



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Schadstoff- und Rauchkurz- schlüsse bei Strassentunneln

Emission and smoke recirculation in road tunnels

**Récirculation de polluants et de fumées dans les tunnels
routiers**

Pöyry Infra AG

Reto Buchmann, dipl. Ing. FH

Samuel Gehrig, dipl. Ing. ETH

Rehan Yousaf, MSc. Energy Conversion & Management

**Forschungsauftrag FGU 2008/007_OBF auf Antrag der Fachgruppe für
Untertagebau (FGU)**

November 2013

1435

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «Conclusioni del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Schadstoff- und Rauchkurz- schlüsse bei Strassentunneln

Emission and smoke recirculation in road tunnels

**Récirculation de polluants et de fumées dans les tunnels
routiers**

Pöyry Infra AG
Reto Buchmann, dipl. Ing. FH
Samuel Gehrig, dipl. Ing. ETH
Rehan Yousaf, MSc. Energy Conversion & Management

**Forschungsauftrag FGU 2008/007_OBF auf Antrag der Fachgruppe für
Untertagebau (FGU)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Reto Buchmann

Mitglieder
Samuel Gehrig
Rehan Yousaf

Begleitkommission

Präsident
George Anagnostou

Mitglieder
Felix Amberg
Martin Bosshard
Walter Steiner
Franz Zumsteg
Sacha Solari (bis 08.04.2012)

Antragsteller

Fachgruppe für Untertagebau (FGU)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	10
	Summary	13
1	Einleitung	16
1.1	Ausgangslage	16
1.2	Aufgabenstellung	16
1.3	Vorgehensweise	17
1.4	Abgrenzung der Arbeit	18
2	Theoretische und empirische Grundlagen	19
2.1	Phänomenologie der Rauchrezirkulation	19
2.2	Fahrzeugbrände in Strassentunneln	22
2.2.1	Allgemeines	22
2.2.2	Zeitlicher Verlauf der Energiefreisetzungsrate realer Brände	22
2.2.3	Rauchfreisetzung	24
2.2.4	Wannenbrände als Nachbildung realer Brände	26
2.2.5	Gefährdungspotential	30
2.2.6	Quantifizierung der Rezirkulation	35
2.2.7	Definitionen	35
2.2.8	Kritische Rezirkulation	36
2.3	Ereignislüftung in Strassentunneln	37
2.3.1	Natürliche Lüftung	37
2.3.2	Längslüftung	38
2.3.3	Rauchabsaugung	40
2.4	Atmosphärische Strömungen und Gelände	41
2.4.1	Wind und atmosphärische Grenzschicht	41
2.4.2	Atmosphärische Stabilität	42
2.4.3	Meteorologische Datenbanken der Schweiz	45
2.4.4	Auswirkung der Topographie	45
2.4.5	Portalabluft	46
2.4.6	Kaminabluft	49
2.5	Strömungskurzschlüsse an Tunnelportalen	52
2.5.1	Experimentelle Arbeit von Haerter & Baumann	52
2.5.2	Experimentelle Arbeiten von Maarsingh & Swart	53
2.5.3	Vermeidung von Strömungskurzschlüssen nach ASTRA 13001 2008	55
3	Beurteilung des Gefahrenpotentials durch Rezirkulation	56
3.1	Einleitung	56
3.2	Rezirkulation bei konstanter Rauchquelle mit Absaugung	56
3.3	Rezirkulation bei konstanter Rauchquelle mit Längslüftung	59
3.4	Wahrscheinlichkeitsbetrachtung	60
4	CFD-Modellierung und Validierung	63
4.1	Vorgehensweise	63
4.2	Experimenteller Aufbau von H.O. Baumann	63
4.3	Das CFD-Modell	65
4.3.1	Das Berechnungsgebiet	65
4.3.2	Das Gitter	66
4.3.3	Die Diskretisierung	67
4.3.4	Das Turbulenzmodell	68
4.4	Die Validierung	69
5	Portal-Portal-Rezirkulation	70
5.1	Einleitung	70
5.2	Das CFD-Modell	70

5.2.1	Das Berechnungsgebiet	70
5.2.2	Das Gitter.....	71
5.2.3	Die Simulationsparameter und Randbedingungen	73
5.2.4	Die Annahmen	75
5.2.5	Das Turbulenzmodell	76
5.2.6	Die numerischen Parameter.....	76
5.2.7	Die Simulationsmethodik.....	77
5.3	Die Auswertung.....	78
5.3.1	Die Validierung mit experimentellen Daten	78
5.3.2	Die Histogramme der Parameterwerte.....	81
5.3.3	Die Einzelauswertung.....	83
5.3.4	Vergleich mit der Fallstudie Habsburg-Tunnel.....	83
5.4	Synthese.....	91
5.4.1	Abgrenzung der Ergebnisse	91
5.4.2	Beobachtungen	91
5.4.3	Empfehlungen.....	91
6	Kamin-Portal-Rezirkulation.....	92
6.1	Einleitung.....	92
6.2	Das CFD-Modell.....	92
6.2.1	Das Berechnungsgebiet	92
6.2.2	Das Gitter.....	93
6.2.3	Die Simulationsparameter und Randbedingungen	94
6.2.4	Das Turbulenzmodell	95
6.2.5	Die numerischen Parameter.....	96
6.2.6	Die Simulationsmethodik	96
6.3	Die Auswertung.....	96
6.3.1	Die allgemeinen Tendenzen.....	97
6.3.2	Die Einzelauswertung.....	97
6.3.3	Die Histogramme der Parameterwerte.....	99
6.3.4	Die Auswertung mit dimensionsloser Kennzahl.....	102
6.3.5	Das Gefahrenpotential	104
6.3.6	Anwendungsbeispiel Aeschertunnel	105
6.4	Die Synthese.....	107
6.4.1	Abgrenzung der Ergebnisse	107
6.4.2	Beobachtungen und Empfehlungen.....	107
6.4.3	Diskussion	107
7	Schluss.....	109
7.1	Gefahrenpotential.....	109
7.2	Portal-Portal-Rezirkulation.....	110
7.2.1	Numerisches Experiment und Abgrenzung.....	110
7.2.2	Beobachtungen	110
7.2.3	Beurteilung bestehender Bauwerke	110
7.2.4	Empfehlung für zukünftige Bauwerke	110
7.3	Kamin-Portal-Rezirkulation.....	111
7.3.1	Numerisches Experiment und Abgrenzung.....	111
7.3.2	Beobachtungen	111
7.3.3	Beurteilung bestehender Bauwerke	111
7.3.4	Empfehlung für zukünftige Bauwerke	112
7.5	Ausblick	114
	Anhänge	115
	Abkürzungen	129
	Literaturverzeichnis	130
	Projektabschluss	135
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	138

Zusammenfassung

Ausgangslage

Bei Strassentunneln stellen Austrittsportale und Lüftungskamine konzentrierte Schadstoffquellen dar. Die Eintrittsportale nahgelegener Tunnelröhren und Sicherheitsstollen sind Strömungssenken. Zwischen diesen stellt sich in der Regel eine Quellen-Senken-Strömung bzw. ein Strömungskurzschluss ein. Die topographischen, konstruktiven und atmosphärischen Bedingungen können diese Strömungskurzschlüsse entweder verstärken oder vermindern. Diese Strömungskurzschlüsse – auch Rezirkulation genannt – beeinträchtigen oder verunmöglichen die Einhaltung der Lüftungsziele im Normalbetrieb und der Sicherheitsziele im Ereignisbetrieb. Daher ist dieses Phänomen grundsätzlich unerwünscht.

Gemäss der ASTRA-Richtlinie „Lüftung der Strassentunnel“ sind Strömungskurzschlüsse von Rauch und Schadstoffen von einer Tunnelröhre in eine andere und zwischen Abluftbauwerken und Aussenluftfassungen bzw. Portalen durch geeignete Massnahmen zu vermeiden. Diese Auflagen werden heute durch verschiedene aktive und passive Massnahmen berücksichtigt. Fundierte Grundlagen, die diese Massnahmen stützen, sowie konkrete und quantitative Vorgaben der zu erreichenden Ziele fehlen heute weitgehend. Zudem gibt es bezüglich der Strömungskurzschlüsse für die Erneuerungen von bestehenden Lüftungsanlagen mit fixer Portal- resp. Kaminposition keine Vorgaben. In aktuellen Projekten ergeben sich diesbezüglich laufend Fragen, die nicht hinreichend geklärt werden können.

Forschungsziel

Das vorliegende Forschungsprojekt hat zum Ziel, die Problematik der Strömungskurzschlüsse für neue und bestehende Tunnelanlagen umfassend zu untersuchen. Die Ergebnisse sollen in Zukunft als Grundlage für die Auslegung von Lüftungsanlagen sowie für Sanierungsmassnahmen bestehender Anlagen dienen. Hauptziel der Forschungsarbeit ist die Erarbeitung einer fundierten Grundlage zum besseren Verständnis und zur Beurteilung der Strömungskurzschlüsse (Rauch und Emission) bei Strassentunneln mit und ohne Lüftung. Dabei stehen folgende Aspekte im Vordergrund:

- Beurteilung des Gefahrenpotentials der Rauchrezirkulation;
- Entwicklung einer einfachen Methode zur Bewertung von Strömungskurzschlüssen und Massnahmen für neue und bestehende Lüftungsanlagen;
- Definition von Empfehlungen, klaren Vorgaben und Kompensationsmöglichkeiten.

Die verschiedenen Teile der Forschungsarbeit sind die folgenden:

- Die Entwicklung einer Methode zur Beurteilung des Gefahrenpotentials der Rauchrezirkulation;
- Die systematische Beurteilung der einzelnen Einflussfaktoren bezüglich Strömungskurzschlüssen zwischen Portalen (z.B. Portalkonfiguration) mittels CFD-Simulationen;
- Die systematische Beurteilung der einzelnen Einflussfaktoren bezüglich Strömungskurzschlüssen zwischen einem Kamin und einem Portal (z.B. Ausblasgeschwindigkeit, Kaminhöhe, Portalkonfiguration) mittels CFD-Simulationen.

Diese Teilergebnisse ermöglichen zusammen eine umfassendere Bewertung von Strömungskurzschlüssen als bisher.

Abschätzung des Gefahrenpotentials

Es wurde eine Methode entwickelt, um die Gefährdung der Nutzer der Gegenröhre durch die Rauchrezirkulation abzuschätzen. Sie beantwortet die Frage „Wie viel Rauchrezirkulation ist zulässig?“. Sie setzt die Analogie von Wannenbränden und Fahrzeugbränden voraus und beruht auf der Theorie der Wannenbrände, den Ergebnissen von Brandversuchen mit verschiedenen reinen Brennstoffen und Fahrzeugen, der Theorie der Extinktion von Licht in Rauch und den empirischen Zusammenhängen zwischen der Sichtweite, der Sichttrübung und den sensorischen Fähigkeiten von Personen in verrauchter Umge-

bung. Diese Methode ist sowohl auf die Kamin-Portal- wie auch auf die Portal-Portal-Rezirkulation anwendbar. Sie vereint alle drei Teilaspekte der Rezirkulation – Emission, Transmission und Immission – in einem Schaubild, indem die Abhängigkeit einer als kritisch definierten Rezirkulation von der Brandleistung in der Ereignisröhre und der Sichtweite aufgezeigt wird. Sie dient zur Bewertung der Ergebnisse der CFD-Studien.

Portal-Portal-Rezirkulation

Die Rezirkulation von Portal zu Portal wurde mittels einer Parameterstudie numerisch untersucht. Die veränderlichen Parameter waren der Portalversatz, die Trennwandlänge, die Windstärke und die Windrichtung in einer neutralen Atmosphäre, mit einem logarithmischen Windprofil, in einem ebenen, offenen Gelände mit vereinzelt Bäumen. Die Ergebnisse gelten für Rauch- und Schadstoffrezirkulation in den gegebenen geometrischen und atmosphärischen Grenzen. Die Ergebnisse gelten also nicht für Tunnel in einem Einschnitt oder einer Strassenschlucht. Sie gelten auch nicht für Portalströmungen, welche wärmer als die Umgebung sind, und für instabile Atmosphäre.

Die ermittelten Rezirkulationswerte lagen zwischen 0 und 55 %. Als treibende Kraft für die Rezirkulation wurde die Windstärke und die Windrichtung identifiziert: Bei Querwind ist die Rezirkulation am höchsten und steigt dabei mit zunehmender Windstärke an. Eine Trennwand von mindestens 30 m erwies sich hier als optimal. Bei schwachem Wind, der gegen das Portal gerichtet ist, ist die Rezirkulation stets höher als bei Querwinden mit gleicher Windstärke. Der Auftrieb hat zum heutigen Kenntnisstand bei grossen Temperaturdifferenzen einen positiven, reduzierenden Einfluss auf die Rezirkulation. Eine Aussage für kleine Temperaturdifferenzen ist beim heutigen Kenntnisstand nicht möglich.

Die ermittelten Rezirkulationswerte liegen nach der Schätzung des Gefahrenpotentials im kritischen Bereich bei Bränden niedriger bis mittlerer Leistung. Daher ist eine Beurteilung der Situation an den jeweiligen realen Portalen mit experimentellen oder rechnerischen Mitteln notwendig, insofern das Gefahrenpotential der Rezirkulation nicht mit anderen Massnahmen oder Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen abgeschwächt werden kann.

Schliesslich bestätigt die parametrische Studie die Richtlinie ASTRA 13001 (2008), welche eine Trennwand von 30 m Länge mit der Höhe des Fahrraums empfiehlt.

Kamin-Portal-Rezirkulation

Die Rezirkulation von Kamin zu Portal wurde mittels einer Parameterstudie numerisch untersucht. Die veränderlichen Parameter waren der Abstand Kamin-Portal, die Kaminhöhe, die Austrittsgeschwindigkeit der Luft aus dem Kamin und die Windstärke. Diese Parameter wurden für eine neutrale und isotherme Atmosphäre mit einer Windrichtung von Kamin zu Portal und unter Vernachlässigung der topographischen Effekte modelliert. Die Austrittsgeschwindigkeit der Luft aus dem Kamin ist in allen Fällen deutlich grösser als die Windstärke (Faktor 2 und mehr). Die Effekte einer instabilen Atmosphäre, der Inversionslagen und der topographischen Effekte, wie Hangwinde und Ablösungsblasen des Windes hinter einem Hügel, wurden nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse lassen sich also am besten auf Tunnel durch niedrige Hügel anwenden.

Die ermittelten Rezirkulationswerte lagen zwischen 0 und 3 %. Unter den getroffenen Vereinfachungen liefert die Parameterstudie die folgenden Erkenntnisse:

- Im Gegensatz zur Portal-Portal-Rezirkulation ist die Kamin-Portal-Rezirkulation bei neutraler Atmosphäre in der Regel unkritisch.
- Der Kamin soll möglichst näher als 20 m vom Portal entfernt sein. Die Rezirkulation nimmt zwischen 20 und 50 m Entfernung markant zu. Entfernungen grösser als 100 m reduzieren die Rezirkulation kaum.
- Liegt der Kamin nicht direkt am Portal, so sollte die Verbindungsgerade Kamin-Portal nicht mit einer Hauptwindrichtung oder einer Hangwindrichtung übereinstimmen.
- Auf jeden Fall hat die Lokalisierung des Kamins auf der Grundlage und in Kenntnis der Windrose am Standort des Portals zu erfolgen.
- Der Kamin soll möglichst höher als 15 m über Portaloberkante sein.

- Die Austrittsgeschwindigkeit des Rauchs am Kamin soll möglichst grösser als $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sein. Daraus folgen betriebliche Anforderungen an die Lüftung unter Teillastbetrieb.
- Mit steigender Windstärke nimmt die Rezirkulation tendenziell zu.
- Es wird eine dimensionslose Kennzahl vorgeschlagen, mit der die Güte einer bestehenden Kamin-Portal-Konfiguration aufgrund der vorliegenden Studie abgeschätzt werden kann. Diese kann auch als Hilfe bei der Auslegung verwendet werden.

Ausblick

Einige Themen konnten im vorliegenden Forschungsprojekt nur knapp behandelt werden. Zudem ist eine eventuelle Umsetzung der Erkenntnisse im Rahmen der Regelwerke nicht Bestandteil der Arbeit. Es wird empfohlen, folgende weiterführende Arbeiten in Betracht zu ziehen:

- Vertiefung von relevanten Themen, die noch nicht umfassend behandelt wurden, wie z.B. die Auswirkung der Topographie, der Temperaturunterschiede und der atmosphärischen Instabilitäten und Inversionen auf die Rezirkulation;
- Prüfung möglicher Umsetzung der Erkenntnisse in den Regelwerken und allenfalls Vornahme einer Anpassung der Regelwerke.

Résumé

Situation initiale

Les têtes de tunnels et les cheminées de désenfumage représentent des sources concentrées de polluants. Les têtes de tube entrants et de galeries voisines sont des puits pour l'air ambiant. Entre ces éléments s'établit en général un écoulement de source à puits resp. un court-circuit. Les conditions topographiques, constructives et atmosphériques peuvent soit amplifier soit atténuer ces court-circuits. Ces court-circuits – aussi nommé recirculation ou recyclage – entravent ou empêchent d'atteindre les objectifs de ventilation en mode d'opération normale et les objectifs de sécurité en mode d'opération d'urgence. Par conséquent, il s'agit de phénomène indésirable.

Selon la directive de l'OFROU « Lüftung in Strassentunnel » (ASTRA 13001) le recyclage de fumée et de polluants d'un tube à l'autre et d'un ouvrage de désenfumage à une prise d'air extérieur resp. à un portail doit être évité par des mesures appropriées. Cette exigence est réalisée aujourd'hui par différentes mesures actives et passives, comme par exemple des parois de séparation. Pourtant des données fondées étayant ces mesures ainsi que des objectifs concrets et quantifiables relatifs aux buts à atteindre manquent aujourd'hui en grande partie. De plus il n'existe pas d'objectifs concernant le recyclage de fumée pour le renouvellement de systèmes de ventilation existants avec positions données des portails et des ouvrages de désenfumage. Dans des projets actuels des questions relatives à cette thématique se posent constamment, sans qu'on puisse les résoudre de façon satisfaisante.

Objectif de recherche

Le présent projet de recherche vise à examiner la thématique du recyclage de fumée et de polluants pour des tunnels nouveaux et existants. À l'avenir, les résultats doivent servir à l'avenir de fondement pour le dimensionnement de systèmes de ventilation ainsi que pour la définition de mesures d'assainissement d'installations existantes. Le but principal du projet de recherche est l'élaboration de données fondées pour une meilleure compréhension et appréciation du recyclage de fumée et de polluants dans des tunnels routiers avec et sans ventilation. Ceci inclus les aspects suivants :

- évaluation du potentiel de nuisance émanant du phénomène;
- développement d'une méthode simple pour l'évaluation du recyclage et de contre-mesures pour des installations de ventilation existantes et nouvelles;
- formulation de recommandations, d'objectifs précis et de mesures de compensation.

Les différentes parties du projet sont :

- le développement d'une méthode d'évaluation du potentiel de nuisance ;
- l'évaluation paramétrique des facteurs influençant le recyclage entre les tubes (par exemple la configuration du portail) au moyen de simulations numériques tridimensionnelles ;
- l'évaluation paramétrique des facteurs influençant le recyclage entre une cheminée et un tube (par exemple la vitesse d'éjection des fumées, la hauteur de la cheminée et la configuration du portail) au moyen de simulations numériques tridimensionnelles.

Ces résultats partiels permettent ensemble une évaluation plus complète du recyclage qu'il n'était possible jusqu'alors.

Évaluation du potentiel de nuisance

Une méthode analytique a été développée pour évaluer la menace du recyclage de fumée pour les utilisateurs d'un tube adjacent au tube incendié. Elle répond à la question « combien de recyclage de fumée est-il admissible ? ». Elle repose sur la théorie des feux de bac et suppose qu'ils sont analogues aux incendies de véhicules ; de plus elle se fonde sur les résultats expérimentaux de combustion de divers substances pures et de véhicules, sur la théorie de l'extinction de la lumière dans la fumée et sur les rapports empiriques entre la visibilité, l'opacité de la fumée et les aptitudes sensorielles humaines

en milieu enfumé. Cette méthode est applicable aussi bien au recyclage de fumée d'un tube à l'autre (entre portails) qu'au recyclage d'une cheminée de désenfumage à un tube (de cheminée à portail). Elle unifie tous les trois aspects du recyclage – l'émission, la transmission et l'immission de fumée – dans un diagramme. Ce dernier présente la dépendance fonctionnelle du taux de recyclage critique de la puissance de l'incendie dans le tube avariée et de la visibilité dans le tube enfumé par recyclage. Ce diagramme sert à évaluer les résultats des études numériques du recyclage.

Recyclage entre portails.

Le recyclage de portail à portail a été soumis à une étude paramétrique numérique. Les paramètres variables étaient le déport des portails, la longueur du mur de séparation, la force et la direction du vent. L'atmosphère est supposée neutre et isotherme, le profil de vitesse de la couche limite terrestre est supposé logarithmique, le terrain environnant est ouvert avec des arbres clairsemés. Les résultats sont valides pour le recyclage de fumée et de polluants dans le cadre des hypothèses géométriques et atmosphériques définies. Ils ne sont donc pas valides pour des tunnels débouchant dans une tranchée ou dans une rue bordée de bâtiments élevés. Ils ne sont pas non plus valables pour des écoulements sortant du portail plus chauds que l'environnement, et pour une atmosphère instable.

Les taux de recyclage établis sont situés entre 0 et 55 %. Le facteur dominant le recyclage est le vent : Le recyclage est le plus fort par vent latéral et augmente alors avec la force du vent ; dans ce cas une paroi de séparation de 30 m de longueur s'est avérée efficace contre le recyclage. Par vent faible le taux de recyclage est plus élevé par vent de face que par vent latéral. La force ascensionnelle par grandes différences positives de température a, dans l'état actuel des connaissances, un effet réducteur bénéfique sur le recyclage ; aucune assertion n'est possible à l'heure actuelle pour de faibles différences de température.

Les taux de recyclage établis se situent dans le diagramme d'évaluation du potentiel de nuisance dans le domaine critique pour les incendies de faible et moyenne puissance. Par conséquent dans le cas concret, une appréciation de la situation spécifique du portail par des méthodes expérimentales ou numériques est nécessaire, pour autant que le potentiel de nuisance du recyclage ne puisse pas être mitigé par d'autres mesures ou par des considérations statistiques.

Enfin, l'étude paramétrique confirme la directive de l'OFROU (ASTRA 13001), qui recommande une paroi de séparation de 30 m de longueur à hauteur du faîte du tube.

Recyclage de cheminée à portail

Le recyclage de cheminée à portail a été soumis à une étude paramétrique numérique. Les paramètres variables étaient la distance de la cheminée au portail, la hauteur de la cheminée, la vitesse d'éjection de la fumée à l'embouchure de la cheminée et la force du vent. L'atmosphère est supposée neutre et isotherme, le profil de vitesse de la couche limite terrestre est supposé uniforme à l'entrée du domaine numérique, le vent souffle continuellement de la cheminée vers le portail, la topographie est négligée. La vitesse d'éjection des fumées est dans tous les cas nettement supérieure à la vitesse du vent (facteur 2 et plus). Les effets de l'instabilité de l'atmosphère, des inversions et de la topographie, comme les vents de côte et les bulles de décollement sous le vent d'une colline, n'ont pas été considérés. Les résultats s'appliquent de ce fait le mieux à des tunnels traversant des collines basses.

Les taux de recyclage établis sont situés entre 0 et 3 %. Dans le cadre des simplifications et des hypothèses énoncées ci-avant, l'étude paramétrique livre les résultats suivants :

- Contrairement au recyclage entre portails, le recyclage de cheminée au portail n'est pas critique en atmosphère neutre.
- La cheminée doit être située si possible à moins de 20 m du portail. Le taux de recyclage croît massivement entre 20 m et 50 m de distance. Des distances de plus de 100 m réduisent à peine le taux de recyclage.

