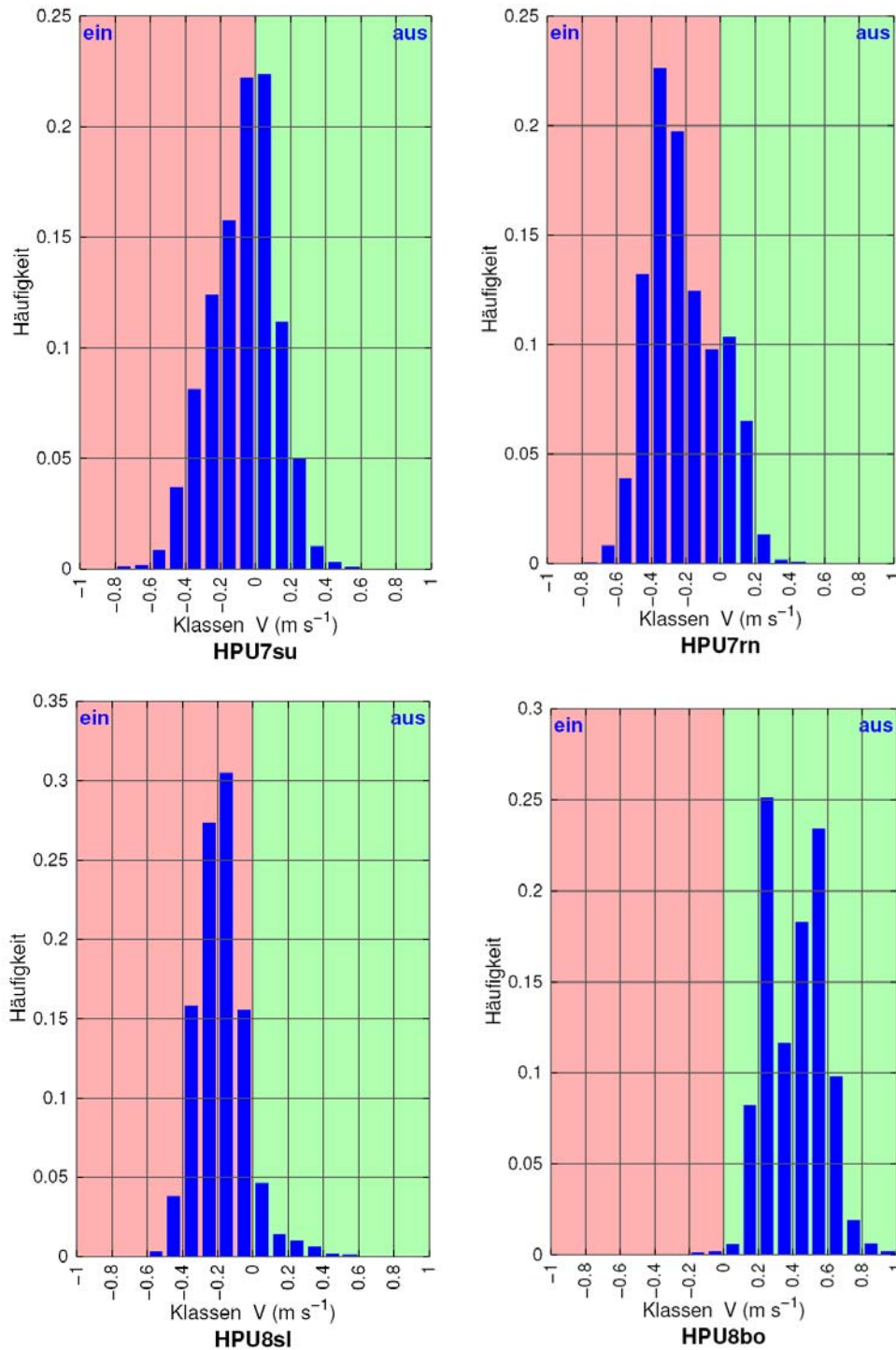
- 10-Perzentil-Wert, der
- 90-Perzentil-Wert und der
- häufigste Messwert

ausgewählt. **Tab. 1.1** zeigt den häufigsten Messwert und den 10- bzw. 90-Perzentilwert der Strömungsgeschwindigkeit für die Messstellen HPU7su, HPU7rn, HPU8sl, HPU8bo sowie HPU7su a und HPU7rn a.

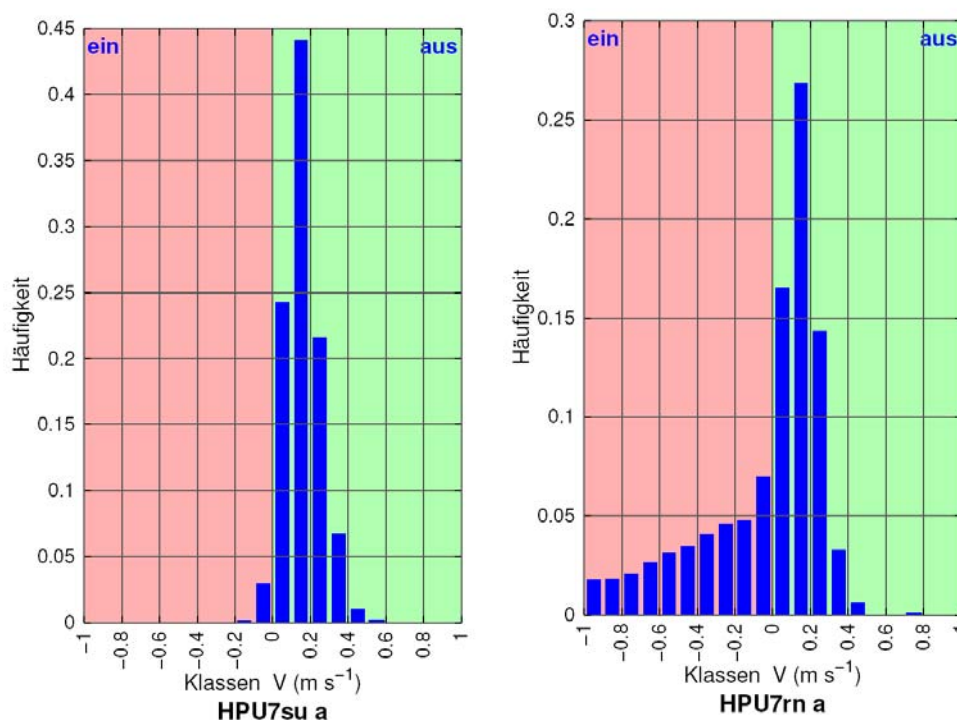


**Abb. 1.5:** Schematische Darstellung des U-Bahnhofs Hermannplatz mit den für die Strömungssimulation relevanten Messstandorten (Bildquelle: RUB)

Die festgelegten Rechenwerte der Strömungsgeschwindigkeit zeigt **Tab. 1.2**. Ist der Abstand zwischen dem häufigsten Messwert und dem 10- bzw. 90-Perzentilwert signifikant größer als 0.2 m/s, sind Zwischenwerte eingeführt worden (in **Tab. 1.2** fett markiert). Die Rechenwerte der Strömungsgeschwindigkeit in **Tab. 1.2** sind z.T. noch modifiziert worden. Jeweiliger Grund ist in den Fußnoten angegeben.



**Abb. 1.6:** Verteilung der gemessenen Geschwindigkeit an der Messstelle HPU7su, HPU7rn, HPU8bo und HPU8sl. Jeweils gemittelt über die 2 benachbarten Tunnelportalmündender. (Beispiel: Wert für HPU7su ist Mittelwert aus Messwert bei HPU7suRS und HPU7suRU, vgl. **Abb. 1.1**). Klassenbreite: 0.1 m/s. (Bildquelle: RUB)



**Abb. 1.7:** Verteilung der gemessenen Geschwindigkeit an der Messstelle HPU7su a und HPU7rn a, vgl. **Abb. 1.1**). Klassenbreite: 0.1 m/s. (Bildquelle: RUB)

Messstelle	Häufigste Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	10-Perzentil-Wert [m/s]	90-Perzentil-Wert [m/s]
HPU7su	0 - 0.1	-0.3	0.2
HPU7rn	-0.4 - -0.3	-0.5	0.1
HPU8sl	-0.2 - -0.1	-0.4	0
HPU8bo	0.2 - 0.3	0.2	0.6
HPU7su a	0.1 - 0.2	0	0.3
HPU7rn a	0.1 - 0.2	-0.5	0.3

**Tab. 1.1:** Häufigster Wert und 10- bzw. 90-Perzentilwert der Strömungsgeschwindigkeiten an den Messstellen HPU7su, HPU7rn, HPU8bo und HPU8sl sowie HPU7su a und HPU7rn a

Messstelle	Rechenwerte der Strömungsgeschwindigkeit	
	Anzahl	Werte [m/s]
HPU7su	4	-0.3, <b>-0.1</b> , 0.05, 0.2
HPU7rn	4	-0.5, -0.3 <sup>8</sup> , <b>-0.1</b> , 0.1
HPU8sl	3	-0.4, -0.15, 0.1 <sup>9</sup>
HPU8bo	3	0.2 <sup>5</sup> , <b>0.4</b> , 0.6
HPU7su a	2	0.1 <sup>10</sup> , 0.3
HPU7rn a	5	-0.5, <b>-0.3</b> , <b>-0.1</b> , 0.1 <sup>3</sup> , 0.3

**Tab. 1.2:** Rechenwerte der Strömungsgeschwindigkeit an den Messstellen HPU7su, HPU7rn, HPU8bo und HPU8sl sowie HPU7su a und HPU7rn a. *kursiv:* Häufigste Strömungsgeschwindigkeit. **Fett:** Zusätzlich eingeführte Rechenwerte der Strömungsgeschwindigkeit (näheres siehe Text).

Die Strömungsbibliothek wurde erzeugt für eine stabile, neutrale und labile thermische Schichtung. Eine stabile thermische Schichtung herrscht vorwiegend im Sommer vor, wenn die Luft im U-Bahnhof kälter ist als die Umgebungsluft im Freien. Im Winter ist der umgekehrte Fall zu beobachten: Die Luft im U-Bahnhof ist wärmer als die Umgebungsluft im Freien. Diese Situation ist labil, da die Warmluft tendiert nach oben aufzusteigen bzw. die Kaltluft von außen in den U-Bahnhof nach unten einbricht. Die Strömungsmuster sind teilweise zufällig oder auch hochgradig instationär. Bei neutraler thermischer Schichtung herrscht Temperaturgleichheit zwischen der Luft im U-Bahnhof und Umgebungsluft im Freien.

Bei stabiler und neutraler Schicht ergeben sich bei der Strömungsberechnung mit PHOENICS die Geschwindigkeiten und somit die Volumenströme aus den U-Bahnhofausgängen ins Freie aus den gesetzten Randbedingungen (= keine atmosphärischen Druckunterschiede an den U-Bahnhofausgängen ins Freie). Geschwindigkeiten an den Messstellen HPU7su a und HPU7rn a müssen nicht spezifiziert werden.

<sup>8</sup> Häufigster Wert ab- bzw. aufgerundet, da so besser in Zahlenreihe passend.

<sup>9</sup> Wert geändert von 0 m/s auf 0.1 m/s, damit sich ein definierter Schadstofftransport vom U-Bahnhof in Richtung zu dieser Messstelle einstellt.

<sup>10</sup> Häufigster Wert und 10-Perzentilwert zusammengefasst.

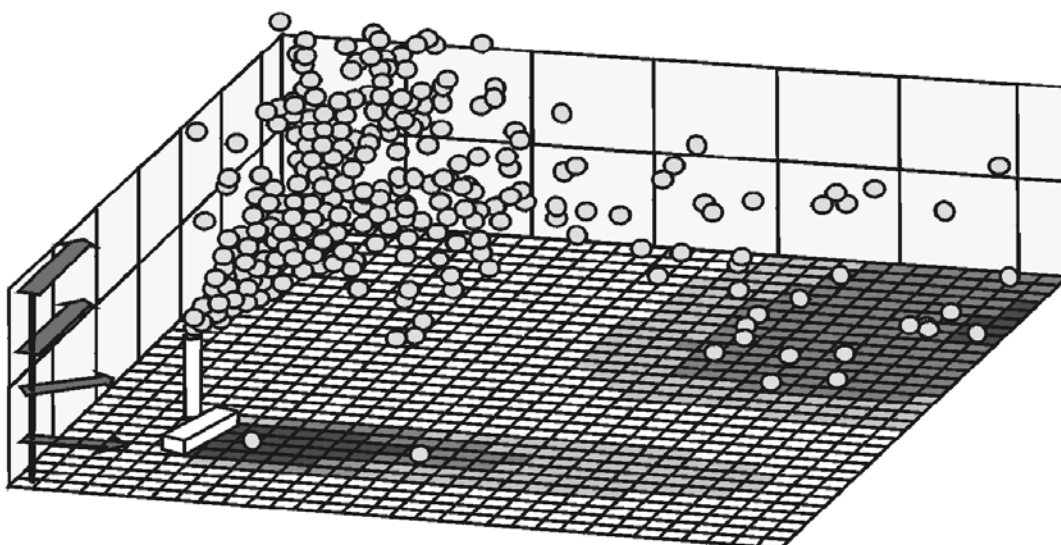
Bei labiler thermischer Schichtung hingegen müssen aus den oben genannten Gründen auch die Geschwindigkeiten an den Messstellen HPU7su a und HPU7rn a zur Beschreibung der Strömung im U-Bahnhof herangezogen werden. Deswegen enthält die Strömungsbibliothek für die labile Schichtung mehr Situationen als für neutrale bzw. stabile Schichtung.

Konkret enthält die Strömungsbibliothek für neutrale bzw. stabile Schichtung jeweils  $4 \times 4 \times 3 \times 3 = 144$  Einzelsituationen (vgl. **Tab. 1.2**, Produkt aus Spalte „Anzahl“ für Messstelle HPU7su, HPU7rn, HPU8sl und HPU8bo) und für labile Schichtung  $4 \times 4 \times 3 \times 3 \times 2 \times 5 = 1440$  Einzelsituationen.

Mit der verwendeten nicht-parallelisierten Version von PHOENICS beträgt die Rechenzeit für die Simulation einer Einzelsituation ca. 7h. Die Gesamt-Rechenzeit zum Erzeugen der Strömungsbibliothek betrug somit ca. 500 Tage. Durch Einsatz eines 8-Kern-PCs konnte die Strömungsbibliothek in ca. 2 Monaten erzeugt werden.

## 1.6 Das Lagrangesche Ausbreitungsmodell LAU-B zur Simulation der Gefahrstoffausbreitung im U-Bahnhof

Ein Lagrange- oder Partikelmodell emittiert vom Ort der Schadstoffquelle modellinternen Teilchen, die von ihrem jeweiligen Ort zum Zeitpunkt  $t$  aus translatorisch während eines Zeitschritts  $\Delta t$  mit der lokal vorherrschenden mittleren Windgeschwindigkeit weiter transportiert werden und zusätzlich eine zufällige Fluktuation erfahren. Mit dieser zufälligen Fluktuation wird die atmosphärische Turbulenz nachgebildet. Die Konzentration wird berechnet durch Auszählen der Teilchen, die sich während eines Beurteilungszeitraumes in einem Auszählvolumen befinden. Eine schematische Darstellung der Funktionsweise eines Lagrangeschen Ausbreitungsmodells zeigt **Abb. 1.8**.



**Abb. 1.8:** Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Lagrangeschen Ausbreitungsmodells

Im Lagrangeschen Ausbreitungsmodell *LAU-B* wird zu jedem Zeitschritt ein Markov-Prozesses simuliert (Legg und Raupach, 1982). Hieraus werden die drei Komponenten der Partikelgeschwindigkeiten  $v_i$ ,  $i=1,3$  zum neuen Zeitpunkt  $t + \Delta t$  als Funktion der mit dem CFD-Modell PHOENICS berechneten mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $V_i$  und einer Geschwindigkeitsfluktuation  $v_i'$  bestimmt:

$$v_i(t + \Delta t) = V_i + v_i'(t + \Delta t), \quad i = 1,3 \quad 1.1$$

$i=1$  steht für die x-,  $i=2$  für die y-Richtung und  $i=3$  für die z-Richtung eines kartesischen Koordinatensystems. Die Geschwindigkeitsfluktuationen  $v_i'$ ,  $i=1,3$  ergeben sich aus einem gewichteten Mittel aus Geschwindigkeitsfluktuationen zum letzten Zeitpunkt und einem zufälligen Anteil:

$$v_i'(t + \Delta t) = a_i \cdot v_i'(t) + \sqrt{(1 - a_i^2)} \cdot \sigma_{v_i} \cdot \xi, \quad i = 1,3 \quad 1.2$$

In Gl. 1.2 sind  $a_i$  die Lagrangeschen Autokorrelationsfunktionen,  $\sigma_{v_i}$  die Streuung der Geschwindigkeitsfluktuationen und  $\xi$  eine normalisierte Gauß-verteilte Zufallszahl. Mit Gl. 1.2 wird modelliert, wie schnell die Turbulenz ihr „Gedächtnis“ verliert. Sind die  $a_i$ -Werte z.B. Null, so sind die Geschwindigkeitsfluktuationen zum neuen Zeitpunkt vollkommen unkorreliert mit den Geschwindigkeitsfluktuationen zum letzten Zeitpunkt, d.h. sie haben ihren alten Zustand vollständig vergessen.

Die Lagrangeschen Autokorrelationsfunktionen  $a_i$  werden als Funktion der Lagrangeschen Zeitskalen  $T_{ii}$  approximiert:

$$a_i = \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{ii}}\right), \quad i = 1,3 \quad 1.3$$

Die Streuung der Geschwindigkeitsfluktuationen  $\sigma_{v_i}$  können aus der Turbulenzenergie abgeleitet werden, die aus der Strömungssimulation mit dem CFD-Modell PHOENICS zur Verfügung steht. Es zeigt sich jedoch, dass die Werte für den Anwendungsfall U-Bahnhof signifikant zu gering sind. Ersatzweise wurden die Streuung der Geschwindigkeitsfluktuationen dem Betrag der gemessenen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten an den Tunnelportal-mündern gleich gesetzt.

Die Lagrangeschen Zeitskala  $T_{ii}$  sind ein Maß für die Lebensdauer von Turbulenzstrukturen. Aus Beobachtungen im U-Bahnhof Hermannplatz lassen sich Werte von 10 Sekunden als geeignete Lagrangesche Zeitskala angeben. Nach den 3 Raumrichtungen wird hierbei nicht differenziert.

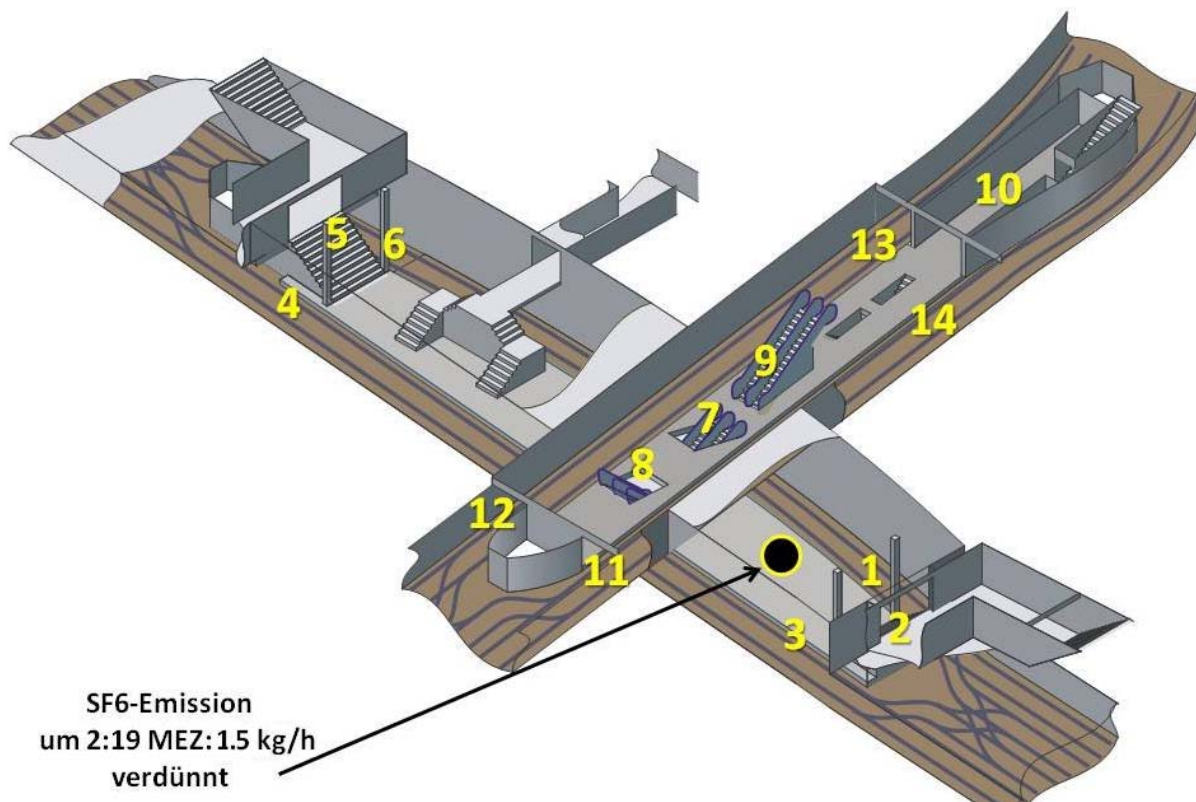


## 1.7 Simulation der Strömung und der Ausbreitung für das SF<sub>6</sub>-Ausbreitungsexperiment am 03.12.2008

Im folgenden werden Ergebnisse des Modells U-BSAM für ein nachgerechnetes SF<sub>6</sub>-Ausbreitungsexperiment vorgestellt. Die Ausbreitungsrechnung wird zum einen mit einer aus der Strömungsfeldbibliothek entnommenen, dreidimensionalen Strömungsverteilung (Basis: klassifizierte Geschwindigkeiten) und zum anderen mit einer speziell für den Zeitpunkt berechneten, dreidimensionalen Strömungsverteilung (Basis: aktuelle Strömungsmessdaten) durchgeführt und verglichen.

In der Nacht vom 02.12.2008 zum 03.12.2008 wurde im U-Bahnhof Hermannplatz während der Betriebsruhe von dem Projektpartner RUB im Rahmen des TP6 ein SF<sub>6</sub>-Ausbreitungsexperiment durchgeführt. Lage der Quelle und der 14 Messpunkte im U-Bahnhof sind in **Abb. 1.9** eingetragen. Die Freisetzung fand statt zwischen 2:19 h und 2:29 h. Die Freisetzungsdauer war somit 10 min. Der SF<sub>6</sub>-Freisetzungsmassenstrom betrug ca. 1.5 kg/h.

Für die Ausbreitungssimulation mit dem Lagrangeschen Modell wurde eine Partikelfreisetzungsrate von 6000 Partikel pro Minute gewählt. Eine Variation dieser Partikelfreisetzungsrate zeigt keine signifikante Veränderung der Ergebnisse.



**Abb. 1.9:** Lage der Quelle und der Messpunkte des SF<sub>6</sub>-Experiments am 03.12.2008. (Bildquelle: RUB)

**Tab. 1.3** und **Tab. 1.4** zeigen die Messwerte des SF<sub>6</sub>-Experiments am 03.12.2008 an den Messstellen M1 bis M14. In den beiden Tabellen bedeutet „Unten“ eine Messhöhe jeweils direkt in Bodennähe und „Oben“ eine in ca. 2.5 m über Grund.

In den **Abb. 1.10** bis **Abb. 1.13** sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. In den Abbildungen ist die unterschiedliche Ordinaten-Skalierung bis 8000 ppb in **Abb. 1.10** bis **Abb. 1.13** und bis 120 ppb in **Abb. 1.14** bis **Abb. 1.15** zu beachten. Generell ist zu beobachten, dass die simulierten Konzentrationsverläufe glatter sind als die gemessenen. Das liegt daran, dass die Simulationen auf 10-Minuten Mittelwerten der Geschwindigkeit basiert, das reale Zeitverhalten der Geschwindigkeit stark instationär war. Mit dem instationären Geschwindigkeitsverlauf lässt sich z.B. der Peak um 2:26 h am Messort M7 oben (vgl. **Abb. 1.10**) oder der stetige Anstieg von 2:22 h bis 2:29 h am Messort M8 unten (vgl. **Abb. 1.11**) erklären.

Des Weiteren fällt generell auf, dass nach Freisetzungsende (d.h. nach 2:29 h) die simulierte Konzentration mit einem gewissen zeitlichen Versatz, der gekoppelt ist mit dem Abstand zum Freisetzungsort, stetig abfällt. (An den von Freisetzungsort am weitesten entfernt gelegenen Messorten M10, M13 und M14, vgl. **Abb. 1.14** und **Abb. 1.15** noch nicht zu erkennen). Aus dem Verlauf der Messwerte kann dieses Verhalten nicht erkannt werden. Mögliche Erklärungen können sein, dass das Freisetzungsende entweder später war als angegeben oder dass der instationäre Geschwindigkeitsverlauf das SF<sub>6</sub> in weitaus entferntere Bereiche des U-Bahnhofs transportiert und somit auch zu späten Zeitpunkten wieder an den Messort heran transportiert werden kann. Für den Einsatz des Ausbreitungsmodells im OrGaMIR-Gesamtsystem ist diese Diskrepanz irrelevant, da bei der Anwendung für die Selbstrettungsphase (=Arithmetik A51) von einer nicht zeitlich begrenzten Freisetzung ausgegangen wird.

Der Konzentrationsverlauf an den Messstellen M1 bis M6 wird hier nicht dargestellt. Die gemessene Konzentration ist an diesen Messstellen gering, die berechnete Konzentration null. Mit „gering“ ist in diesem Fall „mindestens 2 Größenordnungen kleiner als die maximale Konzentration“ gemeint. Es ist nicht eindeutig klar, ob das Ausbreitungsmodell ein sogenanntes „false negative“-Ergebnis liefert, oder ob es sich um Messwerttauschen handelt.

Ein „false negative“-Verhalten des Ausbreitungsmodells ist im Kontext von OrGaMIR nicht erwünscht (vgl. Kap. 1.1, Anforderung 1), da es Gefahrenbereiche nicht sicher erkennt. Somit muss hierfür eine Erklärung gefunden werden. Eine mögliche Erklärung für die gemessenen Konzentrationen an den Messorten M1 bis M6 wäre zum einen

- ein Transport des SF<sub>6</sub> durch Advektion bzw. Turbulenz von der ausgebrachten Quelle zu den Messorten und zum anderen
- das Vorhandensein von Sekundärquellen bzw. sonstige Störeinflüsse.

Die Messorte M4 bis M6 liegen mehr als 100 m entfernt von der aufgestellten SF<sub>6</sub>-Quelle. Dort werden um 2:20 h, d.h. 1 Minute nach Freisetzungsbeginn bereits SF<sub>6</sub>-Konzentrationen von 22 ppb, 32 ppb und 34 ppb gemessen. Aus den Messungen der Strömungsgeschwindigkeit ist zu erkennen, dass sich im Zeitfenster von 2:20 h bis 2:36 h in der unteren Ebene eine mittlere Strömungsrichtung einstellt, die von den Messorten M4 bis M6 in Richtung der SF<sub>6</sub>-Quelle, und nicht umgekehrt, weist. Somit scheidet ein möglicher advektiver Transport von der SF<sub>6</sub>-Quelle hin zu den Messstellen M4 bis M6 aus. Hinzu kommt, dass Strömungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 100 m/1 Minute = 1.7 m/s erforderlich wären. Gemessen wurden jedoch deutlich geringere Geschwindigkeiten.