- Lorsque la cheminée n'est pas située directement au portail, la ligne cheminée-portail ne devrait pas coïncider avec une direction principale du vent ou la direction d'un vent de côte.
- La position de la cheminée doit être choisie dans tous les cas en connaissance de la rose des vents au droit du portail.
- La cheminée doit dépasser le faîte du tube d'au moins 15 m.
- La vitesse d'éjection de la fumée à l'embouchure de la cheminée doit être au moins $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. De cette charge s'ensuivent des charges opérationnelles pour la ventilation en mode d'opération partielle.
- Le taux de recyclage croît tendanciellement avec la force du vent.
- Un nombre non-dimensionnel est proposé, avec lequel la qualité d'une configuration cheminée-portail peut être évaluée. Ce nombre peut être employé lors du dimensionnement.

Perspective

Dans le cadre du présent rapport, certains thèmes, comme l'effet des instabilités atmosphériques sur le recyclage de fumée, ne peuvent être traités que de façon succincte. De plus, une éventuelle transposition des résultats dans des directives dépasse l'objet de ce travail. On recommande les travaux subséquents suivants :

- approfondissement de thèmes majeurs qui ne pouvaient pas être traités complètement, comme par exemple les effets de la topographie, des différences de température et des instabilités et inversions atmosphériques sur le recyclage;
- examiner la transposition des résultats dans les directives et éventuellement effectuer cette transposition.

Summary

Starting position

Tunnel exit portals and ventilation discharge chimneys represent concentrated smoke and pollution sources. Nearby inlet tubes and galleries are flow sinks. Between these sources and sinks a short circuit flow establishes. The topographic, constructive and atmospheric conditions can either amplify or weaken these short circuits. These short circuits – also called recirculation – affect or nullify the ventilation measures taken to reach the requirements in normal operation and to reach the safety goals in emergency operation. Therefore recirculation is principally undesirable.

According to the ASTRA guideline “Lüftung der Strassentunnel” the recirculation of smoke and pollutants from one tube to the other and between and exhaust stack and air intakes respectively inlet portals must be avoided by appropriate means. This requirement is complied with today with different active and passive measures. Well-founded basics backing these measures as well as practical and quantitative standards for the goals to reach are missing today to a large extent. Furthermore there are no standards for the refurbishment of existing ventilation plants with given portal and stack positions relative to recirculation. In present projects there arise continuously questions concerning this matter that cannot be clarified satisfactorily.

Research objective

The present research project aims at examining comprehensively the topic of recirculation at the portals of planned and existing tunnels. The results shall serve as groundwork for the design of ventilation systems to be as well as for the refurbishment of existing systems. The main objective of the research project is to work out well-founded basics for a better understanding and the evaluation of smoke and pollutant recirculation at the portals of road tunnels with and without ventilation. Thereby the following aspects prevail:

- Assessment of the harm potential of smoke recirculation;
- Development of a simple method for the evaluation of recirculation and of measures for existing and planned ventilation plants;
- Definition of recommendations, clear standards and possibilities to compensate recirculation.

The different parts of the project are:

- The development of a method to assess the harm potential of smoke recirculation;
- The parametric assessment of the factors influencing recirculation between portals (e.g. portal configuration) with CFD-simulations;
- The parametric assessment of the factors influencing recirculation from a stack to a portal (e.g. velocity of smoke ejection, stack height, portal configuration) with CFD-simulations.

These partial results allow together a more comprehensive evaluation of the smoke recirculation as before.

Evaluation of the harm potential

A method has been developed to assess the threat to the users of the sound tubes by smoke recirculation. It answers the question “How much smoke recirculation is acceptable?” It assumes the analogy of pool fires and vehicle fires and relies on the theory of pool fires, the experimental results of the combustion of pure fuels and vehicles, the theory of light extinction in smoke and the empirical relation between visibility, extinction and the sensory aptitude of people in a smoke filled environment. This method is applicable to both the portal to portal and the stack to portal recirculation. It unifies all three aspects of recirculation – emission, transmission and nuisance – in one diagram. This diagram presents the functional dependence of the critical recirculation rate from the fire power in the incident tube and the visibility in the tube filled by recirculating smoke. It is used to assess the results of the CFD-studies.

Portal to portal recirculation

The recirculation between portals has been examined numerically in a parametric study. The parameters varied were the staggering of the portals, the length of the separation wall, the wind velocity and the wind direction. The atmosphere was assumed neutral and isothermal, the earth boundary layer logarithmic and the surrounding terrain as open country with low scrub and scattered trees. The results are valid for the recirculation of smoke and pollutants in modelled geometric and atmospheric limits. They are therefore not valid for a tunnel in a trench or a street canyon. They are also not valid for flows leaving the portals hotter than the environment, and for unstable atmosphere.

The recirculation rates found lie between 0 and 55 %. The driving force of the recirculation is the wind velocity and direction: The recirculation is highest at cross wind and increases then with wind velocity. A separation wall of at least 30 m has shown to be an effective measure against recirculation in this case. If the wind is directed against the portal, the recirculation at low wind velocity is always higher than at the same wind velocity and cross wind. The buoyancy of hot tunnel air has a positive reducing effect on recirculation when the temperature difference to the environment is high. A statement for low temperature differences is not possible to the present state of knowledge.

The recirculation rates found are generally critical for low and medium fire powers according to the harm potential diagram. Therefore a case specific assessment of the recirculation with experimental or computational means is still necessary, as long as the harm potential of the recirculation cannot be mitigated with other measures or statistical considerations.

The parametric study confirms the recommendation of the ASTRA directive 13001 that recommends a separation wall at least 30 m long and as high as the ridge of the tubes.

Chimney to portal recirculation

The recirculation between a vertical chimney and a portal has been examined numerically in a parametric study. The parameters varied were the distance from the stack to the portal, the stack height, the exit velocity of the smoke jet at the orifice of the stack, and the wind velocity. The atmosphere was assumed neutral and isothermal and the earth boundary layer as uniform at the domain inlet; the wind blew constantly from the stack to the portal. The topography was neglected and the tunnel modelled on an open field. The jet velocity was in all cases much greater than the wind velocity (a factor 2 or more). The effects of atmospheric instability and inversion and the effects of the topography, as for instance slope currents and flow separation on the lee side of a hill, were not considered. The results therefore apply best for tunnels through low hills.

The recirculation rates found lie between 0 and 3 %. Bearing in mind the assumptions and simplifications made, the parametric study provides the following findings:

- In contrast to the recirculation between portals the recirculation from a chimney to a portal in neutral atmosphere is generally uncritical.
- The chimney should be closer than 20 m to the portal. The recirculation rate grows strongly between 20 m and 50 m. Distances greater than 100 m hardly reduced the recirculation.
- If the stack is not located at the portal, the connection line between the stack and the portals should not coincide with the direction of a main wind or of a slope current.
- In any case the positioning of the stack should be decided on the basis and in cognition of the portal's wind rose.
- The stack should be at least 15 m high (measured from the ridge of the tubes).
- The exit velocity of the smoke jet at the orifice of the stack should be higher than $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Requirements for the part load operation of the ventilation are following from this requirement.
- The recirculation generally grows with growing wind velocity.
- A dimensionless number is proposed which can be used to assess the quality of an existing or planned chimney to portal configuration on the basis of the parametric study.

Outlook

Many topics could be only mentioned in the present research project. A probable implementation of its findings in directives is not part of the work. It is recommended to consider the following continuative works:

- in-depth study of relevant topics that have been only mentioned in this work, for instance the effects of topography, temperature differences and atmospheric instabilities and inversions on the recirculation;
- implementation of the findings of this works in directives.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Bei Strassentunneln stellen Austrittsportale und Lüftungskamine konzentrierte Schadstoffquellen dar. Die Eintrittsportale nahgelegener Tunnelröhren und Sicherheitsstollen sind Strömungssenken. Zwischen diesen stellt sich in der Regel eine Quellen-Senken-Strömung bzw. ein Strömungskurzschluss ein. Die topographischen, konstruktiven und atmosphärischen Bedingungen können diese Strömungskurzschlüsse entweder verstärken oder vermindern. Diese Strömungskurzschlüsse – auch Rezirkulation genannt – beeinträchtigen oder verunmöglichen die Lüftungsziele im Normalbetrieb und die Sicherheitsziele im Ereignisbetrieb. Daher ist dieses Phänomen grundsätzlich unerwünscht.

Gemäss der ASTRA-Richtlinie „Lüftung der Strassentunnel“ sind Strömungskurzschlüsse von Rauch und Schadstoffen von einer Tunnelröhre in eine andere und zwischen Abluftbauwerken und Aussenluftfassungen bzw. Portalen durch geeignete Massnahmen zu vermeiden.

Diese Auflagen werden heute durch verschiedene aktive und passive Massnahmen berücksichtigt. Die gängigsten sind:

- genügender horizontaler und vertikaler Abstand zwischen Kamin und Portal resp. Ansaugstellen (Sisto, HLKS, ...);
- Bau von Trennwänden zwischen Ein- und Ausfahrtsportalen;
- steuerungstechnische Massnahmen beim Betrieb der Fahrraumlüftung (z.B. gleiche Strömungsrichtung in beiden Tunnelröhren oder Überdruck in der „gesunden“ Röhre);
- Verwendung von Rauchmeldern.

Fundierte Grundlagen bezüglich dieser Massnahmen wie auch konkrete Vorgaben der zu erreichenden Ziele fehlen heute weitgehend. Zudem sind Aspekte, die primär bei Erneuerungen von Lüftungsanlagen massgeblich sind (fixe Portal- resp. Kaminposition), nicht behandelt. In aktuellen Projekten ergeben sich diesbezüglich laufend Fragen, die nicht hinreichend geklärt werden können:

- Wie gross muss der horizontale/vertikale Abstand zwischen Portal und Kamin sein?
- Kann ein zu geringer Abstand vom Kamin zum Portal (z.B. bei bestehenden Anlagen) mit alternativen Massnahmen kompensiert werden?
- Wie ist der Einfluss der Ausblasgeschwindigkeit und Mündungsform hinsichtlich Strömungskurzschlüssen zu beurteilen?
- Welchen Einfluss haben die meteorologischen und orographischen Gegebenheiten (Wind, Hanglage etc.)? Wann ist eine Portallage ungünstig?
- Wie ist der Zusammenhang zwischen Länge und Höhe der Trennwand? Kann bei einer zu kurzen Trennwand eine zusätzliche Erhöhung die Nachteile kompensieren?
- Wie ist die Situation bei nahe beieinanderliegenden Tunneln oder Galerien zu beurteilen (z.B. Simplon-Passstrasse)?

Massnahmen zur Reduktion von Strömungskurzschlüssen sind grösstenteils baulicher Natur und prägen nicht selten das Portalbauwerk resp. das Landschaftsbild. Entsprechend sind sie schon in einer frühen Projektphase möglichst präzise zu spezifizieren. Für bestehende Anlagen sollten quantifizierbare Massnahmen bekannt sein, um trotz der bestehenden Infrastruktur die höchstmögliche Sicherheit gegen Strömungskurzschlüsse zu gewährleisten. Vorgaben diesbezüglich wären dringend erforderlich.

1.2 Aufgabenstellung

Das vorliegende Forschungsprojekt hat zum Ziel, die Problematik der Strömungskurzschlüsse für neue und bestehende Tunnelanlagen umfassend zu untersuchen. Es zielt primär darauf ab, die unsicheren, ungenauen oder fehlenden Vorgaben bezüglich Strömungskurzschlüssen zu beheben. Diese Grundlage kann zu erheblichen Kosten- und

Zeiteinsparungen während der Planungs- und Realisierungsphase führen. Die Ergebnisse sollen in Zukunft als Grundlage für die Auslegung von Lüftungsanlagen sowie für Sanierungsmassnahmen bestehender Anlagen dienen. Hauptziel der Forschungsarbeit ist die Erarbeitung einer fundierten Grundlage zum besseren Verständnis und zur Beurteilung der Strömungskurzschlüsse (Rauch und Emission) bei Strassentunneln mit und ohne Lüftung. Dabei stehen folgende Aspekte im Vordergrund:

- Beurteilung des Gefahrenpotentials (→ inwiefern ist die Rezirkulation ein Problem; welche Gefahren stellt sie dar?);
- Erarbeitung einer Grundlage zum besseren Verständnis der Problematik;
- Entwicklung einer einfachen Methode zur Bewertung von Strömungskurzschlüssen und Massnahmen für neue und bestehende Lüftungsanlagen. Unter Berücksichtigung aller massgebenden Aspekte kann ein konkreter Tunnel bezüglich der Gefahr von Strömungskurzschlüssen mit der Methode beurteilt werden;
- Definition von Empfehlungen, klaren Vorgaben und Kompensationsmöglichkeiten (→ Was sind die Anforderungen? Wie viel Rezirkulation ist zulässig? Welche Massnahmen sind in Abhängigkeit der vorliegenden Bedingungen zu treffen?);
- Publikation der Ergebnisse im nationalen und internationalen Umfeld (Fachpresse, Konferenzen).

Der Hauptteil der Forschungsarbeit betrifft die systematische Beurteilung der einzelnen Einflussfaktoren bezüglich Strömungskurzschlüssen (z.B. Ausblasgeschwindigkeit, Kaminhöhe, Portalsituation) mittels CFD-Simulationen. Anhand der Simulationsergebnisse wird eine Methode zur Bewertung der Strömungskurzschlüsse entwickelt. Weiter werden Vorgaben und Empfehlungen definiert.

1.3 Vorgehensweise

Die in der Rauchrezirkulation beteiligten Phänomene lassen sich für die Portal-Portal-Rezirkulation in einem Schema als Teilphänomene Emission – Transmission – Immission darstellen. Unter Emission werden die Raucherzeugung in der Ereignisröhre und der Transport des Rauches zum Portal bzw. Kamin verstanden. Die Transmission ist der Transport vom Auslass – Kamin oder Portal – zum Portal der Gegenröhre. Die Immission beschreibt die Mechanismen der Einwirkung des rezirkulierten Rauches auf die Gegenröhre. Damit Rezirkulation überhaupt eintritt, müssen alle drei Phänomene vorhanden sein.

Die vorliegende Forschungsarbeit ist in fünf Teile gegliedert, die alle einem oder mehreren dieser Phänomene zugeordnet werden:

Teil 1: Theoretische und empirische Grundlagen

Der erste Teil beinhaltet eine Literaturrecherche sowie theoretische und praktische Betrachtungen von Strömungskurzschlüssen an bestehenden Tunnelanlagen.

Mit der Literaturrecherche werden bereits vorhandene Entwicklungs-/Forschungsarbeiten, verwendete Ansätze und gängige Praxis zusammengetragen, ausgewertet und beurteilt. Die behandelten Themen umfassen Modelle für Tunnelbrände und atmosphärische Strömungen, Erkenntnisse über die Wechselwirkung von Wind und Gelände sowie die einschlägigen Richtlinien. Anhand theoretischer und praktischer Betrachtungen werden die Strömungskurzschlüsse und die damit verbundenen Aspekte (z.B. bauliche Massnahmen, Methoden) analysiert und beschrieben.

Teil 2: Gefahrenpotential

Das Gefahrenpotential für die Tunnelbenützer, das von Rauch- oder Schadstoffkurzschlüssen ausgeht, wird auf der Grundlage von Teil 1 abgeschätzt. In diese Abschätzung fliessen die Forschungsergebnisse über Tunnelbrände, die gängige Praxis der Tunnellüftung sowie Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen ein. Es werden Schaubilder zur Abschätzung der Gefahr der Transmission in Abhängigkeit der Emission und der Immission entwickelt; diese beantworten die Frage: Wie gefährlich ist eine gegebene Rezirkulation in % bei einer gegebenen Brandleistung und einer erwünschten Sichtweite in der Gegenröhre? Es wird eine Methode für die umfassendere statistische Betrachtung des Phänomens

Rezirkulation dargestellt.

Teil 3: Validierung der CFD-Anwendung auf Strömungskurzschlüsse

Anhand verfügbarer experimenteller Ergebnisse werden die CFD-Modelle validiert. Dieses Vorgehen soll das Vertrauen in die CFD-Ergebnisse stärken.

Teil 4: Einflussgrößen der Transmission

Dieser Teil umfasst primär die detaillierte Analyse der verschiedenen Einflussgrößen bezüglich der Rauch- und Schadstoffkurzschlüsse (Transmission) für die Grundkonfigurationen Kamin-Portal und Portal-Portal. Die verschiedenen Einflussgrößen werden mittels detaillierter CFD-Simulationen systematisch beurteilt. Aus der Vielzahl der Parameter wurden bei Kamin-Portal-Kurzschlüssen der Kaminabstand und die Kaminhöhe sowie die Ausblasgeschwindigkeit und die Windstärke als relevante Faktoren erkannt; bei Portal-Portal-Kurzschlüssen sind dies der Portalversatz, die Trennwandlänge, die Windstärke und -richtung. Die Simulationen zeigen den Einfluss dieser Größen auf, die bei der Auslegung von Tunnellüftungen, der Positionierung und Gestaltung von Abluftkaminen und der Gestaltung der Portale berücksichtigt werden müssen.

Teil 5: Definition von Vorgaben und Empfehlungen

Die zusammengestellten Grundlagen, die Methodik zur Abschätzung des Gefahrenpotentials und die Ergebnisse der CFD-Simulationen liefern Richtwerte und eine Vorgehensweise für die Auslegung von neuen und bestehenden Tunneln. Die beeinflussenden Parameter werden definiert und anhand ihres Einflusses auf die Strömungskurzschlüsse klassifiziert.

Die Resultate der Studie sollen als Empfehlung für die Auslegung/Sanierung von Tunnelanlagen dienen.

1.4 Abgrenzung der Arbeit

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Rauchrezirkulation im Ereignisbetrieb; die Rezirkulation

- von Schadstoffen im Normalbetrieb,
- von Portalen/Kaminen zu Aussenluftfassungen von Raumlüftungen/Fluchtwegbelüftungen

steht nicht in deren Fokus und wird nur am Rand behandelt.

Die in dieser Arbeit entwickelten Werkzeuge und gewonnenen Erkenntnisse zu jedem Teilphänomen der Rezirkulation beruhen auf zahlreichen Literaturquellen und vereinfachenden Annahmen:

- Die Behandlung der Emission beruht auf den verfügbaren experimentellen Ergebnissen und theoretischen Modellen für Tunnelbrände.
- Die Behandlung der Transmission benötigte eine starke Vereinfachung der vielfältigen realen und oft komplexen atmosphärischen und orographischen Bedingungen an Tunnelportalen.
- Die Behandlung der Immission beruht auf experimentellen Werten für die Sichtweite durch Rauch und das Fluchtverhalten von Menschen.

Diese Arbeit ist also die Synthese von 3 Bereichen, die entweder noch Gegenstand der Forschung sind oder starken Vereinfachungen der Wirklichkeit bzw. Einschränkung deren Vielfalt unterzogen werden mussten. Die Ergebnisse der Arbeit können also nicht als letztgültig, sondern höchstens als ein Beitrag zum besseren Verständnis eines komplexen interdisziplinären Themas betrachtet werden. Die hier dargestellten Methoden und Ergebnisse entbinden daher zukünftige Nutzer nicht von der kritischen Hinterfragung der Ergebnisse und ihrer Sorgfaltspflicht bei deren Anwendung im konkreten Fall.

2 Theoretische und empirische Grundlagen

2.1 Phänomenologie der Rauchrezirkulation

Die in der Rauchrezirkulation beteiligten Phänomene lassen sich sowohl für die Portal-Portal-Rezirkulation als auch für die Kamin-Portal-Rezirkulation in einem Schema Emission – Transmission – Immission darstellen (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2). Dabei liegt der Schwerpunkt hier auf der physikalischen Ebene des Phänomens. Die tabellarische Darstellung beruht auf einer Analyse der IG BSA Seelisberg 2010.

Unter **Emission** werden die Raucherzeugung in der Ereignisröhre und der Transport des Rauches zum Portal bzw. Kamin verstanden. Die **Transmission** ist der Transport vom Auslass – Portal oder Kamin – zum Portal der Gegenröhre oder einem beliebigen anderen Punkt. Die **Immission** beschreibt die Mechanismen der Einwirkung des rezirkulierenden Rauchs auf die Gegenröhre oder einen beliebigen anderen Punkt.

Zu jedem Mechanismus, der an der Rezirkulation beteiligt ist, werden in den Tabellen wenn möglich Gegenmassnahmen formuliert.

Diese Tabellen geben eine gedankliche Stütze für den Verlauf der Arbeit. Insbesondere wird auf die folgenden Themen eingegangen:

Von der Emission soll insbesondere betrachtet werden:

- die Quellstärke des Brandes (Pos. 1.1.2) im Sinne einer Abschätzung der Rauchproduktion und kritischen Rezirkulation;
- der Transport zum Portal bzw. Kamin (Pos. 1.2) im Sinne einer Bereitstellung von realistischen Randbedingungen am Rauchauslass unter verschiedenen Lüftungssystemen.

Die Quellhäufigkeit (Pos. 1.1.1) gehört nicht zu der physikalischen, sondern zur statistischen Ebene des Phänomens. Es wird darauf im Rahmen einer Wahrscheinlichkeitsabschätzung eingegangen.

Die Transmission (Pos. 2) wird mittels numerischer 3D-Strömungssimulationen in neutraler Atmosphäre sowohl für Portal-Portal- wie Kamin-Portal-Rezirkulation in einer Parameterstudie untersucht. Variiert werden dabei die wichtigsten geometrischen und aerodynamischen Parameter. Das sind zum Beispiel der Portalversatz, die Länge der Antirezirkulationswand, die Windstärke und -richtung. Auf die Fragestellung der Topologie der Portalumgebung sowie der atmosphärischen Stabilität wird im Rahmen dieser Arbeit nur qualitativ eingegangen.

Zur Immission (Pos. 3) wird untersucht, wie weit sich rezirkulierender Rauch in die Gegenröhre unter realistischen Lüftungsszenarien ausbreiten kann.