Somit ist zu vermuten, dass die niedrigen Messwerte an den Messstellen M4 bis M6 und im Analogieschluss dann auch bei M1 bis M3 auf das Vorhandensein von Sekundärquellen bzw. sonstige Störeinflüsse zurückzuführen sind und keine „false negative“-Antwort des Ausbreitungsmodells ist.

**Abb. 1.10** bis **Abb. 1.13** zeigen die gemessenen und mit dem Lagrange-Modell berechneten SF<sub>6</sub>-Konzentrationen während des SF<sub>6</sub>-Experiments am 03.12.2008 an den Messstellen M7 oben bzw. M7 unten, M8 oben bzw. M8 unten, M9 oben bzw. M9 unten und M11 oben bzw. M12 oben. Hier zeigt das Ausbreitungsmodell eine richtige Systemantwort, d.h. an diesen Orten ist eine Schadstoffkonzentration sowohl gemessen als auch berechnet worden. Die Abweichung von Rechenwert zu Messwert ist teilweise deutlich größer als ein Faktor 2, was den gängiger Erwartungswert für den Vergleich von Messungen und Ausbreitungsrechnungen darstellt.

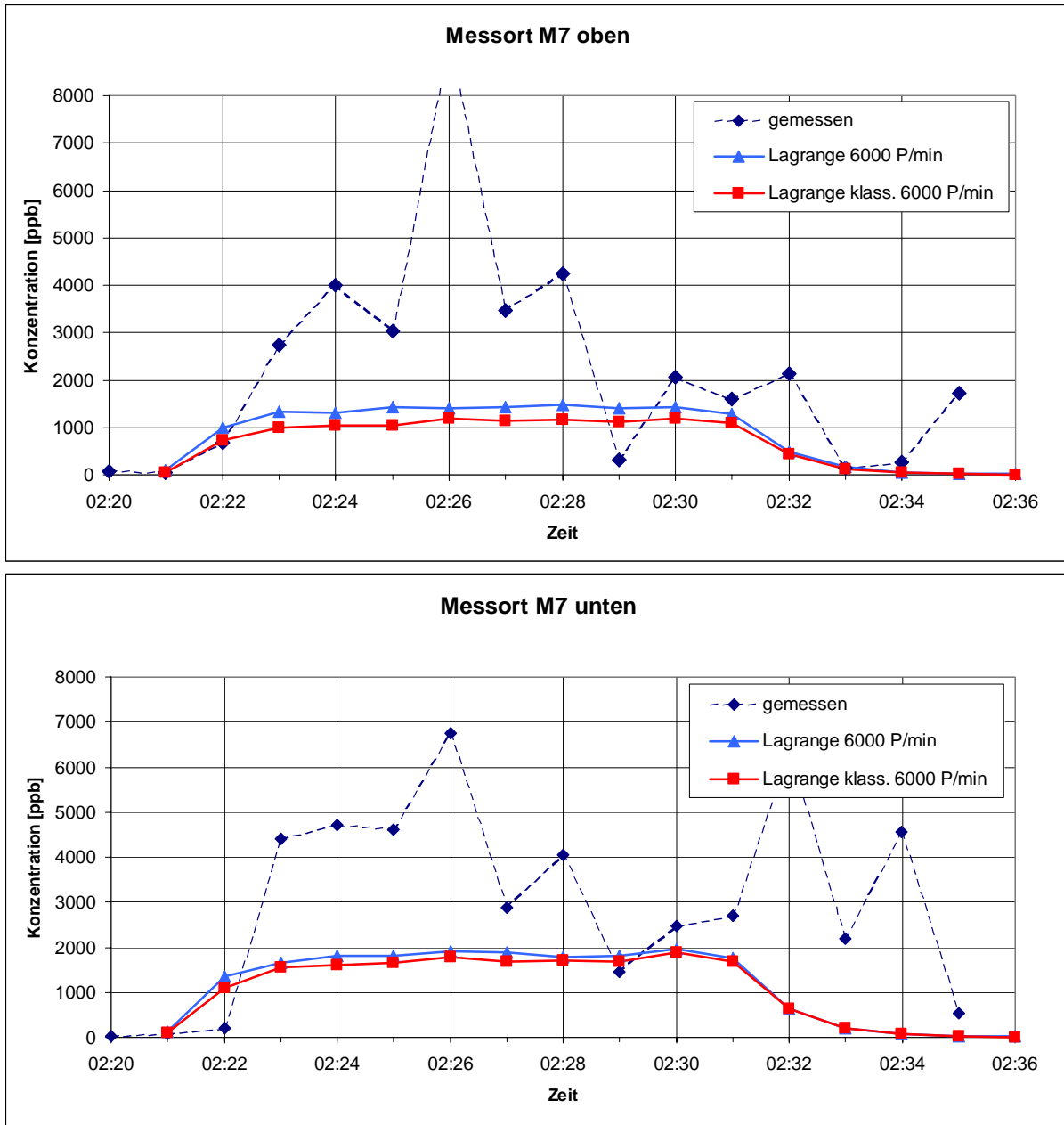
In OrGaMIR-Kontext (vgl. Kap. 1.1, Anforderung 4) sind diese Abweichungen jedoch tolerabel, da der Schwerpunkt darauf liegt, eine belastbare (d.h. keine „false negative“) und schnelle Aussage auf die Frage „Schadstoff vorhanden? Ja oder Nein“ zu erhalten.

OBEN							
Uhr	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
02:20	52	13	4	22	32	34	63
02:21	54	13	10	4	27	1	50
02:22	4	28	0	29	18	17	689
02:23	7	6	26	15	13	11	2730
02:24	18	8	9	2	3	2	3990
02:25	2	3	1	3	4	1	3040
02:26	6	0	2	25	8	15	9160
02:27	6	41	14	11	10	6	3460
02:28	16	53	25	29	19	9	4240
02:29	18	18	22	63	23	11	320
02:30	29	74	32	42	21	13	2060
02:31	6	41	1	39	3	14	1600
02:32	15	24	2	27	26	19	2140
02:33	37	19	23	35	14	16	138
02:34	7	18	19	30	19	2	269
02:35	1	64	16	143	32	2	1710
02:36							
UNTEN							
Uhr	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
02:20	22	16	4	34	16	12	14
02:21	25	2	59	9	20	8	70
02:22	35	7	16	18	24	14	194
02:23	28	72	24	24	31	5	4400
02:24	45	2	6	10	2	1	4720
02:25	21	5	3	6	29	10	4600
02:26	42	25	36	19	27	9	6760
02:27	11	15	35	19	24	14	2880
02:28	37	13	6	5	22	2	4040
02:29	5	88	19	31	22	31	1458
02:30	7	1	10	12	15	1	2460
02:31	17	9	19	19	5	14	2700
02:32	43	19	19	32	11	10	6360
02:33	3	2	18	20	15	11	2180
02:34	28	15	1	69	34	3	4560
02:35	5	22	26	87	6	32	528
02:36							

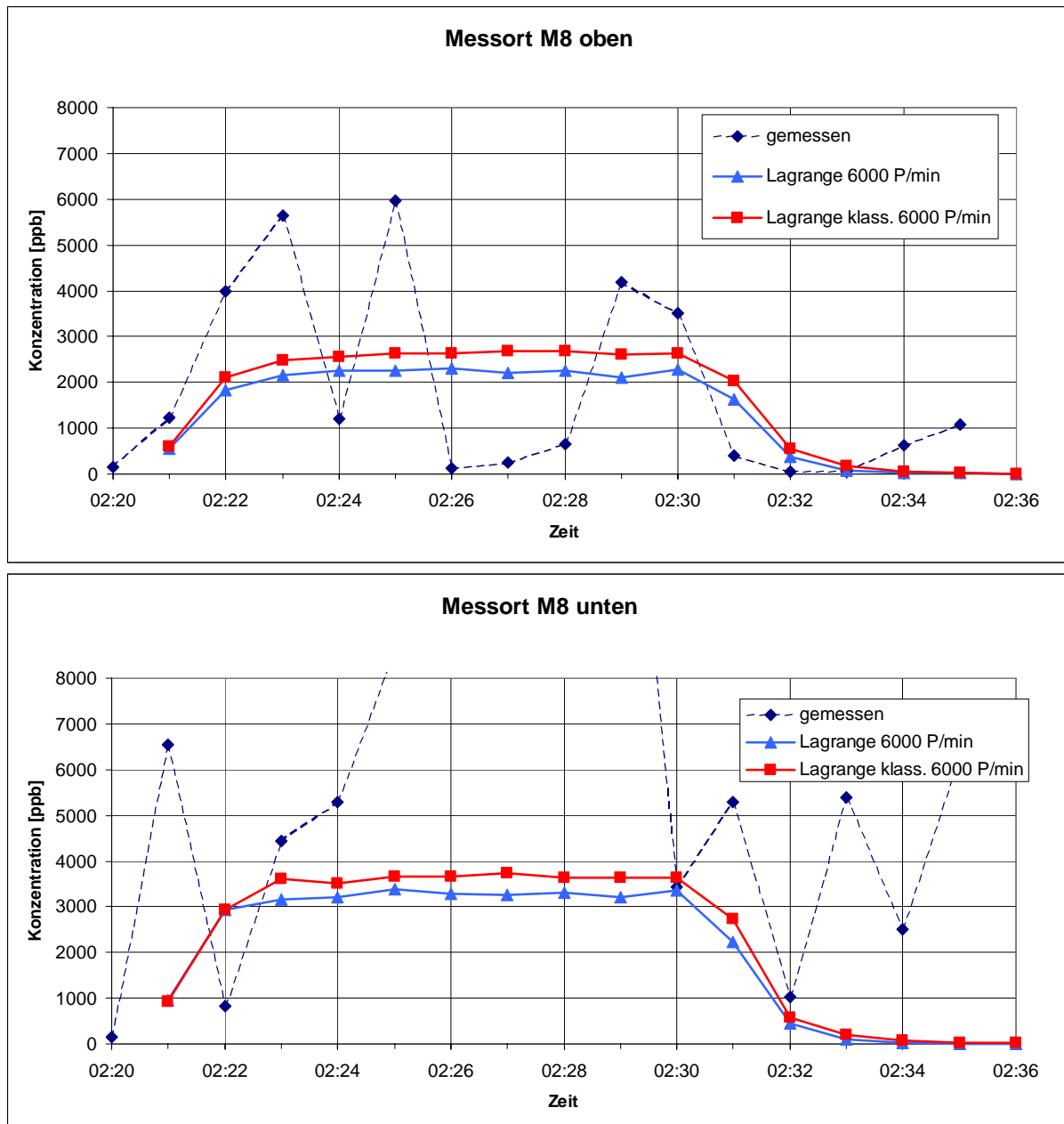
**Tab. 1.3** Messwerte in der Einheit [ppb] des SF<sub>6</sub>-Experiments am 03.12.2008 an den Messstellen M1 bis M7. Unten = jeweils in Bodennähe, Oben = in ca. 2.5 m über Grund. (Datenquelle: TP6, RUB).

OBEN							FARB- LEGENDE
M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	
139							
1240	72	7	10	5	42	57	
3990	29	7	3232	899	16	23	200-2000 ppb
5640	132	6	988	1270	9	39	2000-4000 ppb
1208	3096	20	768	4360	2	21	4000-8000 ppb
5960	3360	23	1110	2240	5	16	>8000 ppb
127	2780	7	1980	1676	11	14	
254	1578	0	464	3240	7	5	
654	2440	5	3100	3160	16	16	
4180	1830	9	3964	3732	14	10	
3520	3270	31	5000	2716	11	56	
396	2820	20	1960	688	11	25	
58,1	3960	33	2220	2200	21	24	
46,2	7640	4	1760	812	26	15	
637	4400	29	1900	662	23	43	
1070	2900	19	1506	614	19	12	
	3400	22	1824	992	33	10	
UNTEN							
M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	
157							
6540	17	25					
836	51	26					
4440	17	32					
5280	1620	31					
8600	414	18					
9000	1240	31					
10400	705	3					
14720	203	7					
16000	2040	39					
3440	2460	3					
5280	919	19					
1016	2930	2					
5400	2574	10					
2500	2140	24					
6320	3260	17					
	2920	35					

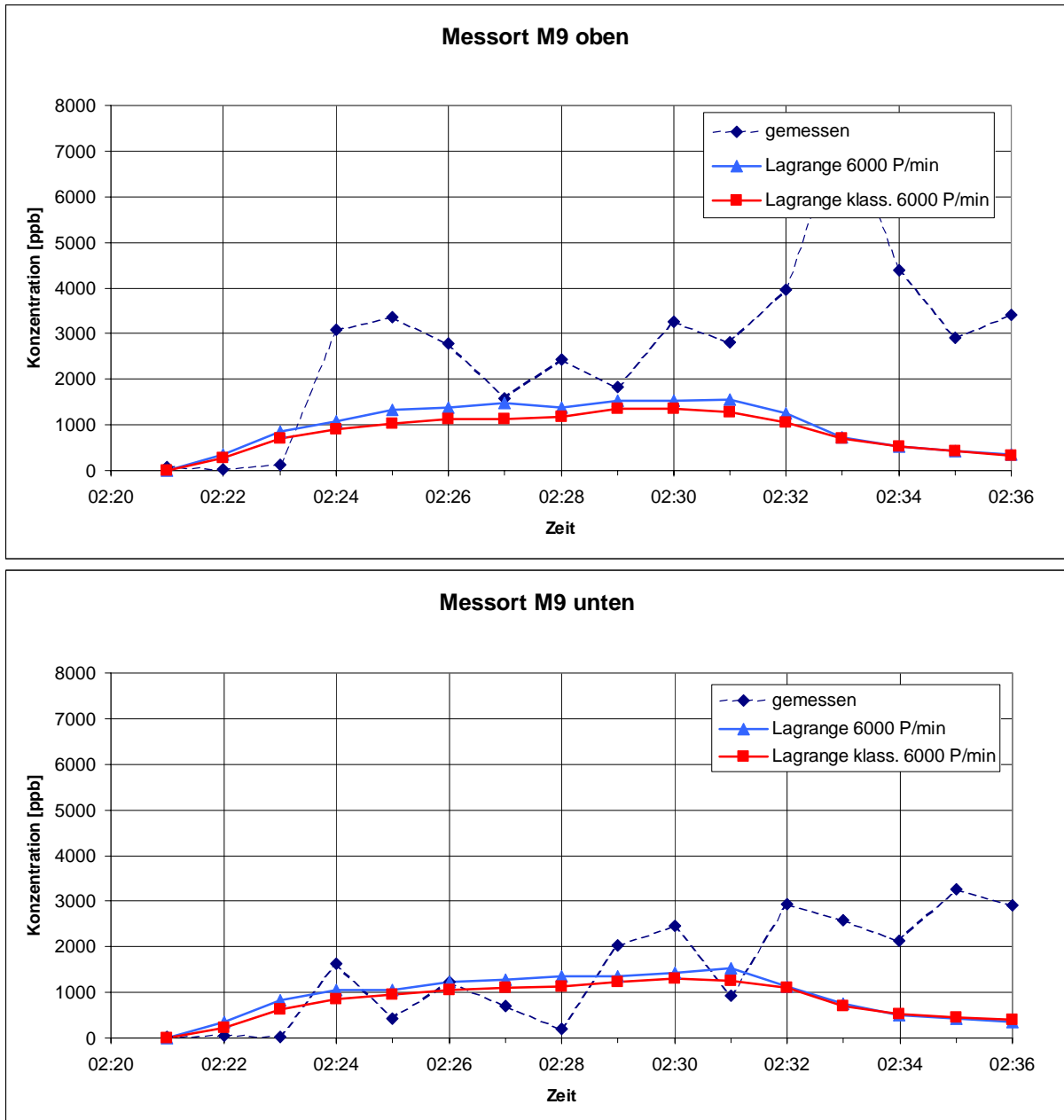
**Tab. 1.4** Messwerte in der Einheit [ppb] des SF<sub>6</sub>-Experiments am 03.12.2008 an den Messstellen M8 bis M14. Unten = jeweils in Bodennähe, Oben = in ca. 2.5 m über Grund. (Datenquelle: TP6, RUB).



**Abb. 1.10:** Gemessene und mit dem Lagrange-Modell berechnete SF<sub>6</sub>-Konzentrationen während des SF<sub>6</sub>-Experiments am 03.12.2008 an Messstelle M7 oben bzw. M7 unten.

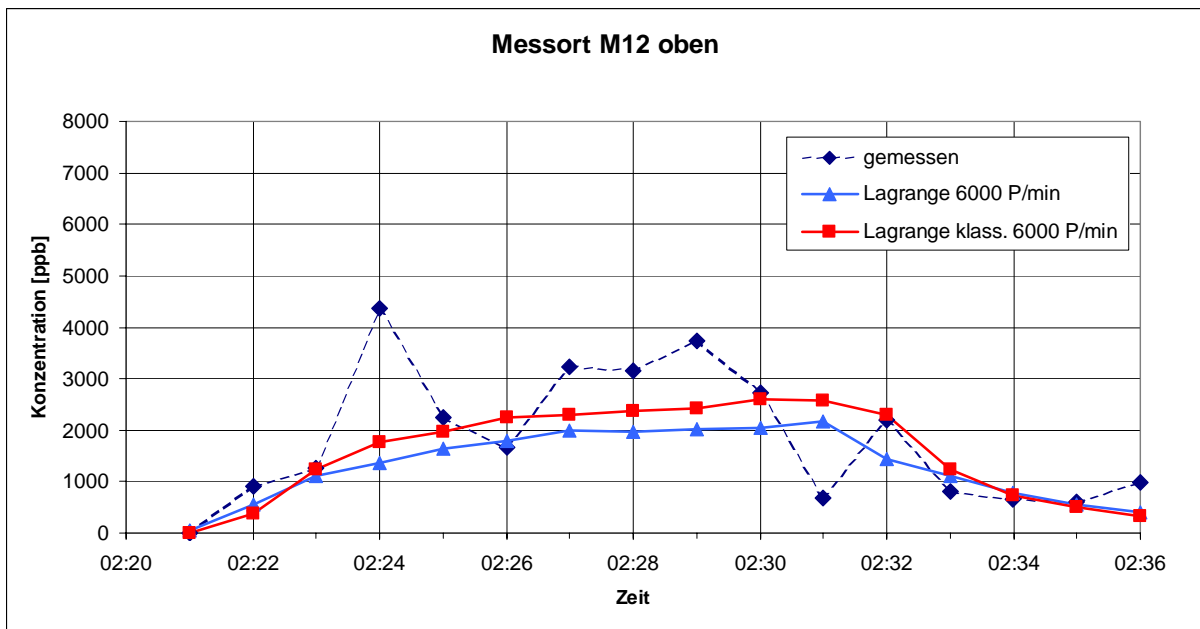
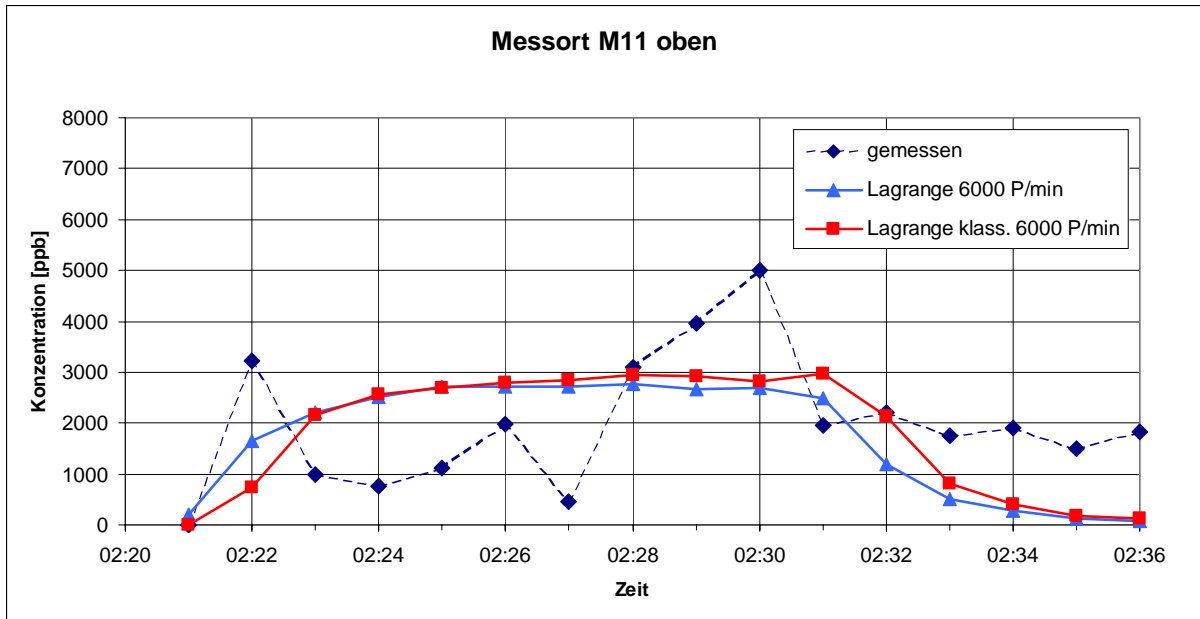


**Abb. 1.11:** Gemessene und mit dem Lagrange-Modell berechnete SF<sub>6</sub>-Konzentrationen während des SF<sub>6</sub>-Experiments am 03.12.2008 an Messstelle M8 oben bzw. M8 unten.

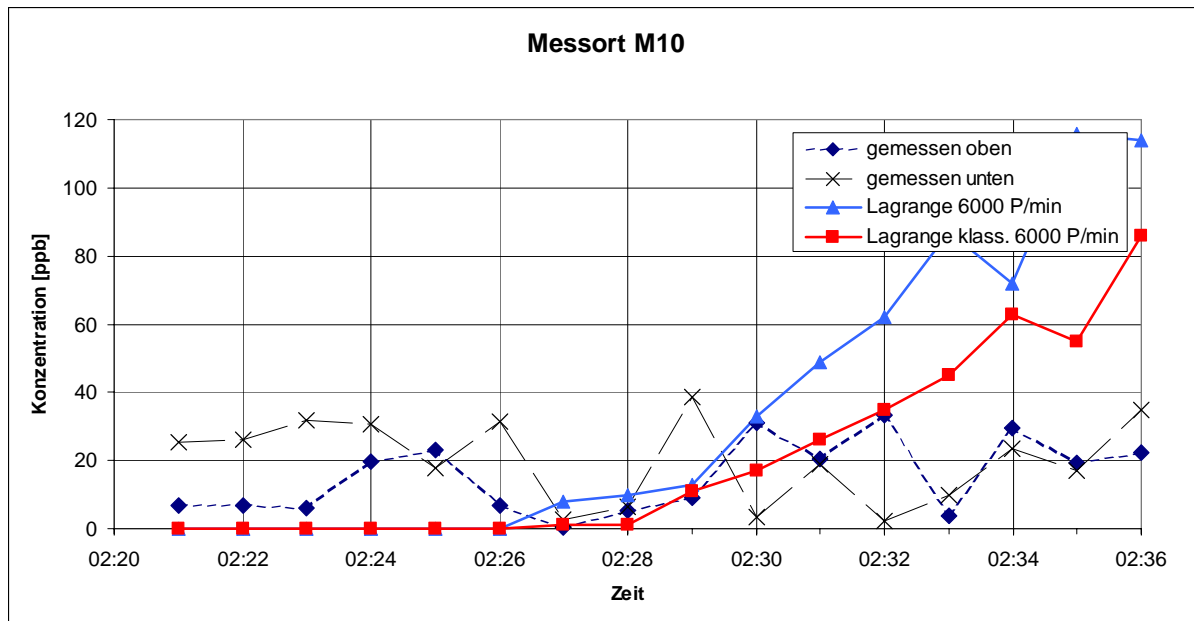


**Abb. 1.12:** Gemessene und mit dem Lagrange-Modell berechnete SF<sub>6</sub>-Konzentrationen während des SF<sub>6</sub>-Experiments am 03.12.2008 an Messstelle M9 oben bzw. M9 unten.





**Abb. 1.13:** Gemessene und mit dem Lagrange-Modell berechnete SF<sub>6</sub>-Konzentrationen während des SF<sub>6</sub>-Experiments am 03.12.2008 an Messstelle M11 oben bzw. M12 oben.

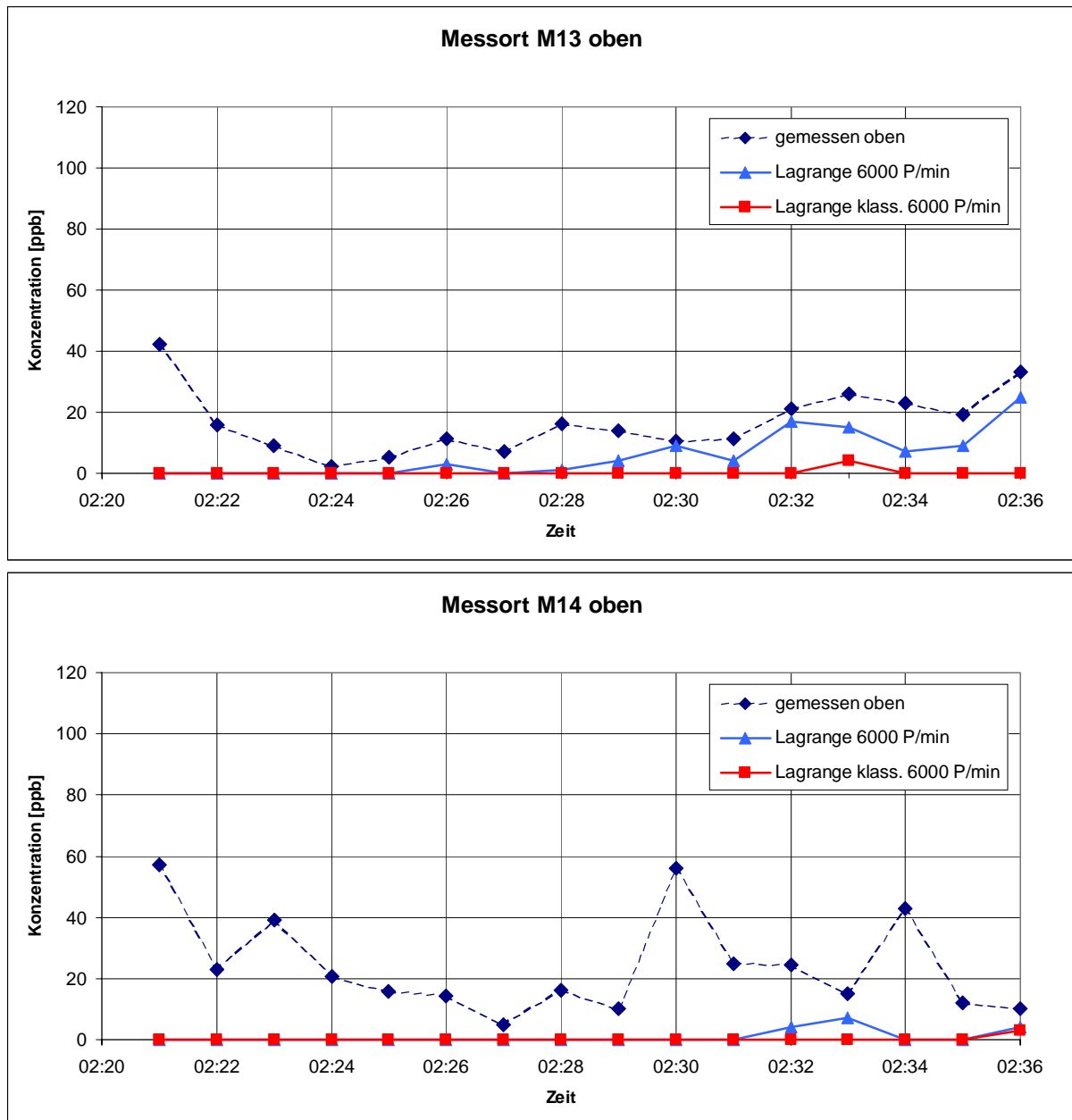


**Abb. 1.14:** Gemessene und mit dem Lagrange-Modell berechnete (Mittelwert aus Messort „Oben“ und „Unten“) SF<sub>6</sub>-Konzentrationen während des SF<sub>6</sub>-Experiments am 03.12.2008 an Messstelle M10.