Pos.	Phänomen	Beschreibung	Mechanismen	Gegenmassnahmen	Bemerkungen
1.	Emission	Rauchaustritt aus der Ereignisröhre			
1.1		Quelle im Tunnel			
1.1.1		Quellhäufigkeit (Unfallhäufigkeit) (statistische Ebene)	- Reduktion des Verkehrsaufkommens - Reduktion der signalisierten Geschwindigkeit - Dosierung des Schwerverkehrs	Dosierung des Schwerverkehrs: vgl. Betrieb des Gotthard-Strassentunnels, in dem die Lastwagen dosiert zugelassen werden	
1.1.2		Quellstärke (Brandgut, Brandleistung, Raucherzeugung)	Einschränkung der Zulassung der Fahrzeuge		
1.2		Transport zum Portal			
1.2.1		Kolbeneffekt	Reduktion durch schnellstmögliche Detektion und Tunnelsperrung	Einschränkung durch Detektionszeit und Dauer bis zur Einschaltung der Lüftung	
1.2.2		Kamineffekt	-		
1.2.3		Portaldruckdifferenz	-		
1.2.4		Lüftung (Längslüftung)	- Rauchabsaugung über steuerbare Klappen - Ausgleich der Längsströmung im Tunnel mit aktiven Massnahmen	Einschränkung durch: - Detektionszeit und Dauer bis zur Einschaltung der Lüftung - Kontrolle der Längsströmung eingeschränkt durch grosse Luftmasse	
2.	Transmission	Rauchausbreitung im Portalbereich			
2.1		Strömung aus der Ereignisröhre			
2.1.1		Kolbeneffekt	Reduktion der Austrittsgeschwindigkeit durch schnellstmögliche Detektion und Tunnelsperrung	Einschränkung durch Detektionszeit und Dauer bis zur Einschaltung der Lüftung	
2.1.2		Natürlicher Auftrieb	-	-	
2.1.3		Lüftung	-	-	
2.1.4		Portaldruckdifferenz	-	-	
2.1.5		Schleppwirkung der Fahrzeuge	Reduktion der Austrittsgeschwindigkeit durch schnellstmögliche Detektion und Tunnelsperrung	Einschränkung durch Detektionszeit und Dauer bis zur Einschaltung der Lüftung	
2.2		Bedingungen im Aussenbereich			
2.2.1		Überlagerung der austretenden Strömung mit der Aussenströmung (Winden)	Trennwand: - Trennung der Ausströmzone von der Einströmzone - Behinderung der Umlenkung des austretenden Luftstroms in die Einströmzone		
3.	Immission	Raucheintritt in der Gegenröhre			
3.1		Luftströmung in die Gegenröhre			
3.1.1		Kolbeneffekt	Reduktion der Eintrittsgeschwindigkeit durch schnellstmögliche Detektion und Tunnelsperrung		
3.1.2		Natürlicher Auftrieb	-		
3.1.3		Lüftung	- Überdrucklüftung - Strömungsumkehr zum Portal hin		
3.1.4		Portaldruckdifferenz	-		

Tabelle 1: Phänomenologie der Portal-Portal-Rezirkulation (nach IG BSA Seelisberg 2010)

Pos.	Phänomen	Beschreibung	Mechanismen	Gegenmassnahmen	Bemerkungen
1.	Emission	Rauchaustritt aus der Ereignisröhre			
1.1			Quelle im Tunnel		
1.1.1			Quellhäufigkeit (Unfallhäufigkeit) (statistische Ebene)	- Reduktion des Verkehrsaufkommens - Reduktion der signalisierten Geschwindigkeit - Dosierung des Schwerverkehrs	Dosierung des Schwerverkehrs: vgl. Betrieb des Gotthard-Strassentunnels, in dem die Lastwagen dosiert zugelassen werden
1.1.2			Quellstärke (Brandgut, Brandleistung)	Einschränkung der Zulassung der Fahrzeuge	
1.2			Transport zum Kamin		
1.2.1			Luftmenge	Verdünnung der Brandgase	
2.	Transmission	Rauchausbreitung ab dem Kamin			
2.1			Strömung aus dem Kamin		
2.1.1			Rauchquelle	Parameter des Ausstosses am Kamin: - Kaminhöhe und Kaminlage zum Portal - Austrittsgeschwindigkeit	
2.2			Bedingungen im Aussenbereich		
2.2.1			Wechselwirkung der Topologie der Umgebung Kamin-Portal mit der Rauchströmung	Berücksichtigung der Topologie der Umgebung Kamin-Portal in der Positionierung des Kamins	
2.2.2			Überlagerung der Rauchströmung mit der Aussenströmung (Winden)	Berücksichtigung der Besonderheiten der Aussenströmung (Windstärke und -richtung, atm. Stabilität und Schichtung) in der Umgebung Kamin-Portal in der Positionierung des Kamins	
3.	Immission	Raucheintritt in der Gegenröhre			
3.1			Luftströmung in die Gegenröhre		
3.1.1			Kolbeneffekt	Reduktion der Eintrittsgeschwindigkeit durch schnellstmögliche Detektion und Tunnelsperrung	
3.1.2			Natürlicher Auftrieb	-	
3.1.3			Lüftung	- Überdrucklüftung - Strömungsumkehr zum Portal hin	
3.1.4			Portaldruckdifferenz	-	

Tabelle 2: Phänomenologie der Kamin-Portal-Rezirkulation (nach IG BSA Seelisberg 2010)

2.2 Fahrzeugbrände in Strassentunneln

2.2.1 Allgemeines

Fahrzeugbrände entstehen durch Verkehrsunfälle oder Selbstentzündung eines Fahrzeugs oder dessen Ladung. Extensive Kennzahlen für die Kennzeichnung eines Fahrzeugbrandes sind der Heizwert des Fahrzeugs in GJ, die maximale Energiefreisetzungsrate in MW, auch Brandleistung genannt, und die Zeit zwischen Brandbeginn und der maximalen Energiefreisetzungsrate. Zusätzlich werden Fahrzeugbrände in Tunneln mit einem zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzungsrate und der Temperatur im Tunnelfirst beschrieben.

Fahrzeugbrände in Tunneln wurden in den 20 vergangenen Jahren wissenschaftlich intensiv untersucht. Namhafte Forschungsprojekte sind:

- das Testprogramm im Memorial Tunnel in den USA (The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, MTFVTP), Ende 1980er-Jahre;
- das EUREKA-Projekt 499 der EU (EU 499 FIRETUN) (1990–1996);
- das UPTUN Forschungsprojekt der EU, insbesondere das Arbeitspaket WP2 (Brandentwicklung und Begrenzungsmaßnahmen), 2002–2006;
- die Brandversuche im Runehamar Tunnel, Norwegen, 2003–2005 im Rahmen von UPTUN.

Für die Fragestellung der Rezirkulation interessieren vor allem Menge und zeitlicher Ablauf der Rauchproduktion. Die vorhandene Literatur wird im Folgenden diesbezüglich ausgewertet. Die folgenden Ausführungen orientieren sich stark an den Veröffentlichungen von Ingason (2006), Mayer (2006) und Steinauer et al. (2007).

2.2.2 Zeitlicher Verlauf der Energiefreisetzungsrate realer Brände

Eine inhaltsreiche Zusammenfassung dieser und anderer Brandversuche an Fahrzeugen gibt Ingason (2006). Gemäss dieser Zusammenstellung beträgt die Brandleistung eines Personenwagens zwischen 1 und 10 MW und eines Reisebusses ca. 30 MW. Die Brandleistung eines Lastwagens beträgt je nach Ladung und Lüftungsbedingungen zwischen 10 und 200 MW. Gemäss der gleichen Quelle beträgt die Zeit zur Entwicklung eines Vollbrandes bzw. bis zur maximalen Brandleistung zwischen 8 und 55 Minuten. Bemerkenswert ist dabei, dass die Zeit für einen PW-Brand breit streut, währenddem die LW- und Busbrände die Brandleistung in weniger als 20 Minuten erreichen. Aus Abbildung 1 ist aus Brandversuchen mit Schwertransportern ersichtlich, dass die Energiefreisetzungsrate bereits nach 8 Minuten 130 MW und nach 18 Minuten die maximale je gemessene Brandleistung von 202 MW erreichen kann. Die in dieser Graphik nicht erfassten prominenten realen Brände im Gotthard-Strassentunnel 2011, Viamala 2006 und Baregg 2008 stiegen schätzungsweise sogar noch schneller an bzw. liegen weiter links als die gezeigte Hüllkurve.

Schwache Brände, also mit niedriger Brandleistung, entwickeln sich tendenziell langsamer als Brände mit grosser Brandleistung. Nach 8 Minuten ab Brandbeginn kann die Energiefreisetzungsrate eines Lastwagenbrandes wie schon erwähnt bereits 130 MW erreichen; zu diesem Zeitpunkt liegt der früheste Datenpunkt für einen Personenwagenbrand (vgl. Abbildung 2)

Die Energiefreisetzungsrate eines offenen Brandes hat einen typischen Verlauf, wobei drei Phasen unterschieden werden können: die Brandentstehung, eine stationäre Phase und die Abkühlphase. Für die Auslegung der Lüftungssysteme innerhalb des Tunnels sind normierte Brandleistungen und Brandkurven erforderlich. Jedes nationale Regelwerk definiert diese Brände unterschiedlich. Die schweizerische Richtlinie ASTRA 13001 2008 nennt als maximale Brandleistung 30 MW, definiert aber keine Brandkurve. Die französische Richtlinie hingegen definiert lineare Brandkurven verschiedener Leistung. Ingason (2006) gibt eine Übersicht verschiedener möglicher Brandkurven. Im Hinblick auf die Transportphänomene, die in der Rezirkulation auftreten (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2, Pos. 1.2, 2.1 und 3), ist eine Abschätzung der möglichen Brandleistung in Abhängigkeit

der Zeit erforderlich. Die Hüllkurve der Brandversuche in Abbildung 2 gibt eine solche mögliche konservative Abschätzung.

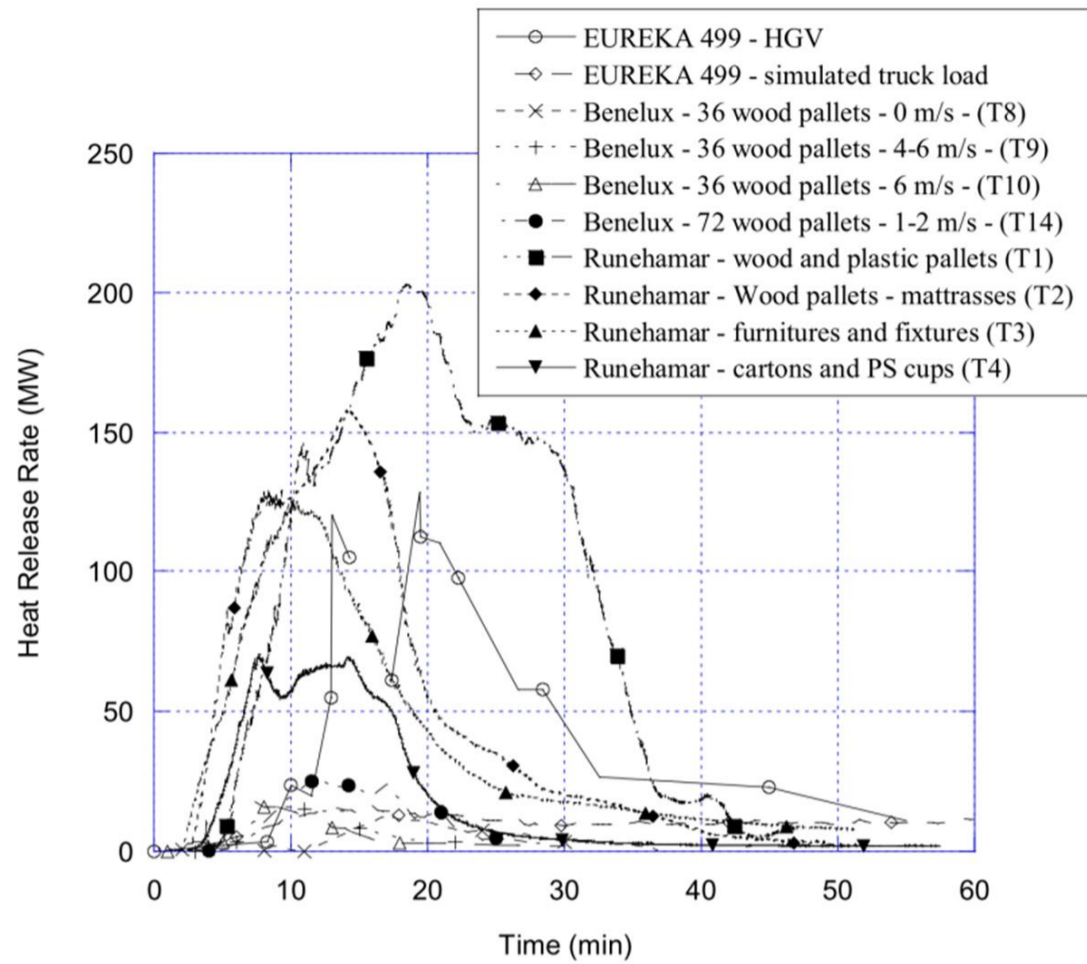


Abbildung 1 : Zeitlicher Verlauf der Energiefreisetzungsrates verschiedener Brandversuche mit Schwertransportern (Quelle: Ingason & Lönnemark 2004)

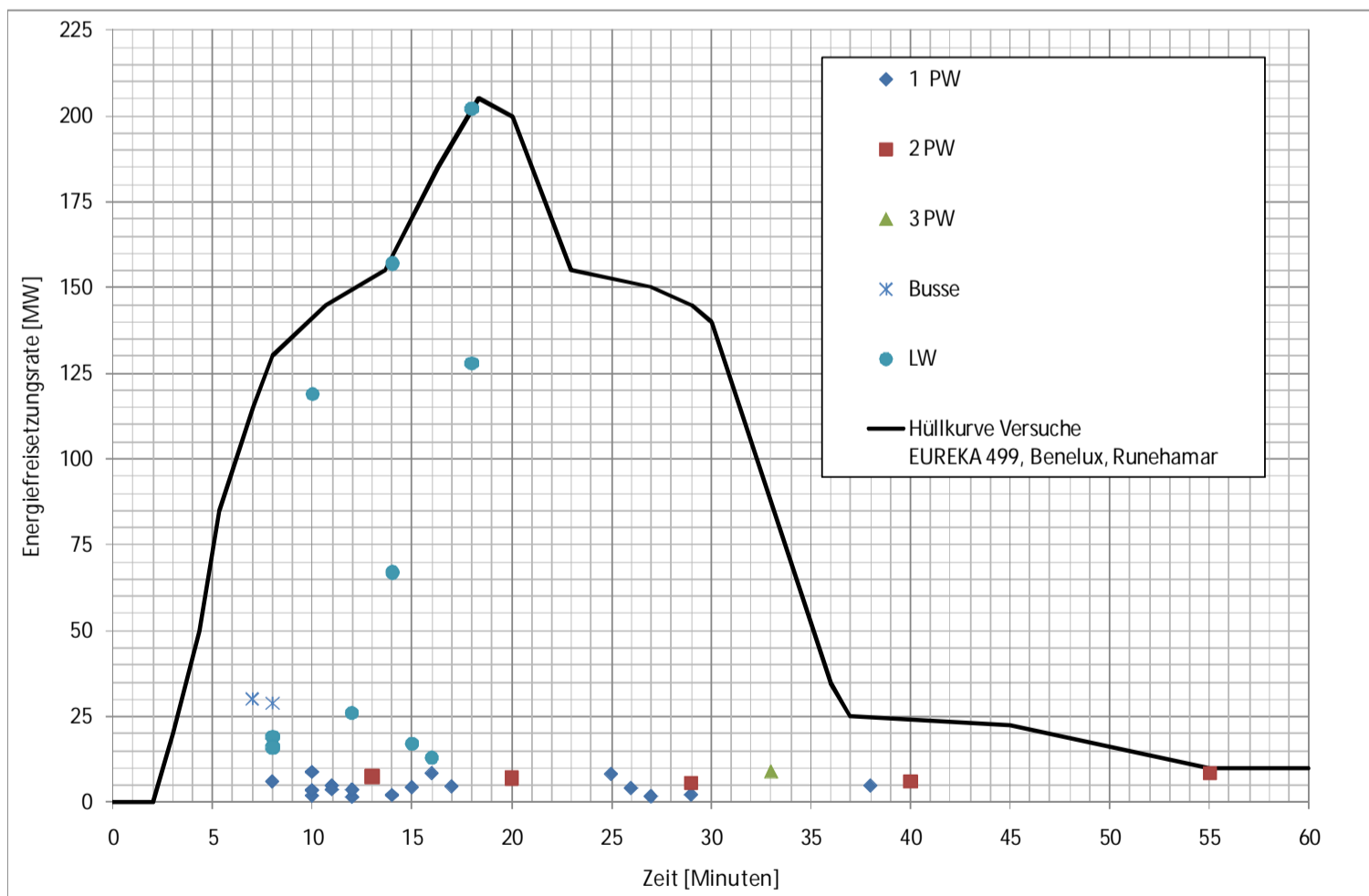


Abbildung 2: Brandleistung in Abhängigkeit der Zeit verschiedener Brandversuche mit Umhüllenden der Energiefreisetzungsrates aus Abbildung 2.1 (Quelle: Ingason & Lönnemark 2004 und Ingason 2006)

2.2.3 Rauchfreisetzung

„Die Rauchproduktion wie die Heißgastemperatur eines Fahrzeugbrandes sind gemäß EU 499 FIRETUN etwa proportional zur Energiefreisetzungsrate bzw. zur Brandleistung. Die Rußanteile im Rauch sind brandgutabhängig unterschiedlich.“ (Steinauer et al. 2007)
 „Reale Kraftfahrzeuge bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher brennbarer Komponenten. Neben den Kraftstoffen sind dies vor allem die im Fahrzeugbau zunehmend eingesetzten Kunststoffe. In neueren PW beträgt der Gewichtsanteil der Kunststoffe am Gesamtgewicht ca. 20 %. Hinzu kommt ein Anteil von ca. 6 Gew.-% an brennbarem Betriebsmittel. Eine weitere Komponente, die in die Rauchproduktion einfließt, ist die Ladung der Fahrzeuge.“ (Mayer 2006) Ferner hängt die Rauchproduktion und Zusammensetzung von der Qualität der Verbrennung ab.

Rauchproduktion

„Rauch besteht aus Rauchgasen sowie aus festen und flüssigen, durch die Luft transportierbaren Partikeln, die infolge unvollständiger Verbrennungsprozesse entstehen. Grundsätzlich kann hierbei zwischen Produkten unvollständiger Verbrennung bei Schwelbränden und Bränden mit offener Flamme unterschieden werden.

Die Rauchbildung bei Schwelbränden basiert auf der Freisetzung flüchtiger Stoffe infolge chemischer Zersetzung kohlenstoffhaltiger Materialien durch Wärmeeinfluss. Bei Durchmischung mit kalter Luft kondensieren die hochmolekularen Gewichtsanteile, und es entsteht ein Aerosol aus kleinsten Teertröpfchen und hoch siedenden Flüssigkeiten. Durch Agglomeration können Partikel mit Durchmesser bis zu 1 µm entstehen.

Im Gegensatz hierzu entsteht Rauch bei offenen Flammen in der Gasphase durch Pyrolyse flüchtiger Stoffe bei hohen Temperaturen und geringen Sauerstoffkonzentrationen. Er besteht überwiegend aus festen Partikeln.

Insbesondere turbulente Diffusionsflammen, wie sie bei real ablaufenden Bränden i.d.R. vorherrschen, neigen zur unvollständigen Verbrennung. Aufgrund der turbulenten Flammmausbildung entstehen in den Flammen Temperatur- und Konzentrationsgradienten, die lokal zu niedrigen Temperaturen bzw. Sauerstoffmangel führen können. Dadurch werden Pyrolysereaktionen möglich, die das Entstehen von aromatischen Kohlenwasserstoffen, wie beispielsweise Benzol (C₆H₆), bewirken. Durch Verkettung dieser Kohlenwasserstoffe entstehen in der Flamme kleinste Russpartikel mit Durchmessern von 10–100 nm, die in höheren Temperaturbereichen mit dem für die Flammen charakteristischen gelblichen Licht wieder verbrennen können. Benzol als Grundbaustein polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe ist jedoch über weite Temperaturbereiche sehr stabil. Dadurch entstehen insbesondere in Gebieten mit niedriger Temperatur und geringem Sauerstoffanteil sehr grosse Partikel mit Durchmesser bis zu 1 µm, die schliesslich unverbrannt als Rauch in die Umgebung entweichen können.“

Die letzten vier Absätze sind von Mayer 2006, Kap. 7.5.1, übernommen.

Rauchentstehungsanteile verschiedener Brennstoffe

„Die Rauchmenge wird im Wesentlichen beeinflusst durch folgende zwei Faktoren:

1. Chemische Zusammensetzung des Brennstoffs

Es zeigt sich, dass Brennstoffe, die sehr viele Sauerstoffatome enthalten, zu einer geringeren Rauchproduktion neigen. Dagegen produzieren Materialien mit sehr vielen Benzolringen sehr grosse Mengen an Rauch.

2. Brandumgebung

Mit abnehmendem Sauerstoffgehalt sowie bei sinkenden Verbrennungstemperaturen nimmt die Rauchproduktion zu (unvollständige Verbrennung).

Da die während eines Brandes freigesetzten Produkte in ihrer Masse proportional zum Massenverlust des verwendeten Brennstoffs sind, gilt für den Rauchentstehungsanteil

des jeweiligen Verbrennungsprodukts i allgemein folgender Zusammenhang:

$$Y_i = \frac{m_i}{\Delta m_{tot}} \quad [-] \quad \text{Gleichung 1}$$

Mit:	Y_i	[kg·kg ⁻¹]	Rauchentstehungsanteil für Produkt i
	m_i	[kg]	Produzierte Masse des Produkts i
	Δm_{tot}	[kg]	Massenverlust des Brennstoffs

Für Wannenbrände gilt insbesondere (s. Tewarson, 1995):

$$Y_i = \frac{\dot{G}_i''}{\dot{m}''} \quad [-] \quad \text{Gleichung 2}$$

Mit:	Y_i	[kg·kg ⁻¹]	Rauchentstehungsanteil für Produkt i
	\dot{G}_i''	[kg·s ⁻¹ ·m ⁻²]	Massenproduktionsrate für Produkt i
	\dot{m}''	[kg·s ⁻¹ ·m ⁻²]	Massenverlustrate des Brennstoffs

„Im sog. Cone-Calorimeter-Versuchen wurden für zahlreiche Brennstoffe die Entstehungsanteile für die Verbrennungsprodukte Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂) und Russ (S) bestimmt. In Tabelle 3 sind die jeweiligen Rauchentstehungsanteile für ausgewählte flüssige Brennstoffe aufgeführt.“

Brennstoff	Y_{CO}	Y_{CO_2}	Y_S (Russ)
	[kg·kg ⁻¹]	[kg·kg ⁻¹]	[kg·kg ⁻¹]
Heptan (C ₇ H ₁₆)	0.010	2.85	0.037
Langkettige Kohlenwasserstoffe	0.019	2.64	0.059
Heizöl, Rohöl, Diesel	0.041	2.37	0.097 – 0.1

Tabelle 3: Rauchentstehungsanteile für ausgewählte flüssige Brennstoffe (Sekundärquelle: Mayer 2006; Originalquelle: Tewarson 1995)

„Auf Basis des EUREKA-Projektes EU-FIRETUN hat Steinert (1994) aus Brandversuchen mit realen Fahrzeugen spezifische Rauchentstehungsanteile für die Rauchgaskomponenten Russ abgeleitet, die in Tabelle 4 aufgeführt sind.“

Fahrzeug	Y_S [kg·kg ⁻¹]
Blech-PW	0.095
Plastik-PW	0.08
Reisebus	0.05
TIR-Truck (Sattelzug beladen mit Möbeln)	0.02 – 0.025

Tabelle 4: Russentstehungsanteile für reale KfZ (Steinert 1994)

Die letzten vier Absätze und die Gleichung 2 und die Tabelle 3 sind von Mayer 2006, Kap. 7.5.2, übernommen.

Der Vergleich der Tabelle 3 und der Tabelle 4 lässt erkennen, dass bezüglich Russproduktion Fahrzeugbrände gut an Wannenbrände angenähert werden können: Ein PW mit geringem Kunststoffanteil russt ähnlich stark wie ein Wannenbrand mit Diesel; ein Reisebus russt ähnlich wie langkettige Kohlenwasserstoffe. Die folgenden Abschnitte geben weitere experimentelle Ergebnisse zu diesem Thema wieder.

Rauchentstehungsanteile repräsentativer Materialproben aus einem PW sowie eines ganzen PWs (nach Lönnermark & Blomqvist 2006)

Lönnermark & Blomqvist (2006) haben die Emissionen von Fahrzeugbränden in zwei

Versuchsreihen untersucht. Ein Ziel der Versuchsreihen war, die Zusammensetzung des Rauchs ausgewählter Materialien aus einem Fahrzeug sowie des gesamten Fahrzeugs zu bestimmen.

Die erste Versuchsreihe bestand in der kleinmassstäblichen Verbrennung von ausgewählten Materialienproben aus einem Mittelklassewagen in einer Brennkammer nach ISO 5659. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigten, dass viele Materialien des Wagens Stickstoff enthielten und bei der Verbrennung Blausäure (HCN) und andere stickstoffhaltige Verbindungen freisetzen. Weiter wurden Salzsäure (HCl) und Schwefeldioxid (SO₂) freigesetzt. Die grössten Schadstoffhersteller waren die Polsterung der Sitze (wahrscheinlich PUR), die Füllung der Türflügel und die Verkabelung. Das Vorhandensein chlorhaltiger Verbindungen in den Emissionen weist auf das Risiko der Emission chlorhaltiger organischer Verbindungen wie Dioxine hin. Die Verbindung Bromwasserstoff (HBr) wurde zwar im Rauch keiner Probe festgestellt, obwohl bromhaltige Flammhemmstoffe in den Bauteilen moderner Fahrzeuge eingesetzt werden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese Verbindung in Konzentrationen unterhalb der Detektionsgrenze der Messgeräte vorhanden war.

In der zweiten Versuchsreihe wurde ein Mittelklassewagen aus dem Jahr 1998 in einem dreistufigen Test verbrannt; zwischen einer Stufe und der nächsten wurde der Wagen gelöscht und an einer anderen Stelle wieder angezündet. Die Brandleistung wurde gemessen und die Abgase und das Löschwasser wurden auf ihre Zusammensetzung untersucht; dabei wurde der zeitliche Verlauf der Brandleistung und einiger fester und gasförmiger Emissionen festgehalten sowie die gesamte freigesetzte Masse der einzelnen Verbindungen und ihr Rauchentstehungsanteil bestimmt. Die höchste gemessene Brandleistung betrug insgesamt 3'500 kW und deren konvektiver Anteil 2'500 kW; der Wagen wies eine durchschnittliche Verbrennungswärme von 35 MJ/kg auf. Es wurden erhebliche Mengen an HCN, HCl und SO₂ im Rauch festgestellt. Ferner wurde der Rauch auf das Vorhandensein von leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen wie Benzen, auf Aldehyde, auf polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und auf die Partikelmenge, Zusammensetzung und Grössenverteilung untersucht.