**Abb. 1.14** und **Abb. 1.15** zeigen die gemessenen und mit dem Ausbreitungsmodell berechneten SF<sub>6</sub>-Konzentrationen an Messstelle M10 oben bzw. unten, M13 oben und M14 oben. An den Messstellen M10, M13 und M14 ist die SF<sub>6</sub>-Konzentration ebenso wie bei M1 bis M6 gering. Im Gegensatz zu M1 bis M6 ist jedoch die berechnete Konzentration größer null. Somit liefert das Ausbreitungsmodell auch an diesen Messstellen eine korrekte Systemantwort.

Auch in **Abb. 1.14** und **Abb. 1.15** fällt auf, dass zu Beginn des Ausbreitungsexperimentes an den Messstellen M10, M13 und M14 SF<sub>6</sub>-Konzentrationen gemessen wurden, das das bereits oben genannte Vorhandensein von Sekundärquellen bzw. sonstiger Störeinflüssen bekräftigt.

In **Abb. 1.10** bis **Abb. 1.15** sind jeweils 2 berechnete Konzentrationsverläufe eingezeichnet. Die blaue Kurve, gekennzeichnet mit Dreiecken, zeigt Simulationsergebnisse bei Verwendung eines speziell für das Ausbreitungsexperiment berechnete Strömungsfeld. Die rote Kurve, gekennzeichnet mit Quadraten, zeigt Simulationsergebnisse bei Verwendung eines Strömungsfeldes aus der Strömungsfeldbibliothek, d.h. mit klassifizierten Werte der Strömungsgeschwindigkeit an den Tunnelportalmündern und an den Aufgängen HPU7su a und HPU7rn a (vgl. **Abb. 1.1**).



**Abb. 1.15:** Gemessene und mit dem Lagrange-Modell berechnete  $\text{SF}_6$ -Konzentrationen während des  $\text{SF}_6$ -Experiments am 03.12.2008 an Messstelle M13 oben bzw. M14 oben.

Nur an Messstelle M13 oben (vgl. **Abb. 1.15**) sind die Konzentrationsverläufe, die mit nicht klassifizierten Strömungsfeldern (d.h. nicht aus der Strömungsfeldbibliothek, sondern speziell für die Strömungssituation während des Ausbreitungsexperimentes) berechnet wurden, signifikant näher an den gemessenen Konzentrationen.

## 1.8 Bestimmung des Freisetzungsortes auf Basis der Gefahrstoffsensoren und der Geschwindigkeitsmessungen im U-Bahnhof

Im Rahmen der Arithmetik A50 wird auf Basis der gemessenen Konzentrationen und Strömungsgeschwindigkeiten im U-Bahnhof der mögliche Freisetzungsort bestimmt.

Die möglichen Freisetzungsorte sind vordefiniert. Im Ereignisfall wird aus der Liste der vordefinierten Orte ein Freisetzungsort ausgewählt. Basis für die Definition der Freisetzungsorte ist die Vorgabe, mit den Strömungs- und Sensormessungen mindestens den Schenkel des Bahnsteiges, an dem die Schadgase freigesetzt werden, belastbar bestimmen zu können. Für den U-Bahnhof Hermannplatz mit den 2 Ebenen sind das 4 Schenkel (Im folgenden mit Freisetzungsort F1 bis F4 bezeichnet, vgl. **Abb. 1.16.**)

Darüber hinaus soll die Arithmetik A50 erkennen, ob Schadgase von außen, entweder über die U-Bahnhofein- bzw. ausgänge oder die Tunnelportalmünder in den U-Bahnhof gelangen. Der U-Bahnhof Hermannplatz hat 4 Ein- bzw. Ausgänge (Freisetzungsorte F5 bis F8) und 4 Tunnelportalmünder (Freisetzungsorte F9 bis F12). Da im Bereich der Verbindungstreppen zwischen U7 und U8 auch Gefahrstoffsensoren angebracht sind, werden hier zusätzlich 2 weitere Freisetzungsorte F13 und F14 definiert.

Die Koordinaten der 14 möglichen Freisetzungsorte werden in **Tab. 1.5** aufgelistet bzw. in **Abb. 1.16** graphisch dargestellt.

Die Arithmetik A50 ist so konzipiert, dass in einem ersten Schritt analysiert wird, ob Schadgase von außen entweder über die U-Bahnhofein- bzw. ausgänge oder die Tunnelportalmünder in den U-Bahnhof gelangen. Schlägt ein Gefahrstoffsensoren an diesen Orten an, wird dort die Strömungsrichtung analysiert: Wird Einströmen festgestellt, bedeutet dies, dass der Freisetzungsort nicht im U-Bahnhof liegt. Es wird der Freisetzungsort aus den Orten F5 bis F12 ausgewählt, der dem meldenden Gefahrstoffsensoren am nächsten liegt. Falls diese Konstellation vorliegt, ist Arithmetik A50 beendet. Falls Arithmetik A50 nicht beendet wurde, wird angenommen, dass sich der Freisetzungsort im U-Bahnhof befindet. Aus den möglichen Orten F1 bis F4 bzw. F13 und F14 wird derjenige Freisetzungsort ausgewählt, der dem meldenden Gefahrstoffsensoren am nächsten liegt.

ID	X [m]	Y [m]	Z [m]
F1	392978	5816310	28.2
F2	393035	5816280	28.2
F3	393027	5816340	32.8
F4	393008	5816280	32.8
F5	393022	5816324	35.5
F6	393041	5816378	32.8
F7	392941	5816330	30.5
F8	393054	5816266	30.5
F9	392917	5816353	27.2
F10	393078	5816238	27.2
F11	392992	5816249	31.8
F12	393062	5816397	31.8
F13	393011	5816299	30.7
F14	393014	5816290	30.7

**Tab. 1.5:** Vordefinierte Freisetzungsorte mit der ID F1-F14 (vgl. **Abb. 1.16**) im U-Bahnhof Hermannplatz. Horizontale Koordinaten im Koordinatensystem UTM(ETRS89), Zone Längengrad bzw. Breitengrad ist „33U“. Die Z-Koordinate ist Höhe über NN.

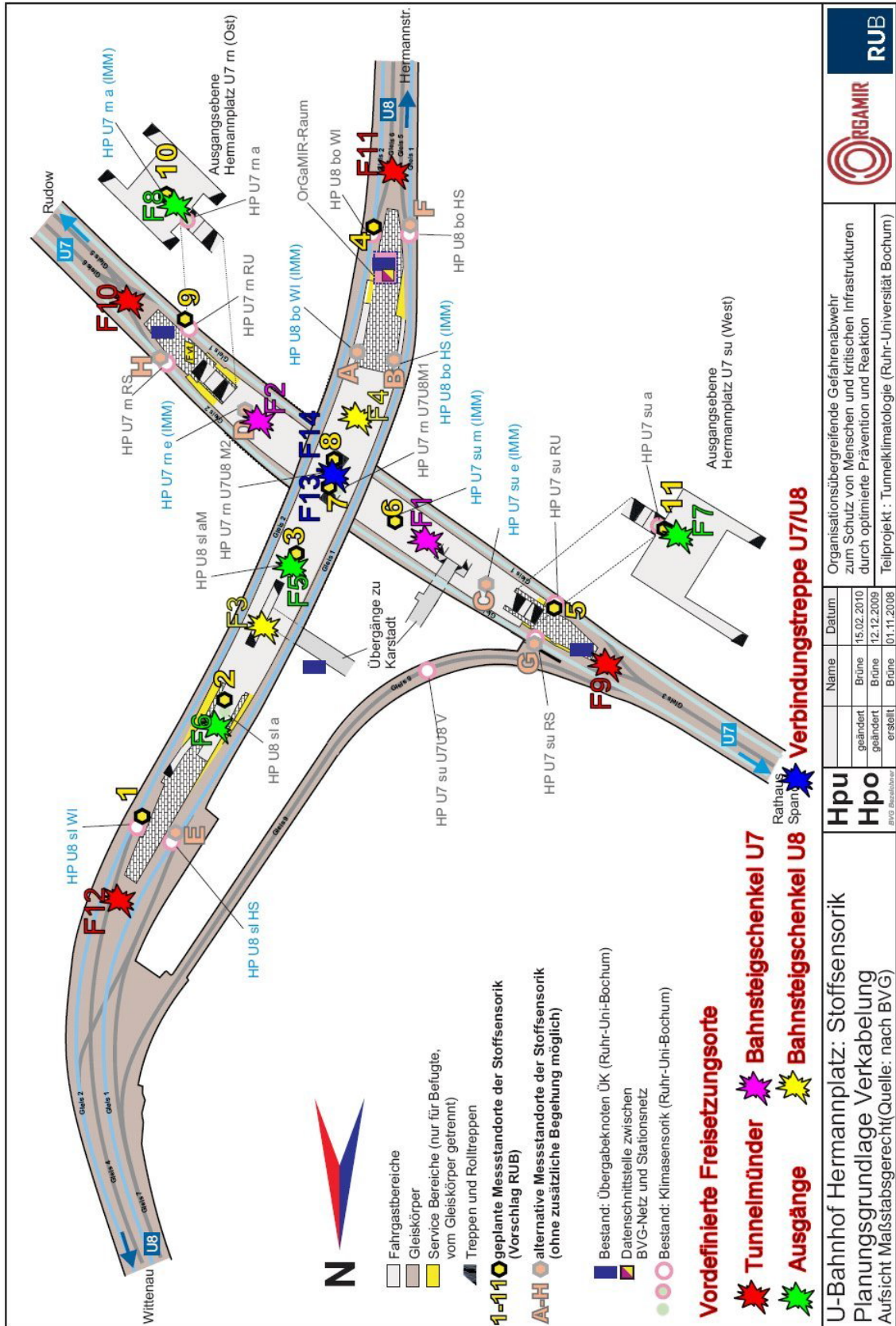


Abb. 1.16: U-Bahnhof Hermannplatz mit Messstandorten der Stoffsensorik (1-11) und den vordefinierten Freisetzungsorten (F1-F14) (Bildquelle: RUB).

## 1.9 Abschätzung des Freisetzungsmassenstromes auf Basis der von den Gefahrstoffsensoren gemessenen Konzentrationen

Theoretisch ist es möglich, den Freisetzungsmassenstrom bzw. Quellterm (Einheit: Masse pro Zeit, z.B. kg/s) abzuschätzen, d.h. rückzuberechnen auf Basis der von den Gefahrstoffsensoren gemessenen Konzentrationen (im folgenden in diesem Kapitel „Messwert“ genannt).

Für das OrGaMIR-Gesamtsystem ist die Quelltermrückrechnung jedoch nur anwendbar für den Stoff SF<sub>6</sub>. Grund hierfür ist, dass der Stoff SF<sub>6</sub> in den Messplattformen auch gemessen wird. D.h. bei Vorhandensein dieses Stoffes ist die Sensor-Messgröße die SF<sub>6</sub>-Konzentration und nicht die Konzentration von Folgeprodukten, sogenannten Hydrolyseprodukten.

Bei Gefahrstoffen wird jedoch nicht direkt die Gefahrstoffkonzentration gemessen, sondern die Konzentration von Hydrolyseprodukten. Aus der Konzentration der Hydrolyseprodukte lässt sich jedoch nicht direkt auf die Gefahrstoff-Konzentration rückwärts schließen. Dies schließt somit die Anwendung der Quelltermrückrechnung derzeit aus.

Im folgenden wird das Verfahren der Quelltermrückrechnung erläutert. Im Einsatz ist dieses Verfahren u.a. in dem von LOH entwickelten Softwaresystem SAM-S.

Mit der Durchführung einer Quelltermrückrechnung kann der vom Anwender angegebene Quellterm bzw. die ersatzweise angenommene Einheitsfreisetzungsrates  $Q(t)$  mit Hilfe von Messwerten korrigiert werden. Der korrigierte Quellterm wird mit  $Q'(t)$  bezeichnet. Zwischen  $Q(t)$  und  $Q'(t)$  wird ein einfacher Proportionalitätsansatz gewählt, der unter den folgende Annahmen Gültigkeit besitzt:

1. Der vom Anwender angegebene Quellterm bzw. die ersatzweise angenommene Einheitsfreisetzungsrates beschreibt den Freisetzungsverlauf qualitativ richtig. Im speziellen muss für das Ende der Freisetzung der richtige Zeitpunkt angegeben worden sein.
2. Das Ausbreitungsmodell beschreibt die dreidimensionale Konzentrationsverteilung qualitativ richtig.

Unter Zugrundelegung dieser Annahmen kann der Quellterm  $Q(t)$  um einen Quelltermkorrekturfaktor  $QKF$  korrigiert werden:

$$Q'(t) = QKF \cdot Q(t) \quad (1)$$

Die Bestimmung des Korrekturfaktors  $QKF$  erfolgt nach der Methode der kleinsten Quadrate. Das bedeutet, dass die Summe der gewichteten Quadrate der Abweichungen zwischen Messwert  $C_M(x,y)$  und Rechenwert  $C_R(x,y)$  minimal wird.

Aus Gleichung (1) wird nach der Methode der kleinsten Quadrate ein Funktional definiert:

$$F = \sum_{i=1}^N \left[ \left( C_{M,i}(x_i, y_i) - QKF \cdot C_{R,i}(x_i, y_i) \right)^2 \cdot f(C_{M,i}) \right] \quad (2)$$

mit der noch festzulegenden Wichtungsfunktion  $f(C_M)$ . Um den Korrekturfaktor  $QKF$  zu bestimmen, muss das Funktional  $F$  minimal werden. Dies wird erreicht, wenn  $F$  abgeleitet nach  $QKF$  gleich Null gesetzt wird:

$$\frac{\partial F}{\partial QKF} \stackrel{def}{=} 0 \quad (3)$$

Aus Gleichung (3) ergibt sich die Formel für den Quelltermkorrekturfaktor:

$$QKF = \frac{\sum_{i=1}^N C_{M,i}(x_i, y_i) \cdot C_{R,i}(x_i, y_i) \cdot f(C_{M,i})}{\sum_{i=1}^N C_{R,i}(x_i, y_i)^2 \cdot f(C_{M,i})} \quad (4)$$

Für die Wichtungsfunktion  $f(C_M)$  wird angesetzt:

$$f(C_M) = C_M^2 \quad (5)$$

Damit werden hohe Messwerte stärker gewichtet als niedrige Messwerte.

## 1.10 Einbindung der Softwaremodule in Verschaltungen des OrGaMIR-Gesamt-Softwaresystems

Die beschriebenen Softwaremodule sind im OrGaMIR-Gesamtsystem eingebunden als Arithmetiken A50, A51, A52 und A66. In der folgenden **Tab. 1.6** werden diese Arithmetiken nochmals stichwortartig beschrieben.



Arithmetik	Beschreibung
A50	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswahl des Freisetzungsortes aus einer Liste von möglichen Freisetzungsorten unter Verwendung der von den Gefahrstoffsensoren gemessenen Konzentrationen und den im U-Bahnhof sowie in den angrenzenden Tunnelportalmündern angebrachten Ultraschall-Anemometern zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit.</li> <li>• A50 liefert den Freisetzungsort nahezu ohne Zeitverzug, direkt nachdem von den Gefahrstoffsensoren ein Ereignis gemeldet worden ist.</li> <li>• Freisetzungsort wird für A51 und A52 benötigt. Der in A50 ausgewählte Freisetzungsort wird im OrGaMIR-Gesamtsystem solange verwendet bis manuell ein anderer Ort eingegeben worden ist.</li> </ul>
A51	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation der quasi-stationären Verteilung der Schadstoffwolke im U-Bahnhof mit dem Lagrangeschen Ausbreitungsmodell.</li> <li>• Auswahl eines geeigneten Strömungsfeldes aus der Strömungsfeldbibliothek auf Basis der im U-Bahnhof sowie in den angrenzenden Tunnelportalmündern gemessenen Strömungsgeschwindigkeit sowie der Temperaturschichtung.</li> <li>• Annahme einer Einheitsemission als Quellstärke. (Somit Berechnung von relativen Konzentrationen.)</li> <li>• Simulation mit niedriger Teilchenrate. Keine Prognoserechnung.</li> <li>• Rechenzeiten (derzeit): ca. 10 sec</li> <li>• Berechnete Konzentrationen werden u.a. für die Fluchtweglenkung verwendet. Hierfür werden die berechneten Konzentrationen an vordefinierten Orten an das OrGaMIR-Gesamtsystem zurückgegeben.</li> </ul>
A52	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulation der zeitabhängigen Verteilung der Schadstoffwolke im U-Bahnhof mit dem Lagrangeschen Ausbreitungsmodell.</li> <li>• Auswahl eines geeigneten Strömungsfeldes aus der Strömungsfeldbibliothek auf Basis der im U-Bahnhof sowie in den angrenzenden Tunnelportalmündern gemessenen Strömungsgeschwindigkeit sowie der Temperaturschichtung.</li> <li>• Eine Ausbreitungssimulation kann zu einem späteren Zeitpunkt wieder auf den Ergebnissen der letzten Ausbreitungsrechnung aufsetzen. (Simulation muss nicht immer bei Freisetzungsbeginn begonnen werden.)</li> <li>• Annahme einer Einheitsemission als Quellstärke oder Verwendung eines manuell eingegebenen Wertes.</li> <li>• Derzeit nur für SF<sub>6</sub>: Einbeziehung der von den Gefahrstoffsensoren gemessenen Konzentration in die Ausbreitungsrechnung für die Skalierung der berechneten Konzentrationsverteilung. Mit diesem Skalierungsfaktor kann die Quellstärke (d.h. die pro Zeit freigesetzte Menge) grob abgeschätzt bzw. korrigiert werden.</li> <li>• Ausgabezeitpunkte der berechneten Konzentration sind die aktuelle Zeit sowie Zeitpunkte in der Zukunft.</li> <li>• Freisetzungsende kann, falls die Freisetzung beendet ist, bei der Simulation berücksichtigt werden. (Zeitpunkt kann auch in der Zukunft liegen.)</li> <li>• Simulation mit hoher Teilchenrate. Wird so festgelegt, dass Rechenzeit weniger als 10 Minuten beträgt.</li> </ul>
A66	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bestimmung der in jedem Fall freien Ausgänge ohne den Freisetzungsort zu kennen.</li> </ul>

**Tab. 1.6:** Verwendung der Softwaremodule im OrGaMIR-Gesamt-Softwaresystem.

## 1.11 Ergebnisse der Arithmetiken A50, A51, A52 und A66 für verschiedene Szenarien

Im folgenden wird die Arbeitsweise der Arithmetiken A50, A51, A52 und A66 für ein Strömungsszenario und 2 Gefahrstoffsznarien gezeigt.

### 1.11.1 Definition Strömungsszenario 1: Häufigste Strömungsgeschwindigkeiten und stabile Schichtung

Für dieses Strömungsszenario werden für die Definition die jeweils häufigsten Strömungsgeschwindigkeiten verwendet (vgl. **Tab. 1.7**). Es wird eine stabile Schichtung angesetzt.

Die jeweiligen Strömungsgeschwindigkeiten sind in **Tab. 1.7** aufgeführt. Die Strömungsgeschwindigkeiten an den Messstellen HPU7su, HPU7rn, HPU8sl, HPU8bo sind jeweils Mittelwerte über 2 benachbarte Tunnelportalmünder. (Beispiel: Wert für HPU7su ist als Mittelwert aus Einzelwerten bei HPU7suRS und HPU7suRU zu verstehen).

In Arithmetik A51 und A52 werden bei stabiler Schichtung (vgl. Auch Kap. 0) die Strömungsgeschwindigkeiten an den Messstellen HPU7su a und HPU7rn a nicht verwendet, um das geeignete Strömungsfeld aus der Strömungsfeldbibliothek herauszusuchen. Die simulierten Werte an den beiden Messorten HPU7su a und HPU7rn a dienen in diesem Fall zur Kontrolle, ob sie mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

Messstelle	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
HPU7su	0.05 (= Ausströmen)
HPU7rn	-0.35 (= Einströmen)
HPU8sl	-0.15 (= Einströmen)
HPU8bo	0.25 (= Ausströmen)
HPU7su a	0.15 (= Ausströmen)
HPU7rn a	0.1 (= Ausströmen)

**Tab. 1.7:** Für Evaluationstest angesetzte Strömungsgeschwindigkeit an den Messstellen HPU7su, HPU7rn, HPU8bo und HPU8sl sowie HPU7su a und HPU7rn a.

Auf Basis der in **Tab. 1.7** angegebenen Strömungsgeschwindigkeiten und der Annahme einer stabilen Schichtung wird aus der Strömungsfeldbibliothek für die Simulationen in Arithmetik A51 und A52 das Strömungsfeld mit dem Dateinamen

T7W+0p05T7O-0p30T8S+0p20T8N-0p15HPU7sua-0p00HPU7rna-0p00\_stabil.phi.bin

verwendet. Horizontalschnitte der Geschwindigkeit in Ebene U7 und U8 in jeweils 1.5 m über Bahnsteigboden zeigt **Abb. 1.17**. Die Strömungsrichtung in Ebene U7 ist von Ost nach West und in Ebene U8 ist von Nord nach Süd. An den Verbindungstreppen zwischen U7 und U8 stellt sich eine nach oben gerichtete Strömung ein. An den beiden Ausgängen von der Ebene U8 ins Freie stellt sich ebenso eine nach oben gerichtete Strömung ein.

An den Messorten HPU7sua und HPU7rna wird für diesen Fall jeweils eine nach außen gerichtete Strömungsrichtung simuliert. Das ist auch die häufigste gemessene Strömungsrichtung. Somit ist für diesen Fall die Simulation an den Messorten HPU7sua und HPU7rna konsistent mit den Messungen.

### **1.11.2 Definition GefahrstoffszENARIO 1: Stoff-Detektion an Gefahrstoffsensorplattform 9**

Die Gefahrstoffsensorplattform 9 befindet sich in Ebene U7 im östlichen U-Bahn-Tunnelportalmund (Messstelle HPU7rnRU, vgl. **Abb. 1.16**). In Strömungsszenario 1 wird an dieser Messstelle HPU7rnRU und HPU7rnRS als Strömungsrichtung ein Einströmen festgelegt. Bei dieser Konstellation schlägt Gefahrstoffsensorplattform 9 an, wenn Luftbeimengungen aus dem Tunnel heran transportiert werden. Der Freisetzungsort liegt nicht im U-Bahnhof selbst.

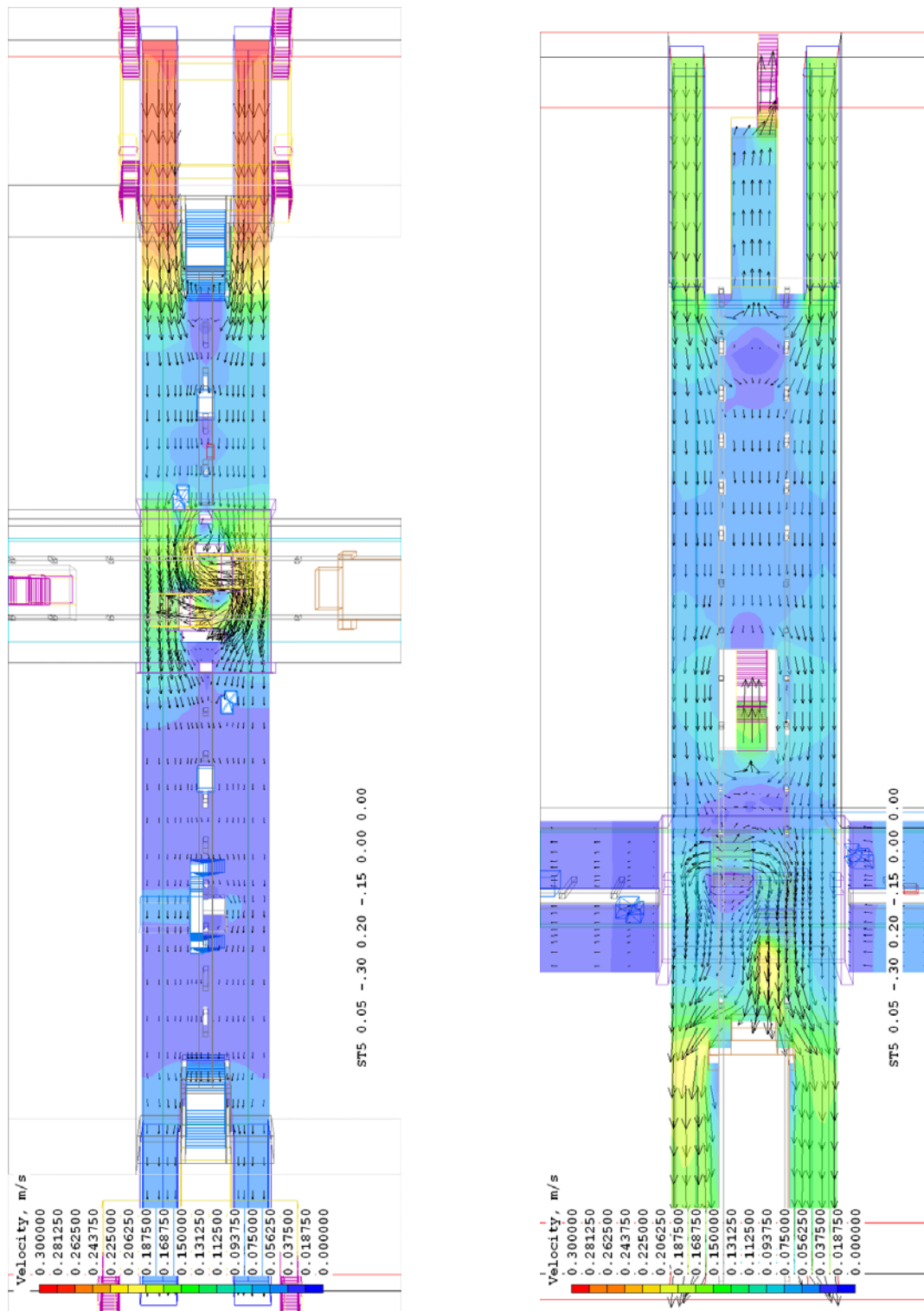
#### **1.11.2.1 Ergebnis von Arithmetik A50**

Arithmetik A50 liefert in diesem Fall als Freisetzungsort den vordefinierten Ort F10 (vgl. **Abb. 1.16** und **Tab. 1.5**).