Der häufigste leichtflüchtige Kohlenwasserstoff war Benzen, gefolgt von Toluol und Styren.

Aldehyde und Isocyanate sind Gruppen organischer Verbindungen, die bereits bei sehr niedrigen Konzentrationen reizend auf die Schleimhäute der Augen und der Mund-Nasen-Höhle wirken. Vertreter der Gruppe dieser Verbindungen wurden in signifikanten Konzentrationen in den Rauchgasen festgestellt.

Das Maximum der Durchmesserverteilung der Rauchpartikel lag bei 0.1 µm. Partikel dieser Grösse sind alveolengängig. Die Untersuchung der Zusammensetzung der Partikel zeigte hohe Konzentrationen an Zink, Blei und Chlor sowie signifikante Konzentrationen an Brom.

Diese Untersuchung der Rauchzusammensetzung eines Fahrzeugbrandes zeigte, dass signifikante Mengen an schädlichen Verbindungen sowohl im Rauch wie auch im Löschwasser freigesetzt werden.

2.2.4 Wannenbrände als Nachbildung realer Brände

Wannenbrände

Eine praktische Methode, um Fahrzeugbrände in Tunneln zu simulieren, sind Wannenbrände. Dabei wird ein flüssiger Brennstoff, typischerweise Dieselöl oder Heptan, in einer Blechwanne im Tunnel verbrannt. Da eine einfache Beziehung zwischen der Brandleistung und der Wannenfläche besteht, können somit Brände beliebiger Leistung simuliert werden (Quellen Mayer 2006 und Steinauer et al. 2007).

„Die bei Wannenbränden freigesetzte Leistung lässt sich für eine Reihe von Brandmitteln über die bei der Verbrennung entstehende Massenverlustrate \dot{m}'' [kg·s⁻¹·m⁻²] und den ef-

fektiven Heizwert ΔH_{eff} [kJ·kg⁻¹] bezogen auf die Brandfläche A_f [m²] wie folgt ermitteln“ (nach Mayer 2006):

$$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m}'' \cdot \Delta H_{eff} \quad [\text{kW}] \quad \text{Gleichung 3}$$

Bei der Bestimmung der Energiefreisetzung bzw. der Brandleistung ist der Verbrennungsgrad χ [-] zu berücksichtigen, da bei der Verbrennung nicht der gesamte Energieinhalt des Brandguts umgesetzt wird bzw. nicht die gesamte Brandmasse in den Gaszustand überführt wird. Der Verbrennungsgrad χ gibt an, wie hoch der effektive Heizwert ΔH_{eff} bezogen auf den unteren Heizwert ΔH_u [kJ·kg⁻¹] ist.

$$\chi = \frac{\Delta H_{eff}}{\Delta H_u}$$

Erfahrungsgemäss kann bei Wannenbränden, in Abhängigkeit des verwendeten Brandmittels, von Verbrennungsgraden zwischen 60 und 90 % ausgegangen werden (vgl. Karlsson & Quintiere 1999).

Für flüssige Brennstoffe gilt zur Bestimmung der Massenverlustrate nach Babrauskas (1995) folgender semiempirischer Ansatz:

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot \beta' \cdot D}) \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}] \quad \text{Gleichung 4}$$

Mit:	\dot{m}''	[kg·s ⁻¹ ·m ⁻²]	Massenverlustrate
	\dot{m}''_{∞}	[kg·s ⁻¹ ·m ⁻²]	Massenverlustrate für Branddurchmesser > 0.2 m
	k	[m ⁻¹]	Extinktions-Absorptions-Koeffizient der Flamme
	β'	[-]	Mittlere Wellenlängenkorrektur
	D	[m]	Durchmesser (quadratische und ähnliche Formen können als kreisförmige Flächen bei gleicher Grundfläche betrachtet werden)

Die freigesetzte Energie wird dann aus folgendem Ausdruck berechnet:

$$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m}''_{\infty} \cdot (1 - e^{-k \cdot \beta' \cdot D}) \cdot \chi \cdot \Delta H_u \quad [\text{kW}] \quad \text{Gleichung 5}$$

Typische Werte für die Brandraten verschiedener Wannenbrände sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Brennstoff	Dichte bei T=15°C [kg·m ⁻³]	Unterer Heizwert ΔH _u [MJ·kg ⁻¹]	Theor. Abbrandrate m̈"∞ [kg·s ⁻¹ ·m ⁻²]	Extinktionsparameter k·β' [m ⁻¹]	Verbrennungsrate χ [-]	Effektive Brandleistung Q̇ _{eff} [MW·m ⁻²]	Russentste-hunganteil Y _s [kg·kg ⁻¹]	Anmerkung
Benzin	730	43.7	0.055	2.1	0.7	1.53	Ca. 0.09	Stark russend
Diesel	815-855	39.7	0.035	1.7	0.9	1.07	Ca. 0.1	Stark russend
n-Heptan	700	44.6	0.101	1.1	0.7	2.24	0.037	Schnelle Energiefrei-setzung, mässige Russprodukti-on

Tabelle 5: Branddaten verschiedener Wannenbrände nach Ergebnissen durchgeführter Versuche bei Wannendurchmesser 1.0 m. Die Brandleistung ist berechnet nach Gleichung 5. (Quelle: Steinauer et al. 2007 mit Daten von Babrauskas 1995)

Die bei der Verbrennung von Flüssigbrennstoffen wie Benzin, Diesel oder Heptan entstehenden Rauchmengen und -dichten entsprechen weitgehend dem Rauch brennender Fahrzeuge (vgl. Tabelle 3 und Tabelle 4). Dies ist ein wesentlicher Grund für die Durchführung von Wannenbränden in Tunnelbrandversuchen. Ein wesentlicher Unterschied ist aber, dass die Brandleistung von Wannenbränden in sehr kurzer Zeit, ca. 30 Sekunden, erreicht wird, die Brandleistung von Fahrzeugen jedoch erst nach mehreren Minuten (vgl. Abbildung 2).

Abschätzung der Rauchmenge aus Wannenbränden

Mit den Gleichungen 1 bis 5 und den Tabellen 3, 4 und 5 sind nun einfache Beziehungen und genügend Daten vorhanden, um eine Abschätzung der Massenproduktion der Brandprodukte in Abhängigkeit der Brandleistung vorzunehmen. Die Massenproduktion \dot{G}_i [kg·s⁻¹] der Spezies i eines Wannenbrandes wird durch die folgende Beziehung abgeschätzt:

$$\dot{G}_i = A_f \cdot Y_i \cdot \dot{m}'' \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{Gleichung 6}$$

Da die Brandfläche A_f [m²] und die Massenverlustrate \dot{m}'' [kg·s⁻¹·m⁻²] implizite Funktionen der Brandleistung \dot{Q} sind, wird die Gleichung 6 zusammen mit der Gleichung 4 und der Gleichung 5 aufgelöst.

Diese Massenproduktion wird in eine mittlere Konzentration c_i [g·m⁻³] der Spezies i in der Tunnelluft oder der Abluft umgerechnet, indem sie mit dem kalten, den Brandgasen beigemischten Luftstrom \dot{V}_L [m³·s⁻¹] im Tunnel oder Abluftkanal verrechnet wird:

$$c_i = \frac{\dot{G}_i}{\dot{V}_L} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad \text{Gleichung 7}$$

Zwischen der Rauchgaskonzentration in [kg·m⁻³] und [ppm] besteht der folgende Zusammenhang:

$$c_i = ppm_i \cdot \frac{M_i}{V_0} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \text{ oder } [\text{g} \cdot \text{m}^{-3}] \quad \text{Gleichung 8}$$

Mit:	M_i	[kg·mol ⁻¹] oder [g·mol ⁻¹]	Molmasse der Spezies i. $M_{CO}=28.01055$ [g·mol ⁻¹], $M_{CO_2}=44.00995$ [g·mol ⁻¹]
	V_0	[m ³ mol ⁻¹]	Molvolumen der idealen Gase. $V_0 = 2.2414 \cdot 10^{-2}$ [m ³ mol ⁻¹]

Zahlenbeispiel zu Rauchmenge aus Wannenbränden

Der Dimensionierungsbrand in der Schweiz ist ein Lastwagenbrand mit $\dot{Q} = 30$ MW Brandleistung (vgl. ASTRA 13001 2008). Zur Abschätzung der produzierten Russmenge wird ein Wannenbrand der gleichen Brandleistung mit Heptan herangezogen. Mit den Daten aus Tabelle 5 und der Gleichung 5 hat ein solcher Wannenbrand einen Durchmesser von $D = 3.52$ m bzw. eine Fläche von $A_f = 9.72$ m². Die Massenverlustrate dieses Heptanbrandes ist $\dot{m}'' = 0.10$ kg·s⁻¹·m⁻² nach Gleichung 4. Aus Gleichung 6 und dem Russentstehungsanteil aus Tabelle 3 berechnet sich die Russproduktion zu $\dot{G}_S = 0.036$ kg·s⁻¹. Die Gleichung 6 ist auch gültig für die Berechnung der CO- und CO₂-Produktion. Diese betragen bei einem solchen Brand $\dot{G}_{CO} = 0.01$ kg·s⁻¹ und $\dot{G}_{CO_2} = 2.74$ kg·s⁻¹. Für die Rezirkulation zum Beispiel vom Kamin zum Portal bei einem Tunnel mit Rauchabsaugung kann von Interesse sein, wie gross die Schadstoffkonzentrationen am Austritt des Kamins sind. Diese sind von der abgesaugten Luftmenge abhängig. Typischerweise werden 200 m³s⁻¹ Frischluft bei Umgebungsbedingungen abgesaugt. Diese Luft ist frei von Russ und CO, hat aber eine CO₂-Grundkonzentration von 390 ppm. Unter der Annahme, dass der gesamte Rauch abgesaugt wird, ergibt sich aus der Gleichung 7 und der Gleichung 8 eine CO-Konzentration von $c_{CO} = 38$ ppm und eine CO₂-Konzentration von $c_{CO_2} = 7'364$ ppm in der Abluft. Die Tabelle 6 gibt eine Übersicht der Abgaskonzentrationen für einen Wannenbrand mit 30 MW Brandleistung mit Diesel und Heptan bei 200 m³s⁻¹ Abluftmenge.

Brennstoff	Brandprodukte bei Brandleistung 30 MW			Konzentrationen der Brandprodukte in der Abluft bei 200 m ³ s ⁻¹				
	\dot{G}_{CO} [g·s ⁻¹]	\dot{G}_{CO_2} [g·s ⁻¹]	\dot{G}_S [g·s ⁻¹]	c_{CO}		c_{CO_2}		c_S [g·m ⁻³]
				[g·m ⁻³]	ppm	[g·m ⁻³]	ppm	
Heptan (C ₇ H ₁₆)	10.0	1'990.0	36.0	0.048	38.0	14.5	7'364.0	0.178
Heizöl, Rohöl, Diesel	34.0	2'739.0	84.0	0.172	138.0	10.7	5'457.0	0.420

Tabelle 6: Abschätzung der Produktion und Konzentration der Brandprodukte von unterschiedlichen Wannenbränden bei einer Brandleistung von 30 MW und einer Abluftmenge von 200 m³s⁻¹. Die Grundkonzentration an CO wird auf 390 ppm angesetzt.

Man beachte in Tabelle 6 die deutlich höhere Russ- und CO-Produktion eines Dieselbrandes.

Weitere Brände

In der soeben vorgestellten Rauchproduktion aus Wannenbränden besteht ein quantifizierbarer Zusammenhang zwischen der Rauchproduktion und der Brandleistung. Sichttrübender Rauch kann aber auch durch andere Mechanismen entstehen, etwa durch verdampfendes Öl auf heissen Flächen. Dadurch entstehen grosse Rauchmengen bei niedriger thermischer Leistung. Dieser Effekt wird zur Erzeugung von „Theaterrauch“ in Nebelmaschinen genutzt. Er tritt auch regelmässig als Schadenfall bei Fahrzeugen auf. Auf die Quantifizierung der Rauchmenge in Abhängigkeit der Wärmequelle und der optischen Eigenschaften dieses „kalten“ Rauchs wird hier nicht eingegangen.

2.2.5 Gefährdungspotential

Ein Brand erzeugt hohe Temperaturen, Wärmestrahlung, niedrige Sauerstoffkonzentrationen, niedrige Sichtweite und verschiedene tödliche und/oder toxische Gase. Alle diese Phänomene, wovon einige mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden können, sind für den Menschen, das Bauwerk, die Ausrüstung und die Fahrzeuge gefährlich.

Bei der Rezirkulation allerdings interessiert das Ergebnis der Immission, vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2, also die vom Brand ausgehende Gefährdung der Gegenröhre oder anderer Objekte fernab der direkten Einwirkung des Brandes. Daher fallen bei der Beurteilung des Gefährdungspotentials eines Brandes die hohen Temperaturen, die Wärmestrahlung und die niedrigen Sauerstoffkonzentrationen weg. Übrig bleibt die niedrige Sichtweite und die Auswirkung toxischer (Rauch-)Gase auf den Menschen. Der rezirkulierende Rauch führt dann:

- zum Verlust der Orientierung;
- zur Vergiftung.

Ein Tunnel wird in der Regel wenige Minuten nach Brandbeginn für den Verkehr gesperrt und die Lüftung in der Gegenröhre derart eingestellt, dass kein Rauch durch das Portal eintreten kann. Diese Massnahmen verringern die Einwirkungsmöglichkeit und Einwirkungsdauer des rezirkulierenden Rauchs auf die Tunnelbenutzer (siehe mehr dazu unter Kapitel 2.3). Dennoch können in der Gegenröhre und in der Umgebung der Portale folgende Tunnelnutzer vom rezirkulierenden Rauch betroffen sein:

- Tunnelnutzer, die aus der Ereignisröhre über Querverbindungen in die Gegenröhre flüchten und dort vom Rauch überrascht werden;
- in den Tunnel einfahrende Tunnelnutzer oder Rettungskräfte;
- aus dem Tunnel ausfahrende Tunnelnutzer, die im Portalbereich vom Rauch überrascht werden.

Für alle drei Gruppen ist der Verlust der Orientierung vorhanden. Eine Vergiftungsmöglichkeit ist für die erste Gruppe zu prüfen. Die gefährdetste Gruppe sind die Fliehenden aus der Ereignisröhre.

Sichtbarkeit von Schildern in Rauch im Tunnel

Die Untersuchungen von Jin (2002) zur Sichtbarkeit emittierender Notausgangsschilder ohne Rauch haben gezeigt, dass die Sichtbarkeit eines Schildes von den folgenden Parametern abhängt:

- dem Sehwinkel;
- der absoluten Grösse des Schildes;
- der Leuchtstärke des Schildes bei emittierenden Schildern;
- der Wellenlänge des Lichts;
- der Intensität von fremden Lichtquellen in der Umgebung des Schildes.

Bei reflektierenden Schildern erscheinen anstelle der Leuchtstärke des Schildes die Leuchtstärke der beleuchtenden Lichtquelle und das Reflexionsvermögen des Schildes in der obigen Aufzählung. In Rauch kommen zusätzlich zu diesen Faktoren hinzu:

- die optische Dichte des Rauchs oder Extinktion;
- die Leuchtstärke der Hintergrundbeleuchtung;
- die Lichtstreuung im Rauch;
- der Kontrast zwischen dem gesichteten Objekt und seinem Hintergrund.

Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf die optische Dichte des Rauchs und die damit verbundene Sichtweite bzw. Einschränkung der Sichtbarkeit eines Schildes. Für die Einzelheiten der experimentellen Umstände und die Empfehlungen zur Gestaltung von Schildern wird auf die Quellen Jin (2002) und Jin (1978) hingewiesen.

Sichtweite

Die optischen Eigenschaften des Rauchs werden ausgedrückt als Extinktion oder Sichttrübung K [m^{-1}]. Die Sichttrübung ist eine extensive Eigenschaft des Rauchs, die mit einem Sichttrübungsmessgerät gemessen werden kann. Sie ist von der Wellenlänge des Lichts, der Lichtstreuung und der Lichtabsorption an den Rauchpartikeln abhängig. Sie ist mit der Sichtweite S [m] des Rauchs über die einfache empirische Beziehung

$$K \cdot S = A \quad [-] \quad \text{Gleichung 9}$$

verknüpft, wobei A [-] eine Konstante ist, die abhängig von der Literaturquelle zwischen 2 und 6 (PIARC 1999) und 3 und 8 (Mulholland 2002) variiert. Die Variation von A ist unter anderem davon abhängig, ob das zu sehende Objekt Licht reflektiert oder emittiert, ob der Rauch die Augen reizt oder neutral ist, ob die Augen an hell oder dunkel angepasst sind und ob die Hintergrundbeleuchtung stark oder schwach ist. Die Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse von zwei Studien, aus denen die oben genannten Werte für A stammen.

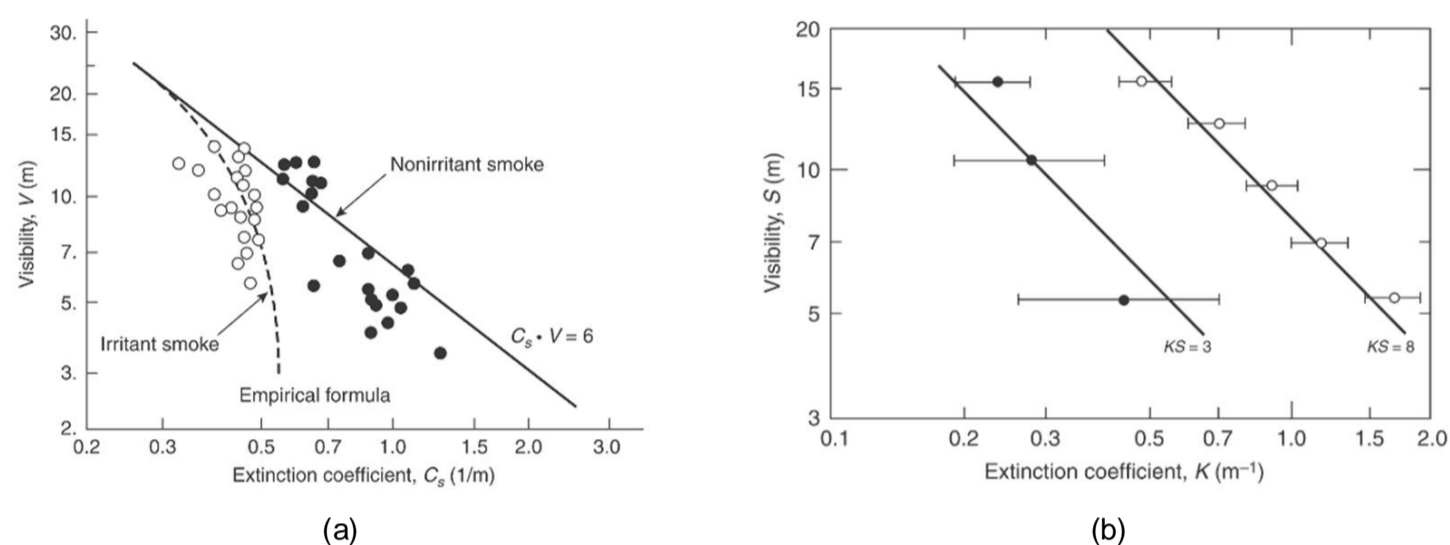


Abbildung 3: Sichtweite gegen die Sichttrübung aufgetragen: (a) bei Licht emittierenden Schildern bei reizendem (◦) und neutralem (•) Rauch; (b) bei neutralem Rauch von Licht emittierenden (◦) und reflektierenden (•) Schildern. Quelle: (a) Jin 2002, (b) Mulholland 2002

Der Fall der Sichtweite eines reflektierenden Schildes bei reizendem Rauch ist in den genannten Studien nicht abgedeckt. Mulholland (2002) weist darauf hin, dass die Sehkraft unter reizendem Rauch bei einer Sichttrübung von 0.25 m^{-1} im Vergleich zur Sehkraft unter neutralem Rauch dramatisch abnimmt.

Zur Festlegung eines Grenzwerts der Sichttrübung für die Rauchrezirkulation ist es notwendig, eine minimale Sichtweite festzulegen.

- John (1983) folgert aus Literaturangaben, dass für eine erfolgreiche Flucht in Gebäuden ein reflektierendes Schild über eine Entfernung von 25 m erkennbar bleiben muss; dafür liegt der Wert von A bei 3 bzw. K bei 0.12 m^{-1} .
- Jin (2002) schlägt als zulässige Sichttrübung für Personen, die nicht an Brandrauch gewöhnt und nicht mit den Örtlichkeiten vertraut sind, den Wert $K = 0.15 \text{ m}^{-1}$ vor. Dies entspricht bei $A = 3$ einer Sichtweite von 20 m. Dieser Wert wurde mit Rauch aus der Pyrolyse von Holz ermittelt und entspricht der Sichttrübung, ab der die emotionalen Verunsicherungen der Probanden deutlich zunahm (gemessen an Puls und Konzentrationsvermögen).
- Fujimara et al. (1988) nennt für die Sichttrübung in Tunneln den Wert 0.4 m^{-1} als Grenzwert, ohne diesen jedoch zu begründen. Er soll im Folgenden nicht berücksichtigt werden.
- Mulholland (2002) weist darauf hin, dass die Sehkraft unter reizendem Rauch bei einer Sichttrübung von 0.25 m^{-1} im Vergleich zur Sehkraft unter neutralem Rauch dramatisch abnimmt. Das entspricht bei $A = 3$ einer Sichtweite von 12 m.
- Die absolute unterste Grenze der Sichtweite kann wie folgt festgelegt werden: Die Orientierung hat ein Flüchtender dann verloren, wenn er, auf dem einen Bankett ste-

hend, die Signalisation auf dem anderen Bankett nicht mehr sehen kann. Die Entfernung zwischen den Banketten ist in einem zweispurigen Tunnel ungefähr 10 m. Somit kann die minimale Sichtweite auf 10 m festgelegt werden. Dies entspricht einer Sichttrübung $K = 0.3 \text{ m}^{-1}$ bei $A = 3$.

Aus den oben dargestellten experimentellen Ergebnissen für reflektierende Schilder liegen sinnvolle Grenzwerte für die zulässige Sichtweite zwischen 10 und 25 m bzw. für die Sichttrübung zwischen 0.12 m^{-1} und 0.3 m^{-1} . Der bevorzugte psychologische Wert ist 0.15 m^{-1} .

Sichttrübung und Rauchkonzentration

Durchquert ein monochromatischer Lichtstrahl der Wellenlänge λ ein Medium, hier Rauch, so wird dessen anfängliche Intensität I_λ^0 auf dem Pfad der Länge L durch Absorptions- und Streuvorgänge auf die Intensität I_λ abgeschwächt. Der Quotient zwischen einfallender und austretender Intensität wird Transmissionsgrad T genannt und ist wie folgt mit der Sichttrübung K , auch Absorptionskoeffizient genannt, verknüpft:

$$T = \frac{I_\lambda}{I_\lambda^0} = e^{-K \cdot L} \quad [-] \quad \text{Gleichung 10}$$

Die Sichttrübung ist eine extensive Eigenschaft des Rauchs und kann als das Produkt eines massenbezogenen Extinktionskoeffizienten K_m [m^2g^{-1}] und der Rauchkonzentration c_S [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] ausgedrückt werden:

$$K = K_m \cdot c_S \quad [\text{m}^{-1}] \quad \text{Gleichung 11}$$

Der massenbezogene Extinktionskoeffizient bzw. die spezifische Sichttrübung K_m ist von der Verteilung der Partikelgrösse, der optischen Eigenschaften des Rauchaerosols und der Wellenlänge des Lichts abhängig (siehe Mulholland 2002). Die in der Literatur verfügbaren Werte der spezifischen Sichttrübung wurden für Holz und Plastik bei offener Verbrennung und Pyrolyse kleiner Mengen unter polychromatischem Licht ermittelt. Sie sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Abweichungen der Werte infolge der Nutzung polychromatischen anstatt monochromatischen Lichts werden auf 22 % bei Rauchkonzentrationen von 0.06 bis $2.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ geschätzt. Diese Konzentrationen liegen im Bereich der hier interessierenden Werte, vgl. Tabelle 7. Wenn keine rauchspezifischen Daten vorhanden sind, können diese Werte als Abschätzung für die spezifische Sichttrübung herangezogen werden.

Verbrennung von Holz und Plastik	Spezifische Sichttrübung K_m [m^2g^{-1}]
Rauch aus offener Flamme	7.6
Rauch aus Pyrolyse	4.4

Tabelle 7: Abschätzung der spezifischen Sichttrübung von Rauch aus der Verbrennung von Holz und Plastik, gewonnen unter polychromatischem Licht (zitiert von Mulholland 2002)

Aus der Gleichung 11 und den Werten der Tabelle 7 kann eine Abschätzung der kritischen Rauchkonzentration vorgenommen werden.

Eine weitere Kennzahl für Rauch ist die optische Dichte D [m^{-1}]. Zwischen ihr und der Sichttrübung K [m^{-1}] besteht die Beziehung:

$$K = \ln(10^D) \quad [\text{m}^{-1}] \quad \text{Gleichung 12}$$

Analog zur Sichttrübung wird auch hier eine massenbezogene spezifische optische Dichte D_m definiert. Diese kann in einem standardisierten Labortest in einer Rauchkammer

mit Volumen V_c und dem Massenverlust Δm der Probe ermittelt werden:

$$D_m = D \cdot \frac{V_c}{\Delta m} = \frac{D}{c_S} \cdot Y_S \quad [\text{m}^2\text{g}^{-1}] \quad \text{Gleichung 13}$$

Die spezifische optische Dichte D_m wurde für einige Brennstoffe experimentell ermittelt (vgl. Mulholland 2002). Für die zum Wannenbrand geeigneten flüssigen Brennstoffe ist sie nur für n-Heptan bekannt (vgl. Tabelle 8).

Brennstoff	Spez. optische Dichte D_m [m^2g^{-1}]
n-Heptan	0.19

Tabelle 8: Spezifische optische Dichte von Rauch aus der Verbrennung von n-Heptan (I.S.T. 2006)

Zahlenbeispiel zur Sichttrübung

Gesucht ist die Rauchkonzentration in der Tunnelluft, bei der die Sichtweite gerade noch 10 m beträgt. Die Sichttrübung wird auf der Grundlage der Diskussion der Sichtweite auf $K = 0.3 \text{ m}^{-1}$ festgelegt. Mit dem allgemeinen Wert für die spezifische Sichttrübung $K_m = 7.6 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ergibt sich die maximal zulässige Russkonzentration:

$$c_S|_{S=10 \text{ m, allg.}} = \frac{K}{K_m} = \frac{0.3}{7.6} = 3.95 \cdot 10^{-2} \quad [\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] \quad \text{Gleichung 14}$$

Die gleiche Abschätzung für n-Heptan ergibt über die spezifische optische Dichte $D_m = 0.19 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$:

$$c_S|_{S=10 \text{ m, Heptan}} = \frac{D \cdot Y_S}{D_m} = \frac{K \cdot Y_S}{D_m \cdot \ln(10)} = \frac{0.3 \cdot 0.037}{0.19 \cdot 2.3} = 2.54 \cdot 10^{-2} \quad [\text{g}\cdot\text{m}^{-3}] \quad \text{Gleichung 15}$$

Aus diesen Zahlen wird ersichtlich, dass die grobe Abschätzung mit der spezifischen Sichttrübung $K_m = 7.6 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ zu progressiveren kritischen Rauchkonzentrationen als die realitätsnähere Abschätzung über die spezifische optische Dichte und den Russentsteigungsanteil ausgewählter Brennstoffe führt.

Vorgehen	Zulässige Russkonzentration [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]		
	Bei $K = 0.12 \text{ m}^{-1}$	Bei $K = 0.15 \text{ m}^{-1}$	Bei $K = 0.3 \text{ m}^{-1}$
Über die spez. Sichttrübung $K_m = 7.6 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$	$1.58 \cdot 10^{-2}$	$1.97 \cdot 10^{-2}$	$3.95 \cdot 10^{-2}$
Aus Brandexperiment für Heptan über die spez. optische Dichte $D_m = 0.19 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$	$1.01 \cdot 10^{-2}$	$1.27 \cdot 10^{-2}$	$2.54 \cdot 10^{-2}$

Tabelle 9: Abschätzung der maximal zulässigen Russkonzentration bei verschiedenen Sichttrübungen

Toxizität (Quelle: PIARC 1999)

Die Toxizität des Brandrauchs wird hauptsächlich durch eine kleine Anzahl Gase bestimmt, die additiv, synergisch oder entgegengesetzt wirken können. Die Auswirkung der Addition von beispielsweise CO und HCN kann dargestellt werden durch:

$$A = \frac{[\text{CO}]}{\text{LC}_{50\text{CO}30}} + \frac{[\text{HCN}]}{\text{LC}_{50\text{HCN}30}} \quad [-] \quad \text{Gleichung 16}$$

Wobei: [...] für die effektive Konzentration steht,

$LC_{50}CO_{30} = 3'000 \text{ ppm}$ Konzentrationsniveau, bei dem 50 % der Personen nach 30 Minuten durch die alleinige Wirkung von CO sterben.

$LC_{50}HCN_{30} = 150'000 \text{ ppm}$ Konzentrationsniveau, bei dem 50 % der Personen nach 30 Minuten durch die alleinige Wirkung von HCN sterben.

Wenn $A = 1$, sterben nahezu 50 % der Personen.

Wenn $A > 1$, sterben möglicherweise alle Personen.

Es wurde nachgewiesen, dass dieser Zusammenhang für CO- und HCN-Konzentrationen von 25 %, 50 % und 75 % ihrer entsprechenden LC_{50} -Werte bei 30 Minuten gilt.

Die Gleichung 16 wird Bruchsummenansatz genannt. Eine einfachere Vorgehensweise betrachtet nur die maximale zulässige Konzentration für ein bestimmtes Gas. Die Tabelle 10 stellt umfassende Daten zu tödlichen Konzentrationsniveaus für die Aussetzungsdauern 5 und 30 Minuten zusammen.

Gas	Assumed LC_{50} (for humans)	Reference Data (species, minutes)			
		5 min (ppm)	30 min (ppm)		
CO ₂	carbon dioxide	>150,000	>150,000	Levin et al. (1987b)	r
C ₂ H ₄ O	acetaldehyde		> 20,000	Sax (1984) ACGIH (1980)	LC(m,240)=1500 LC(r,240)=4000; LC(ham,250)=17,000 LC(r,30)=20,000; LC(r,420)=16,000
C ₂ H ₄ O ₂	acetic acid		11,000	Levin et al. (1987b)	LC(m,60)=5620
NH ₃	ammonia	20,000	9,000	Sakurai (1988) Nishimaru (1985)	EC(m,5)=20,000; EC(m,30)=4400 EC(r,5)=10,000; EC(r,30)=4000
HCl	hydrogen chloride	16,000	3,700	Hartzell et al. (1985) Higgins et al. (1972)	r, p LC(r,5)=40,989
CO	carbon monoxide		3,000	Levin et al. (1987b) Kimmerle (1974)	LC(r,30)=4600 LC(h,30)=3000
HBr	hydrogen bromide		3,000	Sax (1984)	LC(m,60)=814; LC(r,60)=2858
NO	nitric oxide	10,000	2,500	ACGIH (1980)	1/5 as toxic as NO ₂ LC(h,1)=15,000
COS	carbonyl sulfide		2,000	Sax (1984)	LC ₀ (var., 35-90)=1000-1400
H ₂ S	hydrogen sulfide		2,000	Sax (1984) Kimmerle (1974)	LC(m,60)=673; LC ₀ (h,30)=600; LC ₀ (ham,5)=800 LC(h,30)=2000
HF	hydrogen fluoride	10,000	2,000	Sax (1984) Higgins et al. (1972) Kimmerle (1974)	LC(gpg,15)=4327; LC(p,60)=1774; LC ₀ (h,30)=50 LC(m,60)=456; LC(r,60)=1276 LC(r,5)=18 200 LC(gpg,2)=300; LC(m,5)=6247; LC(r,5)=18 200
C ₃ H ₄ N	acrylonitrile		2,000	Sax (1984)	LC(gpg,240)=56; LC(r,240)=500
COF ₂	carbonyl fluoride		750	ACGIH (1980)	LC(r,60)=360
NO ₂	nitrogen dioxide	5,000	500	Sakurai (1988) Nishimaru (1985) Higgins (1972)	EC(m,5)=2 500; EC(m,30)=700 EC(r,5)=5 000; EC(r,30)=300 LC(m,5)=83 331; LC(r,5)=1 880
C ₃ H ₅ O	acrolein	750	300	Sax (1984) Kaplan et al. (1984)	LC(m,360)=66; LC ₀ (p,10)=153 LC(p,5)=505 to 1 025
CH ₂ O	formaldehyde		250	Sax (1984) Kimmerle (1974) ACGIH (1980)	LC ₀ (r,240)=250 LC(r,30)=250; LC(r,240)=830(??) LC(cat,480)=700; LC(m,120)=700
SO ₂	sulfur dioxide	500		Sax (1984) Kimmerle (1974)	rodents poor, LC-(m,300)=6 000 LC(var.,5)=600 to 800
HCN	hydrogen cyanide	280	135	Levin et al. (1987b) Higgins et al. (1972) Kimmerle (1974)	LC(r,5)=570; LC(r,30)=110 LC(r,5)=503; LC(m,5)=323 LC(h,30)=135; LC(h,5)=280
C ₉ H ₆ O ₂ N ₂	toluene disocyanate		≈100	Sax (1984) Kimmerle (1974)	LC(gpg,240)=13; LC(rbt,180)=1 500 LC(r,360)=600; LC(m,240)=10 LC(m, r, rbt, gpg, 240)=9.7 to 13.9
COCl ₂	phosgene	50	90	Sax (1984) Clayton & Clayton (1982)	rec. 50 ppm short exp. LC(h,30)=90
C ₄ F ₈	perfluoroisobutylene	28	6	Sax (1984)	LC(r,10)=17LC(r,5)=28

Tabelle 10: Wirkung toxischer Gase. EC = Konzentration für Auswirkung; LC₀ = Konzentration, bei welcher die ersten tödlichen Auswirkungen beobachtet werden; LC = LC₅₀. (Quelle: PIARC 1999, zitierend Klote & Milke 1993)

Zahlenbeispiel zur Toxizität

Es soll die Toxizität des Rauchs am Kaminaustritt der Brandgasabsaugung aus dem Zahlenbeispiel zur Sichttrübung (vgl. Kapitel 0) ermittelt werden. Die Konzentrationen von CO, CO₂ und Russ sind bekannt und in Tabelle 6 festgehalten. Mit der Methode der Bruchsumme ergeben sich folgende Werte zur Abschätzung der Toxizität:

$$A_{\text{Heptan}} = \frac{[\text{CO}]}{\text{LC}_{50}\text{CO}_{30}} + \frac{[\text{CO}_2]}{\text{LC}_{50}\text{CO}_{2,30}} = \frac{38\text{ppm}}{3'000\text{ppm}} + \frac{7'364\text{ppm}}{150'000\text{ppm}} = 0.082 \text{ [-]}$$

$$A_{\text{Diesel}} = \frac{[\text{CO}]}{\text{LC}_{50}\text{CO}_{30}} + \frac{[\text{CO}_2]}{\text{LC}_{50}\text{CO}_{2,30}} = \frac{138\text{ppm}}{3'000\text{ppm}} + \frac{5'457\text{ppm}}{150'000\text{ppm}} = 0.062 \text{ [-]}$$

Beide Werte sind deutlich kleiner als 1. Der Rauch der Wannenbrände ist folglich für kurze Aussetzungszeiten quasi ungiftig am Kaminaustritt, vorausgesetzt, der Rauch enthält keine hochgiftigen Komponenten wie Schwefeldioxid. Mit den unter dem Zahlenbeispiel zur Rezirkulation ermittelten kritischen Rezirkulationen (vgl. Kapitel 2.2.6, Tabelle 11) wird für einen 30-MW-Brand deutlich, dass bei erreichtem Grenzwert der Sichtweite die Toxizitätsgrenze der rezirkulierenden Rauchgase bei weitem nicht ausgeschöpft ist.

2.2.6 Quantifizierung der Rezirkulation

2.2.7 Definitionen

Die Rezirkulation ist ein Mass dafür, wie viel Luft oder Rauch von einem Portal oder Kamin in das benachbarte Portal überströmt. Die Rezirkulation beträgt zwischen 0 % und 100 %. In der Literatur sind verschiedene Formulierungen geläufig:

Verhältnis der Massenströme eines Tracergases

Für die Quantifizierung der Rezirkulation als Verhältnis der Massenströme eines Tracergases werden die Massenströme an der Quelle (Kamin, Portal) und am Empfänger (Portal) verglichen. In einer numerischen Simulation kann das Tracergas eine beliebige Spezies sein. In einer Feldmessung ist dies meist SF₆ oder NO. Zu beachten ist dabei eine allfällige Umwandlung des Tracergases auf dem Weg von der einen zur anderen Röhre und/oder die Hintergrundkonzentration in der Atmosphäre. Die Rezirkulation kann gemäss Gleichung 17 berechnet werden.

$$R = \frac{Q_2 \cdot (c_2 - c_G)}{Q_1 \cdot (c_1 \cdot F_{UW} - c_G)} \quad \text{[-]} \quad \text{Gleichung 17}$$

$$Q_i = A_i \cdot u_i \quad \text{[m}^3\text{/s]} \quad \text{Gleichung 18}$$

Mit:	R	[-]	Massenbezogene Rezirkulation von Quelle 1 zu Empfänger 2
	Q_1, Q_2	[m ³ s ⁻¹]	Volumenstrom Quelle 1, Empfänger 2
	c_1, c_2	[mg·m ⁻³]	Konzentration Quelle 1, Empfänger 2
	c_G	[mg·m ⁻³]	Hintergrundkonzentration der Atmosphäre im Bereich des Portals
	F_{UW}	[-]	Faktor für Umwandlung von z.B. NO zu NO ₂
	A_1, A_2	[m ²]	Fläche Quelle 1, Empfänger 2
	u_2, u_1	[m·s ⁻¹]	Strömungsgeschwindigkeit Quelle 1, Empfänger 2

Verhältnis der Konzentrationen eines Tracergases

Für die Quantifizierung der Rezirkulation als Verhältnis der Konzentrationen eines Tracergases werden die Konzentrationen an der Quelle (Kamin, Portal) und am Empfänger (Portal) verglichen. Zu beachten ist dabei eine allfällige Umwandlung des Tracergases auf dem Weg von der einen zur anderen Röhre und/oder die Hintergrundkonzentration in der Atmosphäre. Die Rezirkulation kann gemäss Gleichung 19 berechnet werden:

$$r = \frac{(c_2 - c_G)}{(c_1 \cdot F_{UW} - c_G)} \quad [-] \quad \text{Gleichung 19}$$

Mit:	r	[-]	Konzentrationsbezogene Rezirkulation von Quelle 1 zu Empfänger 2
	c_1, c_2	[g·m ⁻³]	Konzentration Quelle 1, Empfänger 2
	c_G	[g·m ⁻³]	Hintergrundkonzentration der Atmosphäre im Bereich des Portals
	F_{UW}	[-]	Faktor für Umwandlung von z.B. NO zu NO ₂

Vereinfachend für die numerischen Berechnungen, in denen weder Hintergrundkonzentration noch Umwandlungsfaktoren berücksichtigt werden müssen, kann die Rezirkulation auch als Verhältnis der Konzentration am Empfänger zu der Konzentration an der Quelle definiert werden:

$$r = \frac{c_2}{c_1} \quad [-] \quad \text{Gleichung 20}$$

Die massenbezogene Definition der Rezirkulation gibt ein Mass dafür, wie viel der aus der Quelle pro Zeiteinheit austretenden Luftmasse effektiv am Empfänger ankommt. Die konzentrationsbezogene Definition der Rezirkulation ist ein Mass der Verdünnung der einbezogenen Spezies. Für die Abschätzung des Gefahrenpotentials ist die konzentrationsbezogene Rezirkulation zweckmässiger, weil sich die Sichttrübung und Toxizität der Rauchgase auf Stoffkonzentrationen zurückführen lassen.

2.2.8 Kritische Rezirkulation

Auf der Grundlage der soeben definierten konzentrationsbezogenen Rezirkulation und der in Kapitel 0 dargestellten Grenzwerte der Rauchprodukte für die Sichttrübung und die Toxizität lässt sich die kritische Rezirkulation wie folgt definieren: Die kritische Rezirkulation für die Spezies i ist das Verhältnis der zulässigen Konzentration am Empfänger zur vorhandenen Konzentration an der Quelle (vgl. Gleichung 21):

$$r_{k,i} = \frac{c_{i,zulässig,2}}{c_{i,1}} \quad [-] \quad \text{Gleichung 21}$$

Mit:	$r_{k,i}$	[-]	Konzentrationsbezogene kritische Rezirkulation der Spezies i von Quelle 1 zu Empfänger 2
	$c_{i,1}$	[g·m ⁻³]	Effektive Konzentration der Spezies i an der Quelle 1 in [g·m ⁻³] oder [ppm]
	$c_{i,zulässig,2}$	[g·m ⁻³]	Grenzwert bzw. zulässige Konzentration der Spezies i am Empfänger 2 in [g·m ⁻³] oder [ppm]

Zahlenbeispiel zur kritischen Rezirkulation

Mit der Definition der Gleichung 21 ergeben sich für die in Kapitel 0 ermittelten maximal zulässigen Russkonzentrationen und den in Tabelle 6 ermittelten Rauchkonzentrationen in der Abluft des Kamins folgende kritischen Rezirkulationen:

Brennstoff	Kritische Rezirkulation [%]		
	Berechnung über K_m		Berechnung über D_m (Heptan)
	Sichtweite 25 m $c_{S,zul} = 1.58 \cdot 10^{-2} \cdot [\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$	Sichtweite 10 m $c_{S,zul} = 3.95 \cdot 10^{-2} \cdot [\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$	Sichtweite 10 m $c_{S,zul} = 2.54 \cdot 10^{-2} \cdot [\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$
Heptan	8.9	22.2	14.3
Heizöl, Rohöl, Diesel	3.8	9.4	-

Tabella 11: Abschätzung der kritischen Rezirkulation mit den verfügbaren Grenzwerten der maximal zulässigen Rauchkonzentration für einen 30-MW-Brand, einer Absaugmenge von $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, einer Sichtweite von 25 und 10 m bzw. einer Sichttrübung von $K = 0.12$ und 0.3 m^{-1} in der Gegenröhre

Daraus wird ersichtlich, dass je nach Brandgut der Schätzwert für die kritische Rezirkulation um einen Faktor 2 und je nach Sichtweite um einen Faktor 3 variieren kann. Die Sichtweite 25 m erfordert sehr niedrige Rezirkulationswerte. Ferner geht daraus hervor, dass die grobe Abschätzung mit der spezifischen Sichttrübung $K_m = 7.6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ zu progressiveren kritischen Rezirkulationen führt als die realitätsnähere Abschätzung über die spezifische optische Dichte und den Russentstehungsanteil ausgewählter Brennstoffe.

2.3 Ereignislüftung in Strassentunneln

In diesem Kapitel werden die gemäss ASTRA 13001 (2008) in der Schweiz üblichen Lüftungssysteme vorgestellt. Insbesondere wird auf den Ereignisbetrieb dieser Lüftungen eingegangen und ihre Neigung zu Rauchrezirkulation diskutiert. Die Richtlinie ASTRA 13001 (2008) unterscheidet drei Hauptgruppen der Tunnellüftung:

- System der natürlichen Lüftung;
- mechanische Lüftungssysteme ohne Absaugung im Ereignisfall; darunter fallen in der Schweiz nur Längslüftungen mit Strahlventilatoren;
- Mechanische Lüftungssysteme mit Absaugung im Ereignisfall; darunter fallen Systeme mit Absaugung mit oder ohne Zuluft.

2.3.1 Natürliche Lüftung

Das System der natürlichen Lüftung enthält keine mechanischen Lüftungskomponenten. Nach ASTRA 13001 (2008) sind Tunnel bis zu 800 m Länge natürlich zu belüften.

Normalbetrieb

Bei der natürlichen Lüftung stellt sich eine Längsströmung in der Tunnelröhre ein, durch:

- die Druckwirkung des Verkehrs;
- die Druckwirkung von Temperaturdifferenzen;
- die meteorologischen Druckdifferenzen zwischen den Portalen (Wind und barometrischer Druck).

Der Luftaustausch erfolgt ausschliesslich über die Tunnelportale.

Betrieb im Ereignisfall

Bei einem Ereignis im Tunnel entweichen die freigesetzten Gase über ein Portal oder beide Portale. Bei einem Tunnel mit Längsneigung strömt der Rauch in der Regel durch das höher gelegene Portal aus. Konsequenterweise ist keine allgemeine räumliche und zeitliche Abgrenzung der Rauchimmission in einer allfälligen Gegenröhre möglich. Eine Abschätzung der Geschwindigkeit der Rauchausbreitung in der Gegenröhre kann der Diskussion des nächsten Abschnitts entnommen werden.

2.3.2 Längslüftung

Mit Hilfe von Strahlventilatoren wird die Luft in Längsrichtung durch den Tunnel gefördert. Die Strahlventilatoren sind in der Regel über dem Fahrraum angeordnet. Es werden Tunnel ab 600 m bis zu 3'000 m mit einer Längslüftung ausgerüstet.

Normalbetrieb

Bei Tunneln mit Richtungsverkehr ist die Strömungsrichtung meistens durch die Fahrrichtung gegeben. Bei Tunneln mit Gegenverkehr wird angestrebt, die Strahlventilatoren jeweils unterstützend zu den natürlich wirkenden Kräften infolge des Verkehrs, von Temperaturdifferenzen und von meteorologischen Druckdifferenzen zwischen den Portalen einzusetzen.

Betrieb im Ereignisfall

Bei einem Ereignis breiten sich die freigesetzten Gase in Längsrichtung durch den Tunnel aus. Richtung und Geschwindigkeit dieser Gase im Fahrraum werden mit Hilfe der Strahlventilatoren beeinflusst. Bei einem zweiröhriigen Tunnel mit Richtungsverkehr wird die Längslüftung im Ereignisbetrieb wie folgt gesteuert:

- Im Ausgangszustand unterstützt die Längslüftung den Luftstrom in Fahrtrichtung.
- Bei Detektion eines Ereignisses werden beide Röhren gesperrt.
- Die Längslüftung der Ereignisröhre wird auf volle Leistung gefahren und bläst den Rauch durch das Austrittsportal aus, i.d.R. auch, wenn der Brand sich in der Nähe des Eintrittsportals befindet.
- Die Längslüftung der Gegenröhre kehrt die Strömungsrichtung um und verhindert somit einen Raucheintritt durch Rezirkulation am Eintrittsportal. Dieser Prozess dauert nach Modellrechnungen am Tunnel Habsburg (Länge 1'500 m) weniger als 2 Minuten ab Inbetriebnahme der Ereignislüftung (vgl. Abbildung 4).