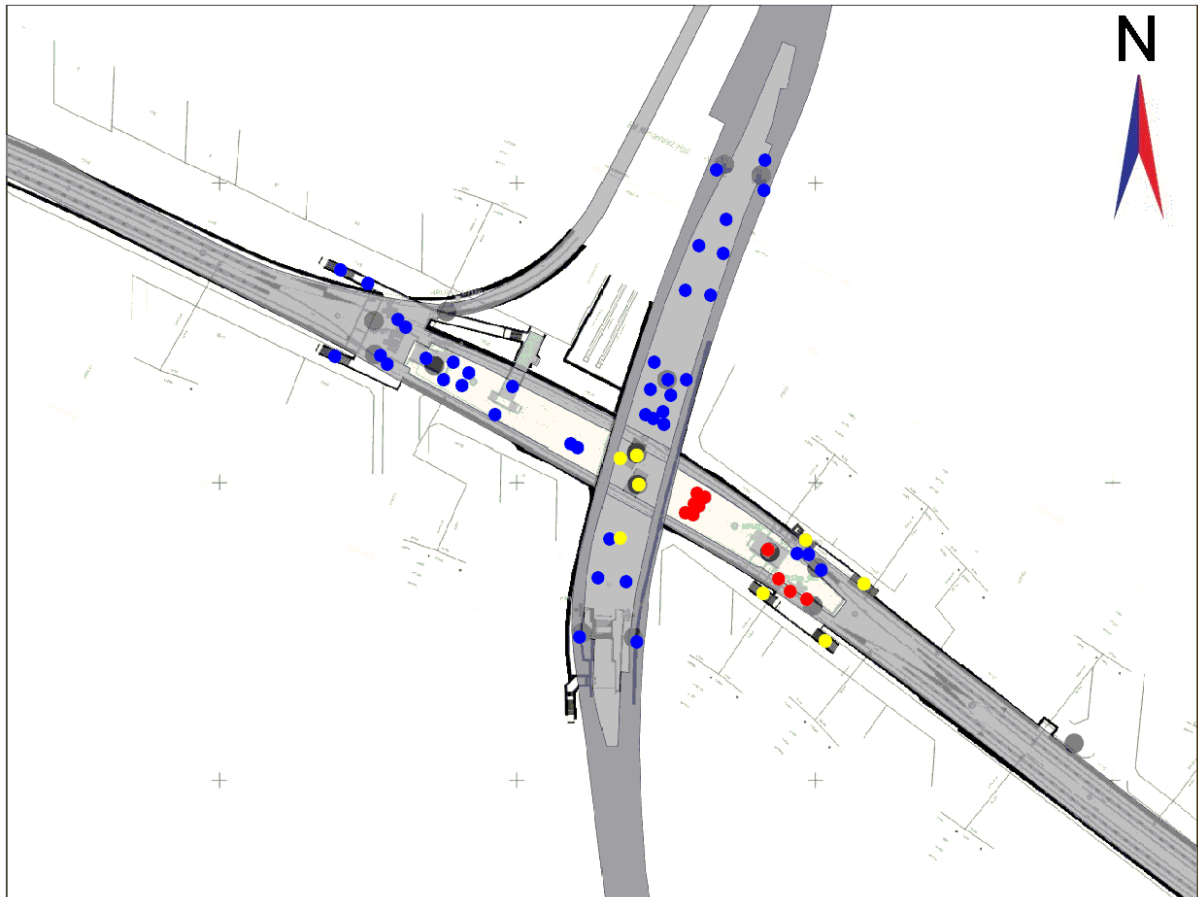
#### **1.11.2.2 Ergebnis von Arithmetik A51**

Arithmetik A51 liefert an vordefinierten Orten Konzentrationen, die für die Fluchtwegslenkung herangezogen werden. Freisetzungsort ist wie mit A50 bestimmt (vgl. Kap. 1.11.2.1). **Abb. 1.18** zeigt die mit Arithmetik A51 berechneten Konzentrationen an vordefinierten Orten im U-Bahnhof Hermannplatz. Blaue Kreise in **Abb. 1.18** markieren keine Gefahrstoffbelastung, gelbe und rote Kreise eine Gefahrstoffbelastung auf niedrigem bzw. hohem, auf die Maximalkonzentration bezogenen Konzentrationsniveau.

Ebene U7 (um 90 Grad gedreht dargestellt, Ebene U8 (oben=Norden)  
oben=Osten)



**Abb. 1.17:** Geschwindigkeitsverteilung in Ebene U7 (links) und U8 (rechts) jeweils in 1.5 m über Bahnsteigboden.



**Abb. 1.18:** Für Arithmetik A51 berechnete Konzentrationen an vordefinierten Orten im U-Bahnhof Hermannplatz. Blau: keine Gefahrstoffbelastung, gelb: Gefahrstoffbelastung (niedriges Niveau), rot: Gefahrstoffbelastung (hohes Niveau).

Für dieses Szenario sind

- der Ostschenkel von Ebene U7
- partiell der Südschenkel von Ebene U8
- die Verbindungstreppen zwischen U7 und U8 und
- die Ausgänge ins Freie von Ebene U7 an der Ostseite

mit Schadstoffen beaufschlagt und sollten nicht als Fluchtweg verwendet werden.

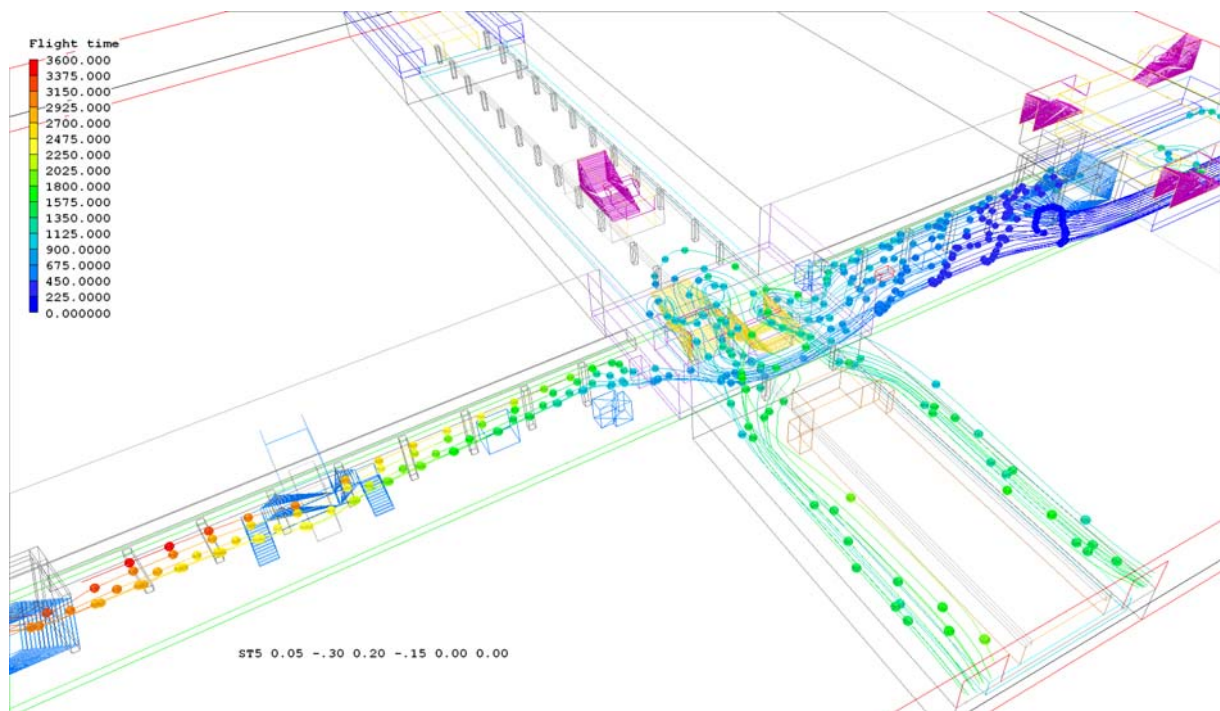
### 1.11.2.3 Ergebnis von Arithmetik A52

Die Arithmetik A52 liefert die zeitabhängige Konzentrationsverteilung im U-Bahnhof Hermannplatz. Freisetzungsort ist wie mit A50 bestimmt (vgl. Kap. 1.11.2.1). Die Visualisierung wird durch die Fa. INDANET GmbH realisiert. In **Abb. 1.19** werden nur die Trajektorienverläufe bis zu einer Flugzeit von maximal einer Stunde dargestellt. Trajektorien sind die Flug-

bahnen von virtuellen Luftpaketen auf Basis der mittleren Transportgeschwindigkeit, d.h. ohne turbulente Schwankungsbewegungen. Startort der Trajektorien ist der Freisetzungsort. Eine animierte Darstellung ist zu finden unter:

<http://www.youtube.com/watch?v=P90YBNDCJms>

Im Gegensatz zu der für A51 für die Selbststretungsphase berechneten Konzentrationsverteilung ist in **Abb. 1.19** zu erkennen, dass Schadstoffe zu späteren Zeitpunkten (d.h. nach den für die Selbststretungsphase angesetzten 10 Minuten) in den Westschenkel von Ebene U7 gelangen und den Südschenkel von Ebene U8 vollständig ausfüllen.



**Abb. 1.19:** Trajektorienverläufe im U-Bahnhof Hermannplatz. Farbverlauf gibt die Flugzeit an, d.h. benötigte Zeit vom Freisetzungsort bis zum dargestellten Ort. Zeit in Sekunden.

#### 1.11.2.4 Ergebnis von Arithmetik A66

Arithmetik A66 liefert als „in jedem Fall freien Zu- bzw. Ausgang“ keinen Ausgang ins Freie (wegen der Richtung der Strömung aus dem Bahnhof ins Freie), sondern den nördlichen Tunnelportalmund von Ebene U8. Zu beachten ist, dass dieser Zugang nur ausgewiesen wird, wenn der Parameter<sup>11</sup> „SensorStabilitaet“ einen Wert von über 50% hat.

<sup>11</sup> Der Parameter „SensorStabilitaet“ wird von Projektpartner RUB spezifiziert und beschreibt die zeitliche Konstanz der gemessenen Geschwindigkeiten.

### 1.11.3 Definition GefahrstoffszENARIO 2: Stoff-Detektion an Gefahrstoffsensormplattform 3

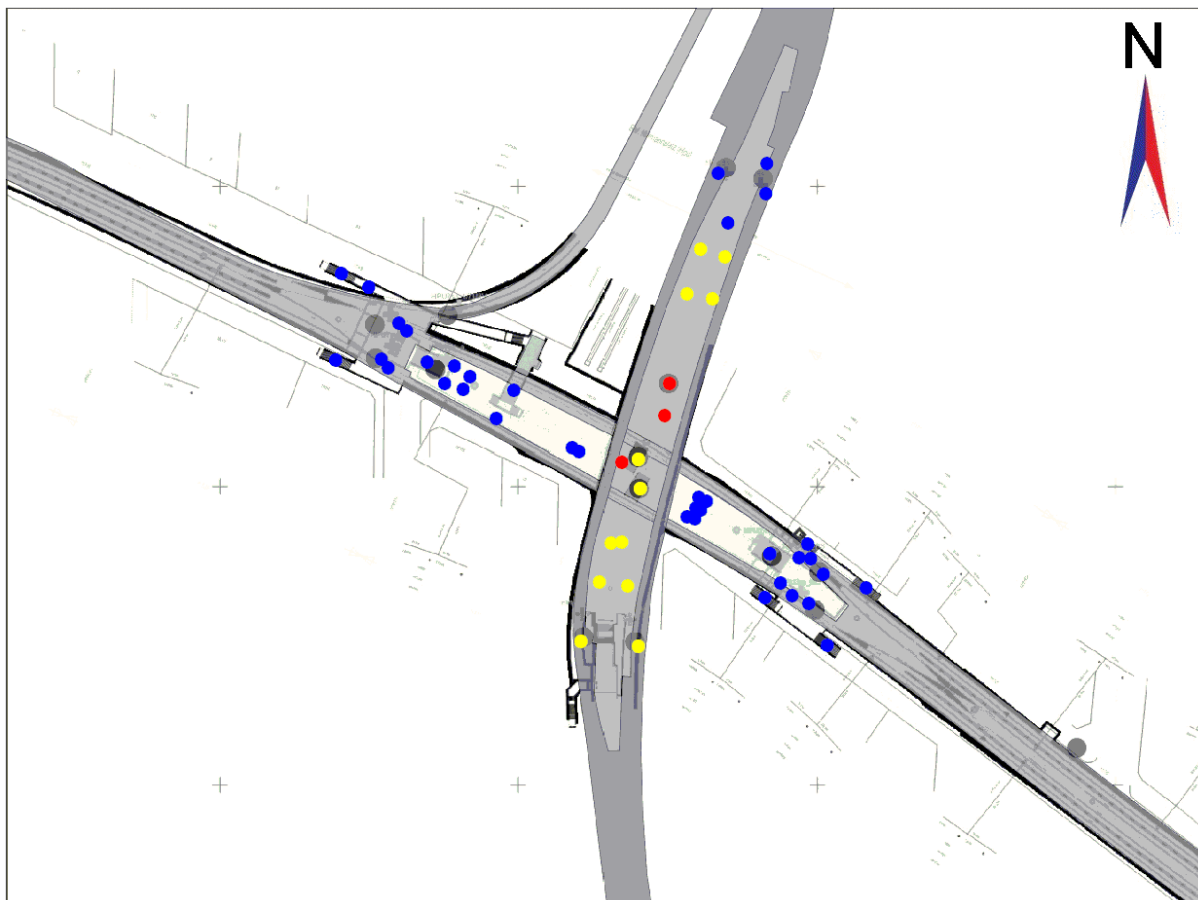
Die Gefahrstoffsensormplattform 3 befindet sich in Ebene U8 im nördlichen Bahnsteigschenkel. Im Gegensatz zu GefahrstoffszENARIO 1 liegt der Freisetzungsort im U-Bahnhof selbst.