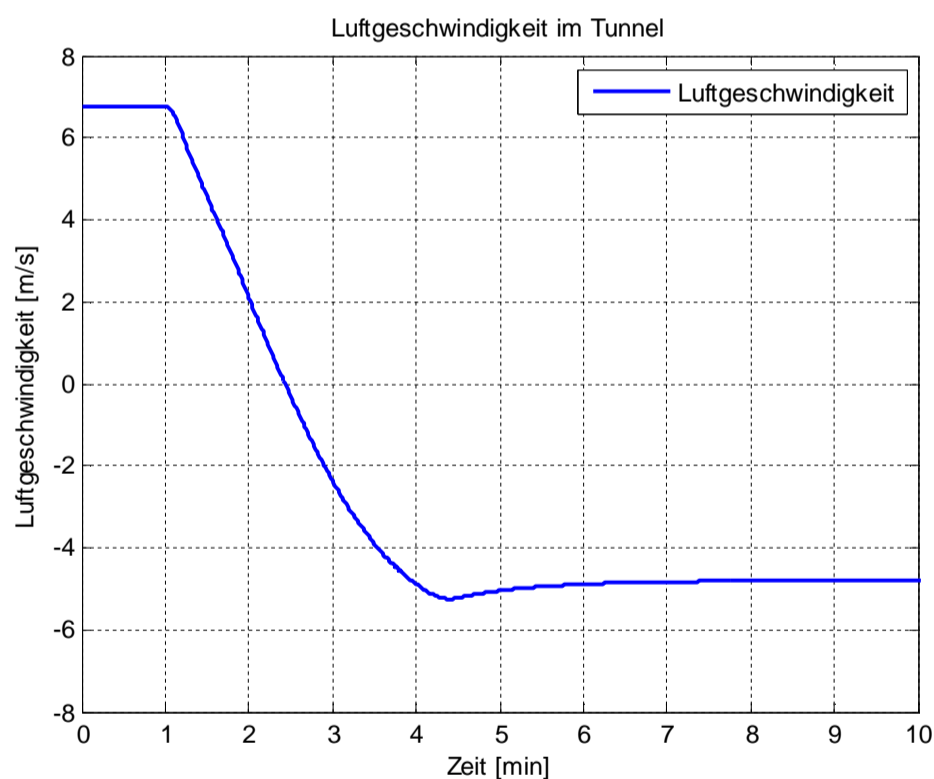


Abbildung 4: Tunnel Habsburg: Umkehr der Lüftungsrichtung in der Gegenröhre im Ereignisfall im RWC gemäss Tabelle 12

Am Beispiel des Tunnels Habsburg wurde untersucht, wie weit sich rezirkulierender Rauch in die Gegenröhre unter realistischen Lüftungsszenarien ausbreiten kann. Dazu wurde ein einfaches aerodynamisches, zeitabhängiges Modell der Gegenröhre aufgestellt, unter Berücksichtigung:

- des Schubs und der zeitabhängigen Steuerung der Strahlventilatoren;
- der Detektionszeit des Ereignisses;
- der Zeit zwischen Ereignisbeginn und Einwirkung des Rauchs auf die Gegenröhre;
- des Verkehrs im Normalbetrieb;

- des Winds und des Auftriebs in der Gegenröhre.

Die geometrischen und verkehrsspezifischen Daten entstammen dem Bericht Pöyry (2011). Es wurden für verschiedene Werte der Rand- und Anfangsbedingungen verschiedene Fälle definiert und nach Plausibilität benannt: Es wird zwischen einem ungünstigsten Fall (WC), einem realistischen ungünstigsten Fall (RWC) und einem realistischen Fall (RC) unterschieden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 12 dokumentiert. In allen Rechnungsfällen wird die Einwirkungszeit – d.h. die Zeit zwischen Brandausbruch und Einwirkung des Rauchs auf die Gegenröhre – auf 20 Sekunden angesetzt. Dies entspricht einem Brandort in unmittelbarer Nähe des Ausfahrtsportals der Ereignisröhre.

Fall	Beschreibung	Rauchausbreitung
1. WC	Detektionszeit: 2 Min. Raucheinwirkung: 20 Sek. Verkehr: MSV 2007 Wind: Ungünstig (90° auf Portal) Temperatur: Gemäss RL (1 K/450 m Tunnel), hier ca. 3 K.	
2. RWC	Detektionszeit: 1 Min. Raucheinwirkung: 20 Sek. Verkehr: 80 % von MSV 2007 Wind: 50 % von WC Temperatur: 50 % RL (1 K/450 m Tunnel), hier ca. 1.5 K.	
3. RC	Detektionszeit: 1 Min. Raucheinwirkung: 20 Sek. Verkehr: 50 % von MSV 2007 Wind: kein Wind Temperatur: keine Temperaturdifferenz	

Tabelle 12: Tunnel Habsburg: Parameterstudie Rauchausbreitung in der Gegenröhre, mit Unterscheidung eines ungünstigsten Falles (WC), eines realistischen ungünstigsten Falles (RWC) und eines realistischen Falles (RC). Alle Fälle beruhen auf der Annahme, dass der Rauch bereits 20 Sekunden nach Brandausbruch auf die Gegenröhre einwirkt. Die mit „VS“ bezeichneten senkrechten Striche in den Diagrammen markieren die Position der Verbindungsstollen in der Gegenröhre.

Die Auswertung dieser Fälle führt zu folgenden Beobachtungen und Konsequenzen:

- Die Ausbreitungsdiagramme zeigen, dass die Detektionszeit weitaus die grösste Wirkung auf die Rauchausbreitung hat: Bei einer Detektionszeit von 2 Minuten wird ca. 2 Drittel der Gegenröhre verraucht, bei 1 Minute Detektionszeit ca. 1 Drittel.
- Bedingt durch die Lage des Brands ist mit der Flucht der Tunnelbenützer durch die dem Brand am nächsten liegenden Verbindungsstollen 1 und 2 zu rechnen. Somit werden die Flüchtenden auch im realistischen Fall durch Rauch in der Gegenröhre überrascht.
- Um eindeutig detektieren zu können, in welcher Röhre es brennt, und zu vermeiden, dass die Brandlüftung in der falschen Röhre ausgelöst wird, ist eine Rauchdetektion auch unmittelbar am Austrittsportal notwendig.

Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass die Gefährdung der Gegenröhre durch Rauchrezirkulation bei Tunneln mit Längslüftung und natürlicher Lüftung durchaus vorhanden ist. Allerdings bedeutet dies im Zusammenhang mit den in Kapitel 2.2.1 präsentierten Brandleistungskurven und der im Kapitel 3 vorgestellten Abschätzung des Gefahrenpotentials noch nicht, dass diese Rezirkulation kritisch ist.

Abschliessend zu diesem Lüftungssystem muss der Fall eines Gegenverkehrstunnels mit Sicherheitsstollen (Sisto) besprochen werden: Möglicherweise liegen die Portale des Tunnels und des Stollens nahe beieinander. Die Lüftung des Sistos ist im Ereignisbetrieb ein Sicherheitssystem, das den flüchtenden Tunnelnutzern einen rauchfreien Rettungsweg gewähren soll, indem sie Luft aus der Umgebung ansaugt. Dieses Ziel wird durch eine mögliche Rezirkulation gefährdet. Im Gegensatz zu der Rezirkulation in der Gegenröhre ist diese Ansaugung nicht zeitlich begrenzt, sodass unter der Annahme konstanter Windverhältnisse und Rezirkulation die kurzgeschlossene Rauchmenge mit der Zeit bzw. der Brandleistung zunehmen wird. Daher muss die Ansaugung von Rauch nach ASTRA 13002 2008 steuerungstechnisch mit einem Rauchmelder unterbunden werden.

2.3.3 Rauchabsaugung

In der Regel erfolgt die konzentrierte Absaugung im Ereignisfall mit zentralen Ventilatoren durch einen Abluftkanal. Der Kanal wird meist über einer Zwischendecke geführt, in welcher steuerbare Abluftklappen angeordnet sind. Bei diesen Systemen sind Strahlventilatoren zur Steuerung der Strömung der Luft im Fahrraum erforderlich. Die Strahlventilatoren werden nach Möglichkeit in der Nähe der Portale angebracht. Im Ereignisfall sind zwei Brandabschnitte zu unterscheiden:

- Findet der Brand zwischen dem Eintrittsportal und dem Ende des Abluftkanals bzw. der letzten Brandklappe statt, so wird der Rauch durch 3 Abluftklappen in den Abluftkanal abgesaugt und durch das Kamin in die Umgebung ausgestossen. Falls erforderlich, wird die Längsströmung im Fahrraum mit einem geregelten Betrieb der Strahlventilatoren beeinflusst, um die Lüftungsziele im Fahrraum zu erreichen. Diese sehen beidseits des Brands eine Anströmgeschwindigkeit je nach Verkehrsart zwischen 0 und $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vor. Ist der Tunnel ein zweiröhriger Richtungsverkehrstunnel, so wird die Gegenröhre dann in der Regel auf Überdruck belüftet.
- Findet der Brand zwischen der letzten Klappe und dem Austrittsportal statt, so wird der Rauch mit den Strahlventilatoren aus dem Austrittsportal ausgestossen. Dieser Fall wird in Kapitel 0 behandelt.

Im ersten Fall (Brand zwischen dem Eintrittsportal und dem Ende des Abluftkanals) wird durch mehrere oder alle Portale des einröhrigen oder zweiröhrigen Tunnels Luft mit Geschwindigkeiten zwischen 0 und $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ angesaugt, in der Gegenröhre tendenziell weniger als in der Ereignisröhre. Dadurch entsteht die Fragestellung der Rauchrezirkulation vom Kamin zu den Portalen.

2.4 Atmosphärische Strömungen und Gelände

2.4.1 Wind und atmosphärische Grenzschicht

Atmosphärische Grenzschicht

Die atmosphärische Grenzschicht des Windes ist stets turbulent. Sie ist mehrere Hundert Meter dick, sodass sich Tunnelportale und Kaminauslässe in der Grenzschicht befinden. Sie ist gegen unten durch den Boden (schlupffreie Randbedingung) und gegen oben durch die ungehinderte reibungsfreie Strömung begrenzt. Ihre Form und Dicke verändert sich mit der Bodenrauigkeit: je rauer die Bodenoberfläche, desto dicker die Grenzschicht und desto sanfter ihre Gradienten. Die Abbildung 5 veranschaulicht die Wirkung der Bodenrauigkeit auf die Form und die Dicke der atmosphärischen Grenzschicht.

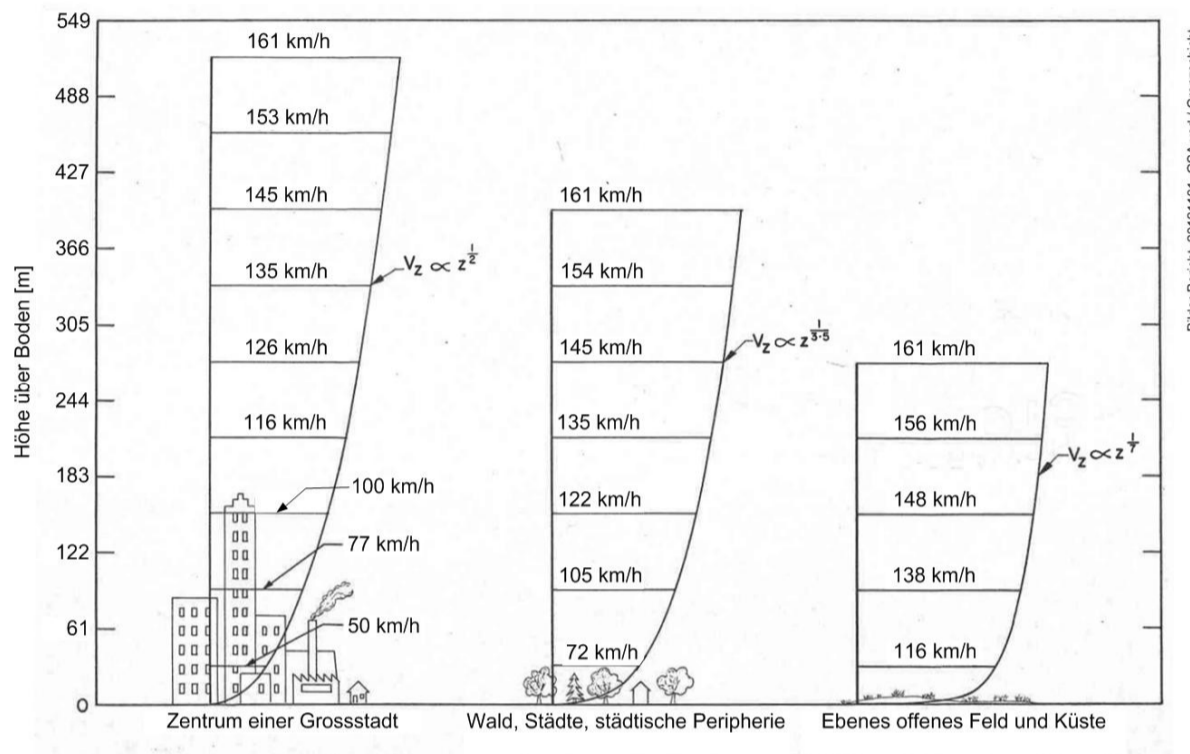


Abbildung 5: Atmosphärische Grenzschicht über verschiedenen Bodenbeschaffenheiten (Rauigkeiten) bezogen auf 100 mph (161 km/h). Die Höhen wurden vom britischen (foot) in die metrischen Einheiten umgerechnet (Davenport 1960, Courtesy NRCC Archives)

Die Strömung in einer vollständig entwickelten Grenzschicht über einem ebenen, gleichförmigen Boden kann mit der logarithmischen Gleichung 22 angenähert werden (logarithmisches Windprofil nach Richards & Hoxey 1993).

$$U(z) = \frac{u_*}{K} \cdot \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{Gleichung 22}$$

$$u_* = \frac{K \cdot U_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref} + z_0}{z_0}\right)} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{Gleichung 23}$$

Mit:	K	[-]	von-Karman-Konstante (=0.41)
	z_0	[m]	Bodenrauigkeitslänge
	u_*	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Reibungsgeschwindigkeit
	U_{ref}	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Referenzgeschwindigkeit
	z_{ref}	[m]	Referenzhöhe

Topographische Einzelheiten, Gebäude und Vegetation erhöhen die Bodenrauigkeit. Spezifische Werte der Bodenrauigkeitslänge für verschiedene Bodentypen sind in Tabel-

le 13 dokumentiert.

Oberflächenbeschaffenheit	Rauigkeitslänge z_0 [m]
Offene See, Eis, Tundra, Wüste	0.001
Glatter Boden, freies Feld mit vereinzelt Bäumen, Buschlandschaft	0.03
Region mit üppiger Vegetation, Wald, kleine Städte	0.30
Stadt mit zahlreichen hohen Gebäuden, Stadtzentren, gut entwickelte Industriezonen	3.00

Tabelle 13: *Bodenrauigkeitslänge (Quelle: Aynsley et al. 1977)*

Eine andere Möglichkeit der Darstellung des atmosphärischen Windgeschwindigkeitsprofils besteht im Potenzgesetz in Gleichung 24. Stangroom (2004) hält fest, dass der Faktor U / z_A^m und der Exponent m von den Stabilitätsbedingungen der Atmosphäre (Turbulenz) und von der Bodenbeschaffenheit abhängen. Die meisten Turbulenzstudien weisen auf $m = 1/7$ hin. Es gibt keine theoretische Begründung für das Potenzgesetz. Es kann dennoch das mittlere Windgeschwindigkeitsprofil bei passender Parameterwahl gut annähern.

$$U(z) = U(z_A) \cdot \left(\frac{z}{z_A} \right)^m \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{Gleichung 24}$$

Mit: z_a [m] Höhe des Anemometers

Windstille

Bei Windstille ist die Windgeschwindigkeit sehr gering (< 0.3 m/s) und der Wind umlaufend, ohne bevorzugte Richtung. Luftmassen werden langsam hin- und hergeschoben. Windstille birgt im Zusammenhang mit der erforschten Thematik zwei Schwierigkeiten: Erstens bleibt bei Kamin-Portal-Rezirkulation die Rauchsäule vor Ort stehen und verdünnt sich kaum; ist zudem der Rauch kälter als die Umgebungsluft, fällt er zu Boden; es kann so zu einer viel höheren Rezirkulation kommen als prognostiziert. Zweitens kann der Zustand der Windstille nicht mit vertretbarem Aufwand numerisch korrekt simuliert werden. In dieser Studie wird Windstille mit einer Windgeschwindigkeit von $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in eine definierte Richtung simuliert. Die Rezirkulation bei Windstille wird also in dieser Arbeit nicht in ihrer ganzen Komplexität erfasst.

Variabilität der Windrichtung

Die relevanten Zeitskalen für die Fragestellung der Rezirkulation betragen wenige Minuten bis wenige Stunden. Die Windrichtung und -stärke sind in dieser Zeitspanne nicht konstant, sondern schwanken auch bei gleichmässigem Wind um einen Mittelwert. Diese Variabilität der Windrichtung ist zudem abhängig von der Geländeform. Diese Schwankungen können in den stationären Simulationen dieser Arbeit nicht erfasst werden. Die Ergebnisse gelten daher bezüglich der Variabilität der Windrichtung als Maximalwerte. Eine Abschätzung der Sensitivität der Ergebnisse auf diese Variabilität gibt es nicht.

2.4.2 Atmosphärische Stabilität

Der atmosphärische adiabatische Temperaturgradient (nach Masters 2004)

Die atmosphärische Stabilität und die Temperaturänderung der Luft mit der Höhe sind eng miteinander verknüpft. Eine ruhende trockene Luftsäule, die keine Wärme mit ihrer Umgebung austauscht, weist einen adiabatischen Temperaturgradienten von ca. $10 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ auf (vgl. Gleichung 25).

$$\Gamma_t = -\frac{dT}{dz} = \frac{g}{c_p} = 9.76 \text{ K}\cdot\text{km}^{-1} \approx 10 \text{ K}\cdot\text{km}^{-1} \quad \text{Gleichung 25}$$

Der adiabatische Temperaturgradient einer feuchten Luftsäule ist nicht konstant, da die Feuchtigkeitsmenge, die Luft enthalten kann, ohne dass diese auskondensiert, ebenfalls von der Temperatur abhängt. In der Troposphäre ist $\Gamma_f = 6 \text{ K}\cdot\text{km}^{-1}$ ein guter Mittelwert.

Atmosphärische Stabilität (nach Masters 2004)

Bedingt durch Winde, Sonneneinstrahlung und die Topographie ist der örtliche Temperaturgradient Γ in der realen Atmosphäre vom adiabatischen Temperaturgradient Γ_t oder Γ_f verschieden. Dieser Unterschied bestimmt die Stabilität der Atmosphäre. Dies wird im Folgenden anhand trockener Luft erklärt und anhand der Abbildung 6 veranschaulicht. Ist der Gradient grösser als der adiabatische Temperaturgradient (Abbildung 6a), so ist die Luftschichtung instabil, da kleinste Dichtedifferenzen zur Durchmischung der Schicht führen: Der Temperaturgradient der Luft verläuft von 1 bis 2; wird nun ein gedachtes Luftpaket rasch und ohne Wärmeaustausch mit dieser umgebenden Luft von der Höhe 1 bis in die Höhe 2 befördert, so kühlt es sich adiabat ab (Zustand 2'); seine Temperatur ist dann höher und seine Dichte geringer als diejenige der umgebenden Luft; nach den Gesetzen des thermischen Auftriebs wird dieses Paket weiter steigen („warme Luft steigt“). Diese Überlegung kann auch umgekehrt gemacht werden: Wird ein Luftpaket adiabat nach unten gedrückt, so kühlt es sich in einer überadiabatischen Atmosphäre stärker ab als seine Umgebung und sinkt weiter. Die überadiabatische Temperaturschichtung fördert also die Durchmischung von Luftschichten; die Atmosphäre ist instabil. Ist der Gradient kleiner als der adiabatische Temperaturgradient (Abbildung 6b), so ist die Luftschichtung stabil, da kleinste Dichtedifferenzen abgedämpft werden: Der Temperaturgradient der Luft verläuft von 1 bis 2; wird nun ein gedachtes Luftpaket rasch und ohne Wärmeaustausch mit dieser umgebenden Luft von der Höhe 1 bis in die Höhe 2 befördert, so kühlt es sich adiabat ab (Zustand 2'); seine Temperatur ist dann geringer und seine Dichte höher als diejenige der umgebenden Luft; es wird sinken („kalte Luft sinkt“). Umgekehrt wird sich ein Luftpaket, das adiabatisch nach unten gedrückt wird, weniger abkühlen als seine Umgebung und wieder steigen. Die unteradiabatische Temperaturschichtung dämpft also die Durchmischung; die Atmosphäre ist stabil. Ist der Temperaturgradient der Luft gleich dem adiabatischen Temperaturgradienten, dann wird ein adiabatisch verschobenes Luftpaket an dem Ort bleiben, an den es verschoben wurde: die Atmosphäre ist neutral.

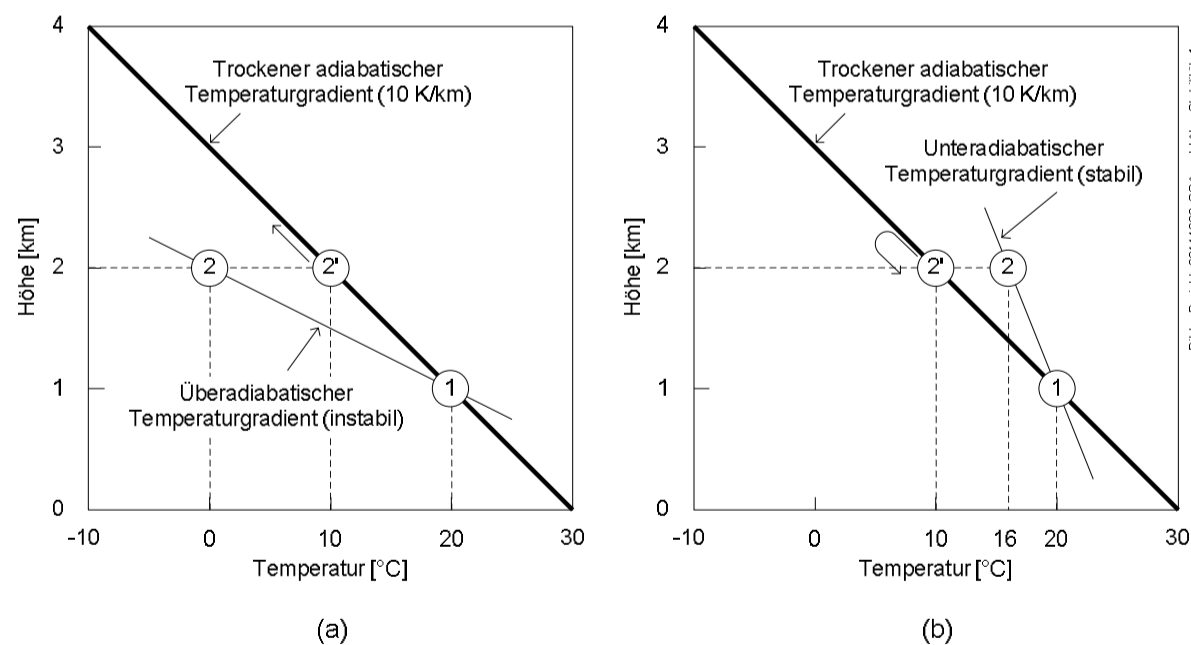


Abbildung 6: Stabilitätskriterium erklärt: (a) Instabile Atmosphäre bei überadiabatischem Temperaturgradienten; (b) Stabile Atmosphäre bei unteradiabatischem Temperaturgradienten (nach Masters, 2004)

In Wirklichkeit hängt der lokale adiabatische Temperaturgradient der Luft vom Feuchtigkeitsgehalt der Luft und der lokalen Temperatur ab und deckt den Wertebereich von 6 bis $10 \text{ K}\cdot\text{km}^{-1}$ ab. Ist der Temperaturgradient der Luft grösser als $10 \text{ K}\cdot\text{km}^{-1}$, also grösser als der trockene adiabatische Temperaturgradient, dann ist die Atmosphäre absolut instabil;

ist der Temperaturgradient der Luft kleiner als $6 \text{ K}\cdot\text{km}^{-1}$, also kleiner als der feuchte adiabatische Temperaturgradient, so ist die Atmosphäre absolut stabil. Für Temperaturgradienten zwischen dem trockenen und feuchten adiabatischen Temperaturgradienten ist die Atmosphäre bedingt stabil: Zur Beurteilung ist die Kenntnis der effektiven lokalen adiabatischen und atmosphärischen Temperaturgradienten erforderlich (vgl. Abbildung 7a).

Temperaturinversionen (nach Masters 2004)

Ein extremer Fall von unteradiabatischen Temperaturgradienten ist dann gegeben, wenn die Temperatur mit der Höhe zunimmt. Eine solche Schichtung wird Inversion genannt; sie ist sehr stabil und neigt dazu, wie ein Deckel den Gasaustausch zwischen den Luftmassen unterhalb und oberhalb der Inversion zu hemmen, wie in Abbildung 7b dargestellt: Unterhalb der Inversion liegt eine überadiabatische Schicht, oberhalb der Inversion eine unteradiabatische Schicht; vom Boden (1) und unmittelbar unterhalb der Inversion (2) aufsteigende Luftpakete werden an der Inversion wieder zurückgedrängt; von unterhalb der Inversion sinkende Luftpakete sinken weiter; von oberhalb der Inversion absinkende Luftpakete steigen wieder an. Inversionen bilden sich unter folgenden Bedingungen:

- Strahlungsinversionen bilden sich in wolkenfreien Nächten, wenn die Erdoberfläche ihre Wärme an den Nachthimmel abstrahlt und sich die darüber liegende Luft weniger abkühlt. Wenn sich am Morgen die Erdoberfläche unter der Sonneneinstrahlung wieder aufwärmt, baut sich die Inversionsschicht wieder ab.
- Absinkinversionen entstehen durch die Kompressionswärme der sinkenden Luftmassen in Hochdruckgebieten.
- Aufgleitinversionen entstehen dann, wenn sich kalte Luftmassen unter wärmere schieben. Sie sind kurzlebig und oft von Regen begleitet.
- Weiter bilden sich Inversionen, wenn warme Luft über kalte Wasseroberflächen streicht.
- Schliesslich bilden sich Inversionen in Tälern, wenn nachts oder abends kalte Luft von den Anhöhen die Hänge hinunterfliesst (Kaltluftabfall) und sich unter wärmerer Luft Kaltluftseen bilden.

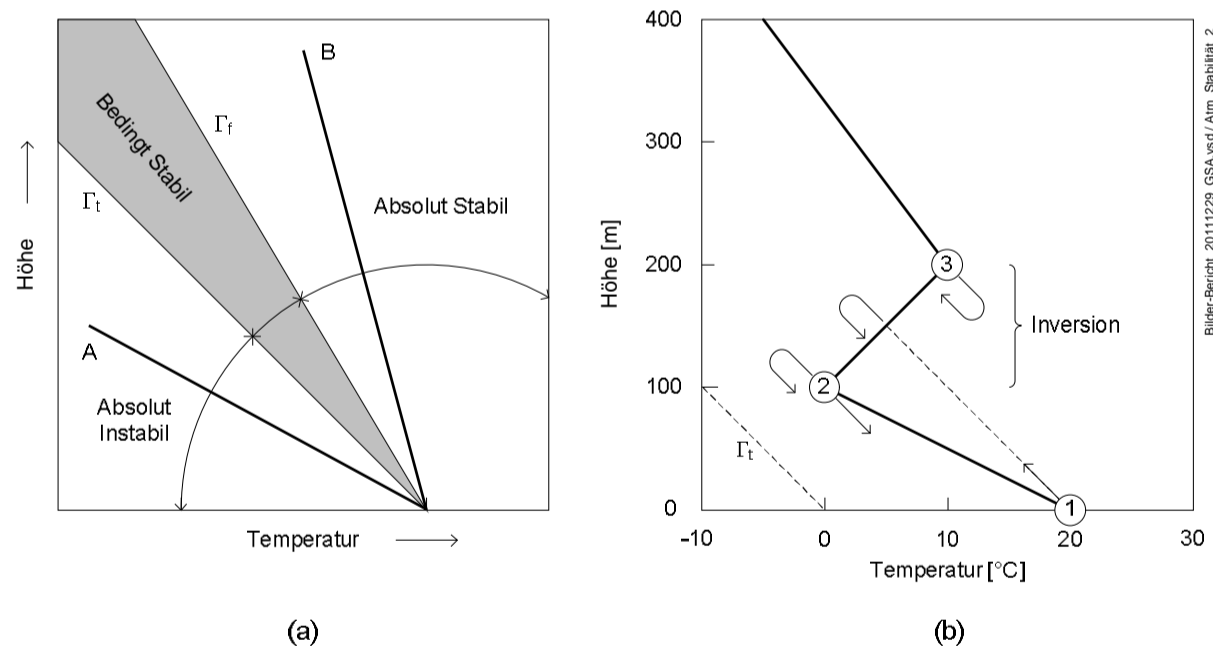


Abbildung 7: (a) Stabilitätsbereiche der atmosphärischen Temperaturgradienten; (b) Mechanismen einer Inversionsschicht (nach Masters, 2004)

Atmosphärische Stabilitätsklassen nach Pasquill (aus Turner 1994)

Pasquill (1961) hat eine Methode eingeführt, um die atmosphärische Stabilität abzuschätzen, in welcher sowohl die mechanische Turbulenz als auch der thermische Auftrieb berücksichtigt werden. Die mechanische Turbulenz wird über die Windgeschwindigkeit an der Oberfläche auf 10 m über Grund abgeschätzt. Die Erzeugung von thermischem Auftrieb wird mit der Sonneneinstrahlung berücksichtigt, die Erzeugung von thermischem Abtrieb mit der nächtlichen Bewölkung. Je schwächer die Bewölkung, desto grösser die Wärme, die vom Boden in den Himmel abgestrahlt wird. Hohe Windgeschwindigkeiten oder starke Bewölkung führen zu neutralen Bedingungen, der Stabilitätsklasse D. Instabile Bedingungen sind A stark instabil, B moderat instabil und C leicht instabil. Stabile Be-

dingungen können E leicht stabil, F moderat stabil sein. Nächtliche Bedingungen bei niedriger Windgeschwindigkeit können als G sehr stabil betrachtet werden. Die Tabelle 14 gibt Aufschluss über die soeben definierten Stabilitätsklassen, die Windstärke und die Strahlungsbedingungen.

Windstärke (auf 10 m Höhe) [m·s ⁻¹]	Sonneneinstrahlung			Nacht	
	Stark	Moderat	Leicht	Mehr als 4/8 bewölkt	Weniger als 3/8 bewölkt
< 2	A	A – B	B	G	G
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Tabelle 14: Stabilitätsklassen nach Pasquill (Pasquill 1961, zitiert in Pasquill 1962)

Starke Sonneneinstrahlung entspricht einem sonnigen Mittag mitten im Sommer in England, leichte Sonneneinstrahlung ähnlichen Bedingungen mitten im Winter. Die Nacht wird definiert als die Dauer von einer Stunde vor Sonnenuntergang bis eine Stunde nach Sonnenaufgang. Die neutrale Kategorie D sollte unabhängig von der Windgeschwindigkeit auch für bedeckte Bedingungen bei Tag und bei Nacht verwendet werden und für jede Witterungsbedingung während der Stunde vor und nach der Nacht, wie oben definiert (aus Pasquill 1961).

Je nach Literaturquelle wird die atmosphärische Stabilität in leicht verschiedene Klassen aufgeteilt. Absolut neutrale Bedingungen sind sehr selten und stellen sich meist beim Wechsel von stabilen zu instabilen Bedingungen ein. Nahezu neutrale Bedingungen stellen sich vor allem bei windigem Wetter mit starker Bewölkung ein. Es gilt auch: je windiger das Wetter, desto neutraler die Atmosphäre.

2.4.3 Meteorologische Datenbanken der Schweiz

Die Wetterdaten der automatischen Stationen der Schweiz können beim Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz bestellt werden. Eine Datenbank für meteorologische Messungen bei Wettswil ZH ist online verfügbar unter dem Link: <http://aurora.meteotest.ch/awel/abfrage.php>. Auswertungen davon macht die Firma meteotest im Auftrag vom AWEL. Eine etwas ältere Zusammenstellung von Meteodaten der Innerschweiz gibt Rickli & Pfeifer (1989).

2.4.4 Auswirkung der Topographie

Qualitative Unterscheidung

Die topographische Umgebung eines Tunnels bestimmt die Winde, die an dessen Portalen anzutreffen sind. Eine knappe Unterscheidung wäre die folgende:

- Tunnel durch niedrige Hügel im Mittelland mit einer Überdeckung bis zu wenigen Hundert Metern. Die Winde an den Portalen dieser Tunnel entsprechen den dominanten Winden (Westwind, Bise). Ein Beispiel eines solchen Tunnels ist der Gubristtunnel.
- Tunnel durch die Flanken der Alpentäler. Hier treten durch die Täler kanalisierte Winde (z.B. Föhn) sowie durch den täglichen Rhythmus bedingte Hangwinde auf. Als Beispiel sei der Seelisbergtunnel erwähnt.
- Alpendurchquerende Tunnel wie zum Beispiel der Gotthard-Strassentunnel und der Tunnel San Bernardino. Sie sind durch ihre Lage ähnlichen Winden wie die Tunnel durch die Alpentäler ausgesetzt.

Hangwinde unterscheiden sich grundsätzlich von den dominanten Winden dadurch, dass sie bis zu mehrere Dutzend Meter mächtig sind. Der Strahl aus dem Abluftkamin kann sie unter Umständen durchstossen. Portale werden aber immer von ihnen erfasst.

Strömung über einen zweidimensionalen Hügel

Die Wechselwirkung von Wind und Topographie kann dazu führen, dass sich ein Tunnelportal oder -kamin im Lee eines Hügels in einer Ablösungszone des Windes befindet. Das verschärft gegebenenfalls die Problematik der Rezirkulation. Diese Fragestellung kann mit einer Strömung über einen zweidimensionalen Grat idealisiert werden. Die Strömung über einen isolierten zweidimensionalen Grat auf einer sonst flachen, waagrecht Ebene wurde in der Literatur gründlich untersucht. Im Folgenden sind einige Literaturquellen angegeben, die dem interessierten Leser ein vertieftes Studium der Materie ermöglichen:

- Feldversuche und Windkanalmessungen am realen Objekt (Askervein Hill, Schottland): Teunissen et al. (1987)
- Windbeschleunigungsfaktoren auf Hügeln: Lemelin et al. (1988) und Weng et al. (2000)
- Existenz und Abmessungen einer Ablösungsblase im Lee eines zweidimensionalen Hügels: Khurshudyan et al. (1981), Arya & Shipman (1981), Arya et al. (1987), Thangam & Hur (1991), Ross & Larock (1997), Xia & Leung (2001)

2.4.5 Portalabluft

Die Luftverdünnung der Portalabluft im Normalbetrieb wurde für Richtungs- und Gegenverkehrstunnel für Portale mit und ohne Einschnitt bei verschiedenen atmosphärischen Bedingungen in STUVA (1978) vertieft untersucht. Eine Zusammenfassung dieser Forschung gibt Haerter (1979). Die Rezirkulation wird aus der Darlegung vorerst ausgelassen.

Verdünnung ohne Wind

Die Tunnelluftverdünnung läuft in zwei Phasen ab: Anfänglich vermischt sich die Tunnelluft mit der durch die Strahlerturbulenz und die Fahrzeugturbulenz eingebrachten Umgebungsluft. Die Fahrzeugturbulenz ist bei Gegenverkehr noch intensiver als bei einem starken Richtungsverkehr. Typische Werte zeigt Abbildung 8a: Nach 40 m ab Portal ist die mittlere Konzentration zwischen 10 und 40 % der Austrittskonzentration, und nach 100 m liegt sie unter 10 %. Übertemperaturen von 2 bis 4 K bewirken bei Austrittsgeschwindigkeiten um 2 bis 4 m·s⁻¹ nach 20 bis 40 m ein Abheben des Strahls vom Boden; an heißen Tagen im Frühling und im Sommer kann die Tunnelluft aber auch kälter sein als die Aussenluft.

Nachdem sich die Geschwindigkeit der Portalabluft auf jene der umgebenden Aussenluft verlangsamt hat, übernimmt die atmosphärische Luftbewegung die weitere Verdünnung. Bei Bodeninversionen, also kalten Luftschichten über dem Boden, ist der weitere Abbau langsam, bei Wind und Sonneneinstrahlung ist er kräftiger, doch die entscheidende Verdünnung erfolgte bereits in der 1. Phase durch die dort dominierende Strahl- und Fahrzeugturbulenz.

Die Tunnelluftverdünnung im Normalbetrieb unterscheidet sich insofern von derjenigen im Ereignisbetrieb, dass sie durch die Turbulenz der Fahrzeuge zusätzlich angefacht wird. Die Verdünnung läuft also im Ereignisfall ohne Verkehr langsamer ab als mit Verkehr (Quelle: Haerter 1979).

Windeffekte

Die Belastung der Portalumgebung hängt von der Windrichtung und der Lage der Strasse im Gelände ab: Bläst der Wind in Richtung Abluftstrahl und Strasse, so wird eine seitliche Bebauung durch die Portalabluft nicht stark belastet, wie der aus Grossversuchen und Berechnungen stammende Begrenzungsbereich $\bar{c}/c_0 \approx 0.1$ in der Abbildung 8a zeigt. Bei Gegenwind läuft der Abluftstrahl dank seinem Impuls und der Schleppwirkung der Fahrzeuge noch einige Dutzend Meter ab Portal weiter, wird aber dann durch den Wind ab Portal völlig umgestülpt (vgl. Abbildung 8b). Der Vorgang ist sehr turbulent; entsprechend rasch fallen die Konzentrationen in der Portalumgebung.

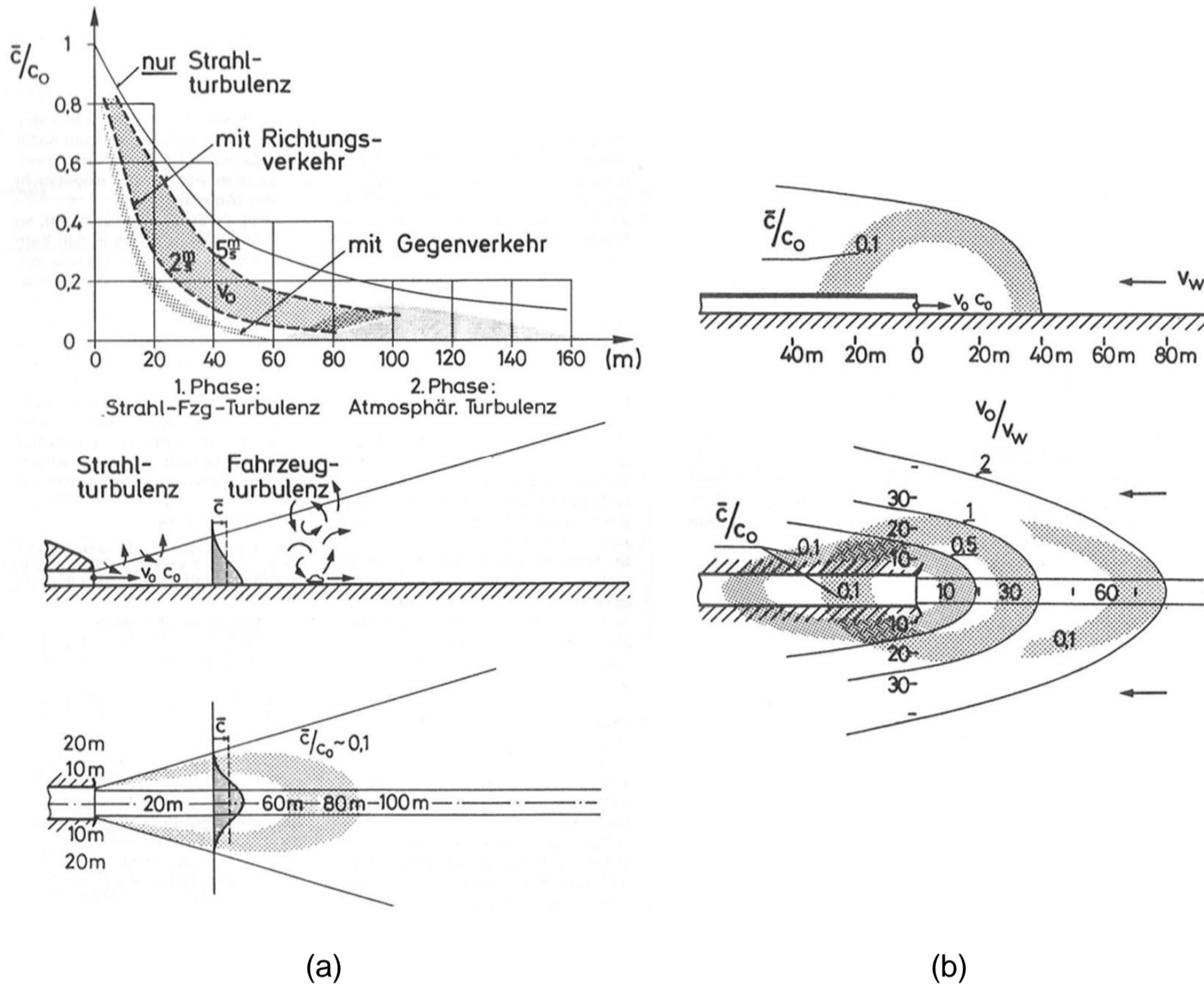


Abbildung 8: (a) Portalabluft bei leichtem Mitwind. Konzentrationsabbau längs der Strahlachse und 10-%-Bereich für Richtungsverkehr bei verschiedenen Abluftmengen und Gegenverkehr. Im Ereignisfall ohne Verkehr gilt die Kurve „nur Strahl-turbulenz“. (b) Portalabluft bei Gegenwind. Grenzkurven und 10-%-Bereich für verschiedene Verhältnisse von Ausblasgeschwindigkeit zu Windstärke (Quelle: Haerter 1979)

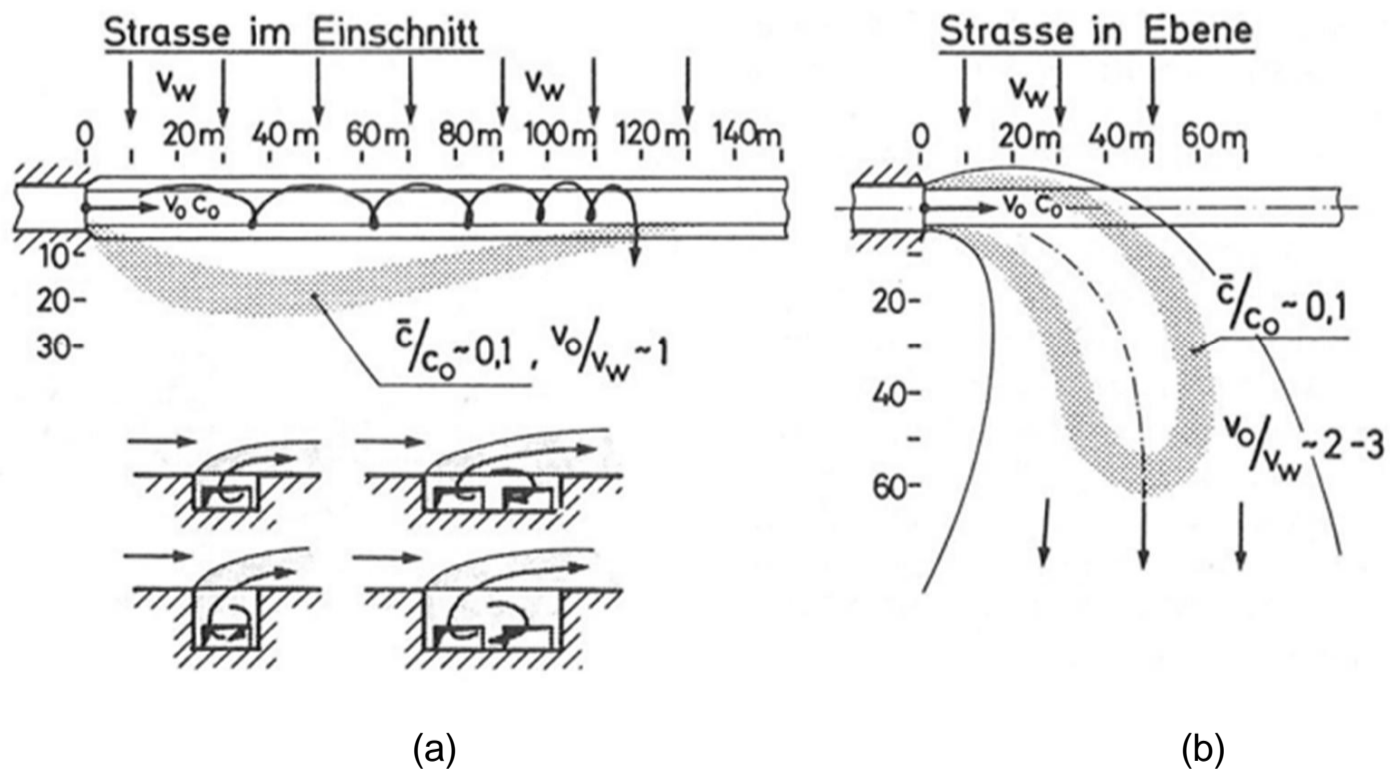


Abbildung 9: Portalabluft bei Seitenwind. (a) Strasse im Einschnitt: 10-%-Bereich bei z.B. $\alpha = v/w \approx 1$; der Einfluss der Einschnittgrösse ist sekundär. (b) Strasse in der Ebene: 10-%-Bereich bei Umlenkung in der Ebene bei $\alpha = v/w \approx 2$ bis 3. (Quelle: Haerter 1979)

Trifft der Wind seitlich auf den Abluftstrahl, so sind zwei Situationen zu unterscheiden, je nachdem, ob die Strasse in einem Einschnitt oder auf ebenem Gelände ist:

- Liegt die Strasse im ebenen Gelände, so wird der ganze Abluftstrahl kompakt abgelenkt. Seine Bahn ist aus dem Verhältnis Strahl- zu örtlicher Windgeschwindigkeit bestimmt (vgl. Abbildung 9b).
- Liegt die Strasse im Einschnitt, so läuft der Abluftstrahl in den Kern des darin drehenden Wirbels ein, und nur der Wirbelrand wird seitlich verfrachtet, wodurch eine Abgaslinienquelle von 100 bis 200 m Länge entsteht. Relativ starker Seitenwind räumt die Abluft nach kurzem Weg aus dem Einschnitt hinaus, durch die intensive seitliche Frischluftzufuhr wird sie aber auch stark verdünnt; umgekehrt verhält es sich bei relativ schwachem Seitenwind. Daher sind auf 100 bis 200 m ab Portal die Abgaskonzentrationen neben der Strasse wenig von der Windstärke abhängig und liegen in 20 bis 30 m seitlichem Abstand um 10 Prozent der Austrittskonzentration (vgl. Abbildung 9b). Der gleiche Strömungsvorgang spielt sich ab, wenn die Strasse beidseitig von geschlossenen Gebäudereihen flankiert wird oder im Windschatten einer Gebäudezeile liegt (Quelle: Haerter 1979).

Analytisches Modell der Abluftausbreitung

In STUVA (1978) ist ein analytisches Modell nach Haerter & Steinemann (1977) für die Strahlausbreitung dokumentiert. Es behandelt den Verlauf der Strahlachse im Querwind, den Auftrieb und die Konzentrationen sowohl in den durch die Strahl- als auch durch die Windturbulenz dominierten Zonen.

Thermischer Auftrieb

Hier wird nur die Behandlung des Auftriebs wiedergegeben, da er für den Auftrieb einer warmen Rauchfahne am Portal eine praktische Abschätzungsmöglichkeit gibt. Die vertikale Komponente der warmen Strahlachse kann mit Hilfe der Archimedes-Zahl berechnet werden:

$$\frac{h}{D} = 0.9 \cdot Ar \cdot \left(\frac{s}{D}\right)^2 \cdot \sqrt{b \frac{s}{D}} \quad [-] \quad \text{Gleichung 26}$$

$$Ar = \frac{g \cdot D \cdot (t_0 - t_u)}{v_0^2 \cdot (t_u + 273)} \quad [-] \quad \text{Gleichung 27}$$

Mit:	h	[m]	Höhe vertikal über Portalmündung (Strasse)
	s	[m]	Abstand vom Portal, entlang der Projektion der Strahlachse auf die Ebene gemessen
	D	[m]	Portaldurchmesser
	v_0	[m·s ⁻¹]	Austrittsgeschwindigkeit der Abluft an der Portalmündung
	b	[-]	Turbulenzgrad des Strahles, 0.08 in einem zylindrischen Rohr, 0.12 unter Berücksichtigung der Turbulenz der fahrenden Fahrzeuge
	t_0	[°C]	Temperatur des austretenden Strahles an der Mündung
	t_u	[°C]	Temperatur der Umgebungsluft
	g	[m·s ⁻²]	Erdbeschleunigung

Bei 20°C Umgebungstemperatur, 25°C Übertemperatur am Tunnelaustritt und 4 m·s⁻¹ Austrittsgeschwindigkeit befindet sich die Strahlachse nach 3 Tunneldurchmessern stromabwärts des Portals ca. 1.7 Tunneldurchmesser über dem Boden bei reiner Rohrturbulenz (Annahme $D=8$ m). Bei 2 m·s⁻¹ Austrittsgeschwindigkeit befindet sie sich bereits auf ca. 6.6 Tunneldurchmessern über dem Boden: Der Strahl kann also je nach Bedingungen sehr rasch ansteigen. Die Abbildung 10 zeigt am Beispiel des Tunnels Habsburg, dass bei einem Ereignis erhebliche Temperaturdifferenzen zwischen Umgebungsluft und Rauch bei Portalausströmung durchaus möglich sind.