#### 1.11.3.1 Ergebnis von Arithmetik A50

Arithmetik A50 liefert in diesem Fall als Freisetzungsort den vordefinierten Ort F3 (vgl. **Abb. 1.16** und **Tab. 1.5**).

#### 1.11.3.2 Ergebnis von Arithmetik A51

Freisetzungsort ist wie mit A50 bestimmt (vgl. Kap.1.11.3.1). **Abb. 1.20** zeigt die mit Arithmetik A51 berechneten Konzentrationen an vordefinierten Orten im U-Bahnhof Hermannplatz. Blaue Kreise in **Abb. 1.20** markieren keine Gefahrstoffbelastung, gelbe und rote Kreise eine Gefahrstoffbelastung auf niedrigem bzw. hohem, auf die Maximalkonzentration bezogenen Konzentrationsniveau.



**Abb. 1.20:** Für Arithmetik A51 berechnete Konzentrationen an vordefinierten Orten im U-Bahnhof Hermannplatz. Blau: keine Gefahrstoffbelastung, gelb: Gefahrstoffbelastung (niedriges Niveau), rot: Gefahrstoffbelastung (hohes Niveau).

Für dieses Szenario sind

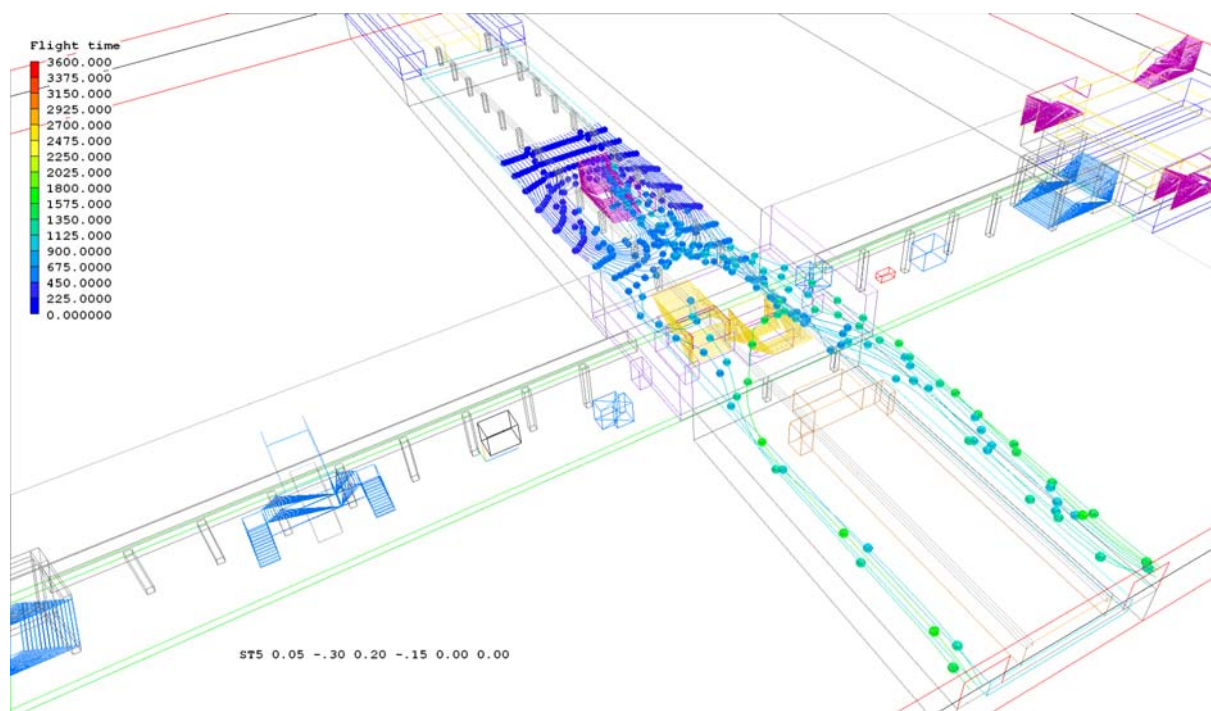
- der Nordschenkel von Ebene U8
- der Südschenkel von Ebene U8
- die Verbindungstreppen zwischen U7 und U8 und
- die Ausgänge ins Freie von Ebene U8 Mitte (=HP U8 sl aM)

mit Schadstoffen beaufschlagt und sollten nicht als Fluchtweg verwendet werden.

### 1.11.3.3 Ergebnis von Arithmetik A52

Freisetzungsort ist wie mit A50 bestimmt (vgl. Kap. 1.11.3.1). **Abb. 1.21** zeigt die Trajektorienverläufe (Definition siehe Kap. 1.11.2.3) bis zu einer Flugzeit von maximal einer Stunde.

Im Gegensatz zu Gefahrstoffszenario 1 (vgl. Kap. 1.11.2) ist die für A51 für die Selbststretungsphase berechnete Konzentrationsverteilung sehr ähnlich der für A52 berechneten Verteilung. Dies ergibt sich, da sich bei dieser Konfiguration nach 10 min bereits ein quasi-stationärer Zustand eingestellt hat, d.h. die Konzentrationsverteilung im U-Bahnhof keine Funktion der Zeit mehr ist.



**Abb. 1.21:** Trajektorienverläufe im U-Bahnhof Hermannplatz. Farbverlauf gibt die Flugzeit an, d.h. benötigte Zeit vom Freisetzungsort bis zum dargestellten Ort. Zeit in Sekunden.



### **1.11.3.4 Ergebnis von Arithmetik A66**

Arithmetik A66 liefert als „in jedem Fall freien Zu- bzw. Ausgang“ keinen Ausgang ins Freie (wegen der Richtung der Strömung aus dem Bahnhof ins Freie), sondern den nördlichen Tunnelportalmund von Ebene U8 sowie den östlichen Tunnelportalmund von Ebene U7. Zu beachten ist, dass diese Zugänge nur ausgewiesen werden, wenn der Parameter „SensorStabilitaet“ einen Wert von über 50% hat.

## **1.12 Gegenüberstellung erzielter Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen**

### **1.12.1 Änderungen bei den gewählten modelltechnischen Ansätzen im Projekt gegenüber der Antragsplanung**

Für die Strömungssimulation für das U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodell (U-BSAM) wird ein prognostisches Modell eingesetzt anstatt, wie im Antrag beschrieben, ein diagnostisches Strömungsmodell. Speziell zum Erreichen der Anforderung 1 (vgl. Kap. 1.1), d.h. möglichst keine „false negative“-Ergebnisse des Modells, ist eine von der Physik hochwertige Simulation zwingend erforderlich. Ein prognostische Modell ist in dieser Hinsicht dem diagnostischen deutlich überlegen. Es wird das CFD Modell PHOENICS hierfür verwendet. Der Nachteil der höheren Rechenzeit eines prognostischen Modells wird dadurch wettgemacht, dass Strömungsfelder für die verschiedenen, an den Tunnelportalmündern klassifizierten Strömungsgeschwindigkeiten vorab simuliert werden, die in einer Strömungsfeldbibliothek angelegt werden. Mit dem Prinzip einer Strömungsfeldbibliothek wurden mit dem Störfallsystem SAM-S bei der BASF AG, Ludwigshafen gute Erfahrungen gemacht. Mit SAM-S kann in bebauten Gebieten die luftgetragene Ausbreitung von nicht bestimmungsgemäß in die Atmosphäre freigesetzten Schadstoffen simuliert werden.

### **1.12.2 Änderungen zwischen den geplanten und den im Projekt realisierten Arbeiten**

Während der Laufzeit des Projektes kam es zu Verschiebungen in der Aufgabenverteilung. Die Visualisierung der aktuellen und der prognostizierten Konzentrationsverteilung wird von Projektpartner INDANET AG (IND, TP2) realisiert. LOH hat als zusätzliche Aufgabe die Bestimmung des Freisetzungsortes in der Selbstrettungsphase (Arithmetik A50, vgl. Kap. 1.8 und Kap. 1.10) übernommen. Darüber hinaus musste das U-Bahnhof-Schadstoffausbreitungsmodell so konzipiert werden, dass es sowohl für Arithmetik A51 (vgl. Kap. 1.2.1 sowie Kap. 1.10) als auch für Arithmetik A52 (vgl. Kap. 1.2.2 sowie Kap. 1.10) eingesetzt werden kann. Die Bereitstellung von Arithmetik A66 (vgl. Kap. 1.10) ist ebenso als zusätzliche Aufgabe während des Projektes hinzugekommen. Teilprojekt 3 (TP3) wird somit nur noch „Simulation“ und nicht mehr, wie in der Antragsphase zu finden, „Simulation und Visualisierung“ genannt.

## 2 WICHTIGE POSITIONEN DES ZAHLENMÄSSIGEN NACHWEISES

Neben den Personalkosten standen dem Zuwendungsempfänger die in der nachstehenden Tabelle bewilligten Mittel zur Verfügung.

<b>Kostenart</b>	<b>0838</b>	<b>0847</b>	
<b>Zweck</b>	<b>Reisekosten</b>	<b>Anlagekosten</b>	<b>Gesamt (ohne Personal)</b>
Bewilligt	€ 6.200	€ 1.900	€ 8.100

**Tab. 2.1** Überblick über die bewilligten Mittel (ohne Personalkosten)

## 3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT

Der Verlauf der Arbeit im Projekt folgte der im Projektantrag formulierten Planung sowie den im Kap. 1.12.2 dargelegten Änderungen. Diese Änderungen haben sich neutral auf den Ressourcenbedarf ausgewirkt, es waren keine zusätzlichen Ressourcen für das Projekt nötig. Alle im Projekt formulierten Aufgaben wurden erfolgreich bearbeitet.

## 4 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN

Im Rahmen des Projektes OrGaMIR wurde ein Demonstrator einwickelt, in dem die Module und Arithmetiken von LOH integriert sind. Somit kann der Demonstrator der im Gesamtantrag dargestellten Zielgruppe präsentiert werden. Die geplante Präsentation am 24.11.2010 im Rahmen des 56. Treffens des UITP<sup>12</sup> Unterkomitees "Operation" in Berlin musste leider kurzfristig abgesagt werden; eine Präsentation vor anderem Zielpublikum soll jedoch in 2012 nachgeholt werden.

Es wird sich somit in der Zukunft herausstellen, ob der Hauptinteressentenkreis der U-Bahnbetreiber sich von den Vorteilen eines solches Systems überzeugen lässt. Änderungen bei den gesetzlichen Rahmenbedingungen in Bezug auf das Thema „dynamische Fluchtweglenkung“ würden die Verbreitung unterstützen.

---

<sup>12</sup> International Association of Public Transport

## **5 WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS BEKANNT GEWORDENER FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN.**

Während der Durchführung des Vorhabens ist von anderer Seite auf dem Gebiet des Vorhabens von TP3 kein Fortschritt bekannt geworden. Neuere Veröffentlichungen z.B. David et al. (2010) berichteten von Offline-Simulationen in U-Bahnsystemen.

## **6 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DER ERGEBNISSE**

Über das Projekt OrGaMIR und Ergebnissen von TP3 wurde bisher in unserer Hauszeitung „LOHMEYER *aktuell*“, Ausgabe 24 vom Dezember 2010 berichtet. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse von LOH in TP3 ist in 2012 geplant.

## **7 LITERATUR**

Coke, L. R.; Sanchez, J. G.; Policastro, A. J. (2000): A model for dispersion of contaminants in the subway environment, 10th International Conference, Aerodynamics and Ventilation of Vehicles Tunnels, Boston, MA (US), 1.-3.11.2000, ANL/DIS/CP-101582.

David F. Brown, ANL, Lemont, IL; Liljegren, J.C. (2010): Applied numerical modeling of transport and dispersion in subway systems, Session 8: „Emergency Response, Environmental and Defense-related Dispersion Modeling Systems II“, AMS 16th Conference on Air Pollution Meteorology, Atlanta, USA.

Donnelly, R.P., Lyons, T.J., Flassak, Th. (2009): Evaluation of results of a numerical simulation of dispersion in an idealised urban area for emergency response modeling. Atmospheric Environment Volume 43, Issue 29, September 2009, Pages 4416-4423.

Green, B. R. (2001): Semi-empirical model of airflow and dispersion in a subway station. Thesis (M.S.), Universität von Illinois, USA.

Kang, K. (2007): Application of Code Approach for Emergency Evacuation in a Rail Station, Fire Technology, Volume 43, Number 4, 331-346

Legg, B.J., Raupach, M.R. (1982): Markov-chain simulation of particle dispersion in inhomogeneous flows: the mean drift velocity induced by a gradient in Eulerian velocity variance. Boundary-Layer Meteorology. 24: 3-13.

Skwarnicki, D. (2004): Airflow and smoke dispersion in a scale model subway station. Thesis (M.S.), Universität von Illinois, USA.

T\*AFSM: Contaminant Dispersion in a Model Subway Station, Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Rice University, Houston. Siehe <http://www.tafsm.org/PROJ/CD/subway.html>

VDI (2000): VDI 3945, Blatt 3: Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle – Partikelmodell.