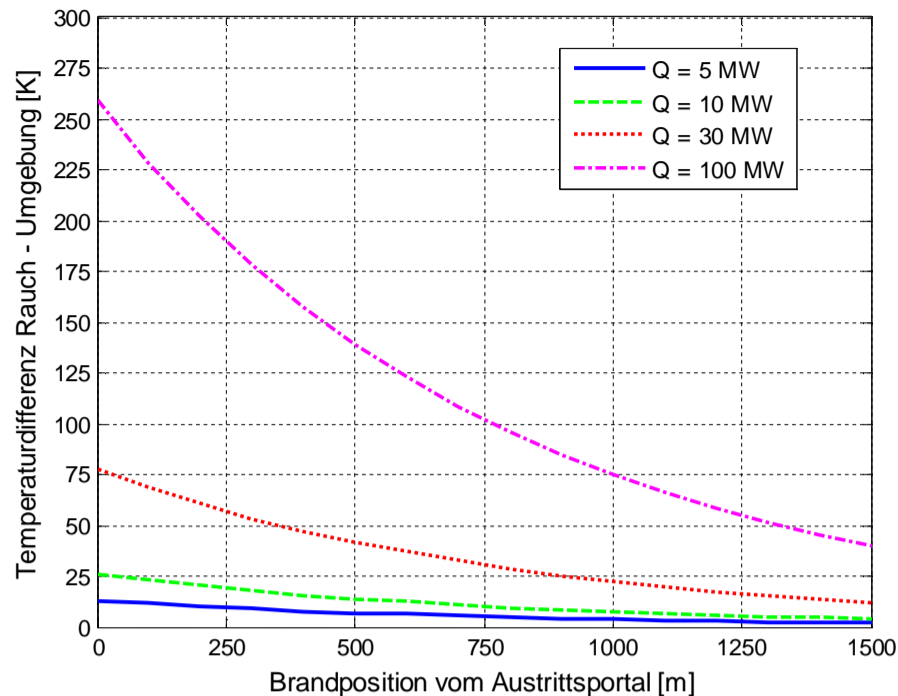


Abbildung 10: Temperaturdifferenz zwischen dem austretenden Rauch und der Umgebung am Portal für die geometrischen Randbedingungen des Tunnels Habsburg für Frischluftströmung 4 m/s stromaufwärts des Brands und 5 Min. nach Brandausbruch. Diese Kurven gelten für eine konstante Frischluftströmung und eine konstante Brandleistung ab Brandausbruch. Die Temperatur der Umgebungsluft und die Anfangstemperatur der Tunnelwand sind auf 20°C gesetzt.

2.4.6 Kaminabluf

Wird die Tunnelabluf aus einem Kamin senkrecht nach oben in die freie Atmosphäre ausgestossen, so finden sich zwei Phasen der Ausbreitung der Abluf. Die erste Phase ist impulsdominiert und wird mit den Gesetzen des seitlich angeströmten Freistrahls beschrieben. Die zweite Phase wird durch die atmosphärische Turbulenz dominiert und kann durch das Gauss-Modell beschrieben werden. Dazwischen befindet sich eine Übergangszone, in der der Strahl mit abklingendem Impuls von der atmosphärischen Turbulenz aufgebrochen wird.

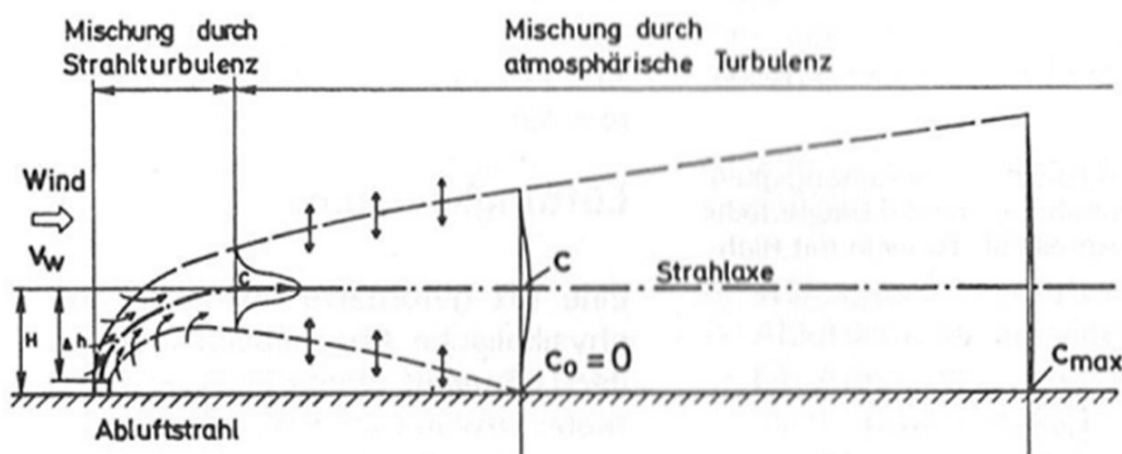


Abbildung 11: Kaminabluf bei Wind. Aufstiegsphase und anschliessende Ausbreitungsphase (Quelle: Haerter, 1979)

Phase 1: Mischung durch Strahlerturbulenz (nach Haerter 1979)

In einer ersten, impulsdominierten Phase mischt sich der Freistrahls mit der Umgebungsluft, verliert so ständig an Geschwindigkeit und wird bei Wind zunehmend umgelegt, bis er seine Aufstiegshöhe erreicht hat (vgl. Abbildung 11). Sie hängt vom Verhältnis Wind- zu Kaminaustrittsgeschwindigkeit, vom Strahldurchmesser (d.h. von der Abluftmenge) sowie von der Stabilität der Atmosphäre ab. Solche Strömungsvorgänge sind aus Modell- und Grossversuchen weitgehend bekannt und auch analytisch erfassbar.

Bei neutraler Atmosphäre, mittlerer Windgeschwindigkeit und voller Abluftmenge steigt die Tunnelluft ab Kaminaustritt um weitere 50 bis 150 m. Diese erste Aufstiegsphase er-

reicht also in diesem Fall das Gleiche wie ein Hochkamin, wobei hier hinzukommt, dass am Kaminende die Tunnelluft durch die laufende Frischlufteinmischung gegenüber der Anfangskonzentration bereits zehn- bis zwanzigmal verdünnt worden ist.

Bei Inversionslagen steigt der Freistrahler nur halb so hoch, sodass der Rauch unter der Inversion gefangen bleiben kann. Weiter können Kaltluftseen oder Hangabwinde mehrere Dutzend Meter mächtig sein, sodass der Freistrahler diese Schichten nicht immer durchstossen kann. Der Effekt der ersten impulsdominierten Phase kann also durch solche widrige atmosphärische Bedingungen gehemmt werden.

Phase 1: Mathematisches Strahlmodell in der Aufstiegsphase

Der Verlauf der Strahlachse eines seitlich angeströmten Abluftstrahls in neutraler Atmosphäre kann durch folgenden Ansatz angenähert werden (Csanady 1973 in STUVA 1978):

$$\frac{z}{\alpha D} = 1.44 \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_L} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{x}{\alpha D} \right)^{1/3} \quad [-] \quad \text{Gleichung 28}$$

$$\alpha = \frac{v}{w} \geq 1 \quad [-] \quad \text{Gleichung 29}$$

Mit:	z	[m]	Höhe vertikal über Kaminmündung
	x	[m]	Koordinate horizontal in Driftrichtung
	D	[m]	Kamindurchmesser
	v	[m·s ⁻¹]	Austrittsgeschwindigkeit der Abluft an der Kaminmündung
	w	[m·s ⁻¹]	Windgeschwindigkeit
	ρ_g	[kg·m ⁻³]	Dichte der austretenden Abluft
	ρ_L	[kg·m ⁻³]	Dichte der umgebenden Luft

Ein seitlich angeströmter Luftstrahl lässt sich so behandeln, als hätte er in einem ruhenden Medium die jeweilige Bogenlänge s zurückgelegt. Daraus kann der Verlauf der Strahluntergrenze abgeleitet werden. Siehe dazu die einschlägigen Ergebnisse aus STUVA (1978). Ein wichtiges Ergebnis daraus ist die Kaminüberhöhung der Strahlachse. Die Steigung der Strahlachse sinkt unter 0,1, wenn $z/\alpha D \geq 3$ bis 4. Das entspricht dem Ort $x/\alpha D \approx 9$. Hier kann auch erwartet werden, dass die atmosphärische Turbulenz den Abluftstrahl aufbricht. Die Kaminüberhöhung der Strahlachse kann angegeben werden mit (Csanady 1973 in STUVA 1978):

$$\frac{z}{\alpha D} = \frac{\Delta h}{\alpha D} = 3 \quad [-] \quad \text{Gleichung 30}$$

Weitere Formeln für die Aufstiegshöhe und die Konzentration von senkrechten und umgelenkten Freistrahleren in verschiedenen atmosphärischen Bedingungen sind in PIARC (1995) zusammengetragen.

Phase 2: Verdünnung durch atmosphärische Turbulenz

Die zweite Phase beginnt nach Erreichen der Aufstiegshöhe, ab wo der Wind und die atmosphärische Turbulenz die weitere Verdünnung übernehmen und diese Faktoren von 100 bis 1000 erreicht. Für diesen Teil der Abluftausbreitung kommt oft das Gauss-Modell zur Anwendung. In der Grundform ist es anwendbar bei

- punktförmigen, quasikonstanten Quellen;
- gleichmässig bebautem Gelände, über dem sich die effektive Quellhöhe ungestört einstellen kann;
- gasförmigen Stoffen oder quasigasförmigen Stoffen, deren Sinkgeschwindigkeit gegenüber dem Transport durch Turbulenz oder Winddrift vernachlässigt werden kann.

Nicht berücksichtigt werden:

- Sperrschichteffekte, z.B. durch abgehobene Inversionsschichten;
- Ablagerung am Boden oder Auswaschen bei Regen. Im Modell wird Totalreflexion am Boden angenommen;
- Stoffumwandlungen während des Transportes;
- Schwachwindsituationen. In der Praxis werden Situationen mit einer Windgeschwindigkeit unter 1 m·s⁻¹ in Anemometerhöhe ausgeschlossen. In derartigen Situationen kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die Turbulenz in Driftrichtung gegenüber der Winddrift vernachlässigt werden kann (Quelle: STUVA 1978).

Aus diesen Möglichkeiten und Begrenzungen des Gauss-Modells geht hervor, dass es für die Modellierung der Kamin-Portal-Rezirkulation, in der eine Punktquelle und eine Punktsenke sehr nahe beieinander vorkommen, nicht geeignet ist. Für weitere Details zum Gauss-Modell siehe z.B. Turner (1994).

Bemerkungen zur Formgebung des Kamins (aus Haerter & Baumann 1978)

Ein Abluftkamin muss nicht monumental sein. Er soll normalerweise aber auch die Höhe der direkt umgebenden Gebäude oder des Waldes um einige Meter überragen, damit nicht starke örtliche Windturbulenzen die anfängliche Aufstiegsbahn des Strahls zu stark zerzausen (vgl. Abbildung 12a). Ferner darf die Sogzone im Lee des Kamins den Strahl nicht partiell hinabsaugen (down wash). Als Kriterium zur Vermeidung von down wash gilt $\alpha = v/w \geq 1.5$ für das Verhältnis von Austrittsgeschwindigkeit an der Kaminmündung zu Windstärke (vgl. Abbildung 12b). Bei zum Kamin benachbarten Hochhäusern darf der Abluftstrahl nicht mit der Hochhausspitze kollidieren, da dort normalerweise die Frischluft zur Gebäudeklimatisierung hereingeholt wird.

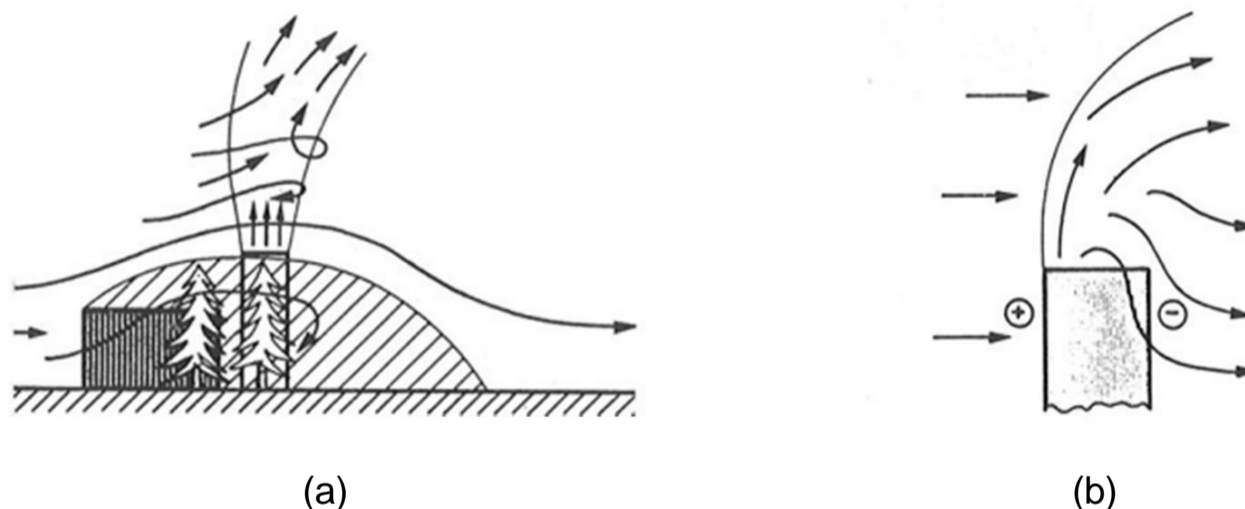


Abbildung 12: (a) Beeinflussung des Kaminaustritts durch örtliche Übergeschwindigkeiten von Gebäuden oder Turbulenzen durch z.B. Wald; (b) Beeinflussung des Kaminaustritts. Sog der Kaminleezone bei zu kleiner Austrittsgeschwindigkeit (Quelle: Haerter 1979)

Abgasfahnen und adiabatischer Temperaturgradient

Die Stabilität und Schichtung der Atmosphäre beeinflussen die Ausbreitung von Rauchgasen aus dem Abluftkamin. Die Rauchfahne zeigt je nach Wetterbedingungen ein typisches Verhalten, das mit charakterisierenden Begriffen belegt worden ist. Die Abbildung 13 gibt eine Zusammenstellung solcher Rauchfahnen in Abhängigkeit der Temperaturschichtung wieder.

Thermischer Auftrieb

Ist der Strahl wärmer als die Umgebungsluft, so unterstützt der Auftrieb den Aufstieg der Rauchfahne. Dies ist vorteilhaft hinsichtlich der Rezirkulation. Der Strahl kann jedoch an heißen Tagen im Frühling und im Sommer kälter sein als die Umgebungsluft, bei grösseren Absaugstrecken auch bei einem Brand. In diesem Fall bremst der Abtrieb den Aufstieg des Strahls. Bei sehr langsamen Austrittsgeschwindigkeiten kann dies sogar dazu führen, dass der Rauch rasch zu Boden fällt. In solchen Fällen wird die Rezirkulation verstärkt.

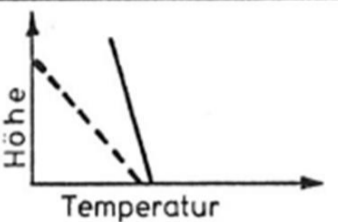
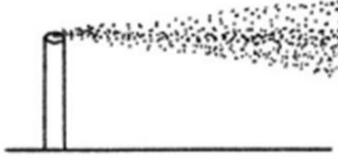
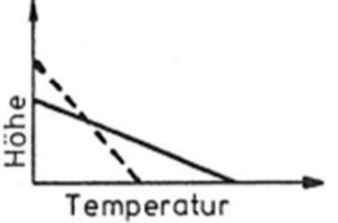

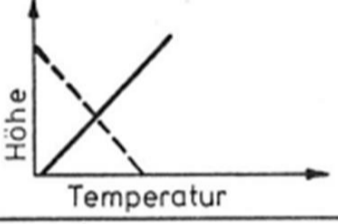
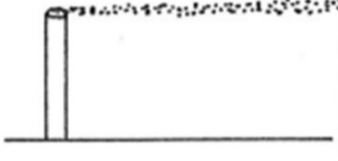
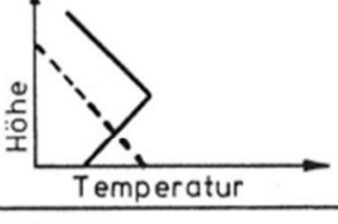
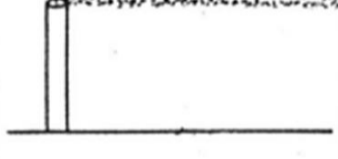
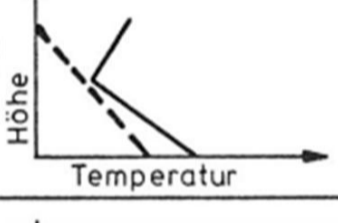

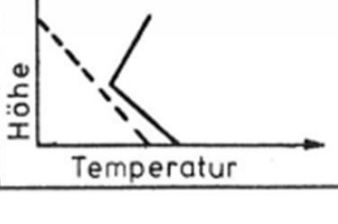
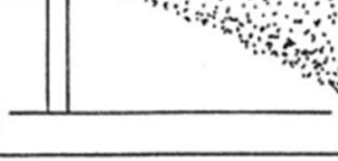
lfd. Nr.	Temperatur		Rauchfahne	
	Profil (gestrichelt: adiabatischer Zustand)	Bemerkung	Gestaltung	Bemerkung
1		schwache vertikale Temperaturabnahme		„coning“
2		starke vertikale Temperaturabnahme		„looping“
3		Inversion		„fanning“
4		Inversion unten, darüber Temperaturabnahme		„lofting“
5		Temperaturabnahme unten (bei guter Durchmischung), darüber Inversion		„fumigation“
6		Temperaturabnahme unten (windschwache Wetterlage), darüber Inversion		„trapping“

Abbildung 13: Gestalt von Rauchfahnen in Abhängigkeit der Temperaturschichtung in der Atmosphäre (Quelle: Herb 1964 und Walker 1978 in STUVA 1978)

2.5 Strömungskurzschlüsse an Tunnelportalen

2.5.1 Experimentelle Arbeit von Haerter & Baumann

Die experimentelle Arbeit von Haerter & Baumann (Haerter & Baumann 1978, Baumann 1979) ist in STUVA (1978) zusammengefasst und hier wiedergegeben. Sie betreffen Tunnelportale auf der Ebene mit und ohne Wand. „Die verschiedenenorts durchgeführten Laborversuche bestätigen und ergänzen sich, sodass Folgendes generell gilt:

- Ohne Wind treten je nach Abstand z der Tunnelinnenwände bzw. Abstandsverhältnis z/D und des Luftmengenverhältnisses Q_2/Q_1 die Rezirkulationsverhältnisse c_s/c gemäss Abbildung 14a auf.
- Bei Seitenwind u mit Anströmwinkel α sind die Kurzschlüsse in Abbildung 14b zusammengestellt: Die Tunnelröhren haben einen Abstand von 5 m, sodass bei geringem Seitenwind relativ zur Austrittsgeschwindigkeit v_0 noch geringe Rezirku-

lation auftritt. Mit zunehmender Windstärke steigt die Rezirkulation auf einen Höchstwert zwischen 0.35 und 0.5, der dann allmählich wieder abfällt. Der schraffierte Konzentrationsbereich gilt für verschiedene Variationsbereiche folgender Parameter:

- Seitenwind im Bereich $\alpha = 90^\circ$ bis 45° . Bei einer Anströmung mehr von vorn auf das Portal nimmt die Rezirkulation stark ab.
 - Versetzungsverhältnisse $L/D = 0$ bis 3. Bei zunehmender Versetzung fällt die Rezirkulation ab, aber nur langsam.
 - Das Luftmengenverhältnis Q_2 / Q_1 hat einen relativ geringen Einfluss.
- c) Die Anordnung einer Trennwand zwischen den beiden Tunnelröhren mit einer Länge von mindestens 2-mal die grösste Höhe des Tunnelquerschnitts reduziert die Rezirkulation auf 0.1 (0.2 im ungünstigsten Fall).
- d) Liegen die beiden Tunnelportale in einem beidseitig begrenzten Einschnitt, so liegt die Rezirkulation eher höher als nach a) bis c).“

Quelle: STUVA (1978)

2.5.2 Experimentelle Arbeiten von Maarsingh & Swart

Die Rezirkulation zwischen Tunnelportalen auf der Ebene und in Einschnitten mit und ohne Wand wurde von Maarsingh & Swart (1991) experimentell untersucht. Die Ergebnisse weisen die gleiche Bandbreite wie die Ergebnisse von Haerter & Baumann aus. Für weitere Details, insbesondere die Ergebnisse der Rezirkulation in Einschnitten, wird auf die Referenz verwiesen.

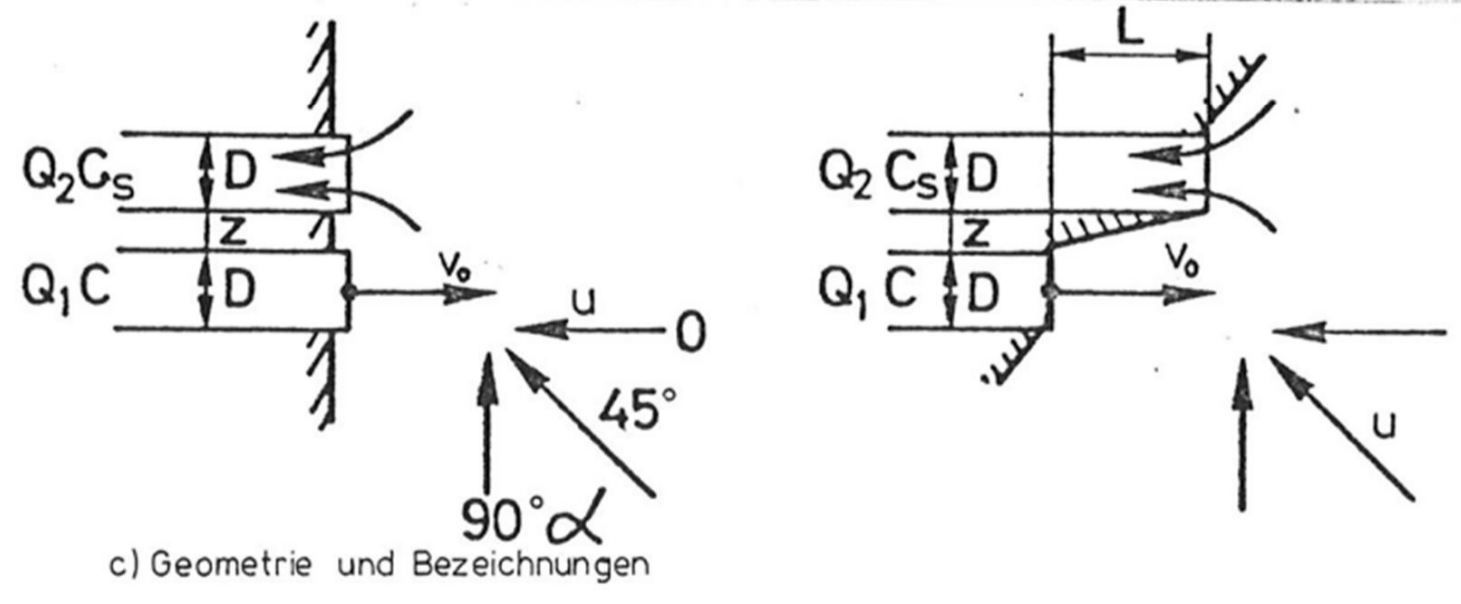
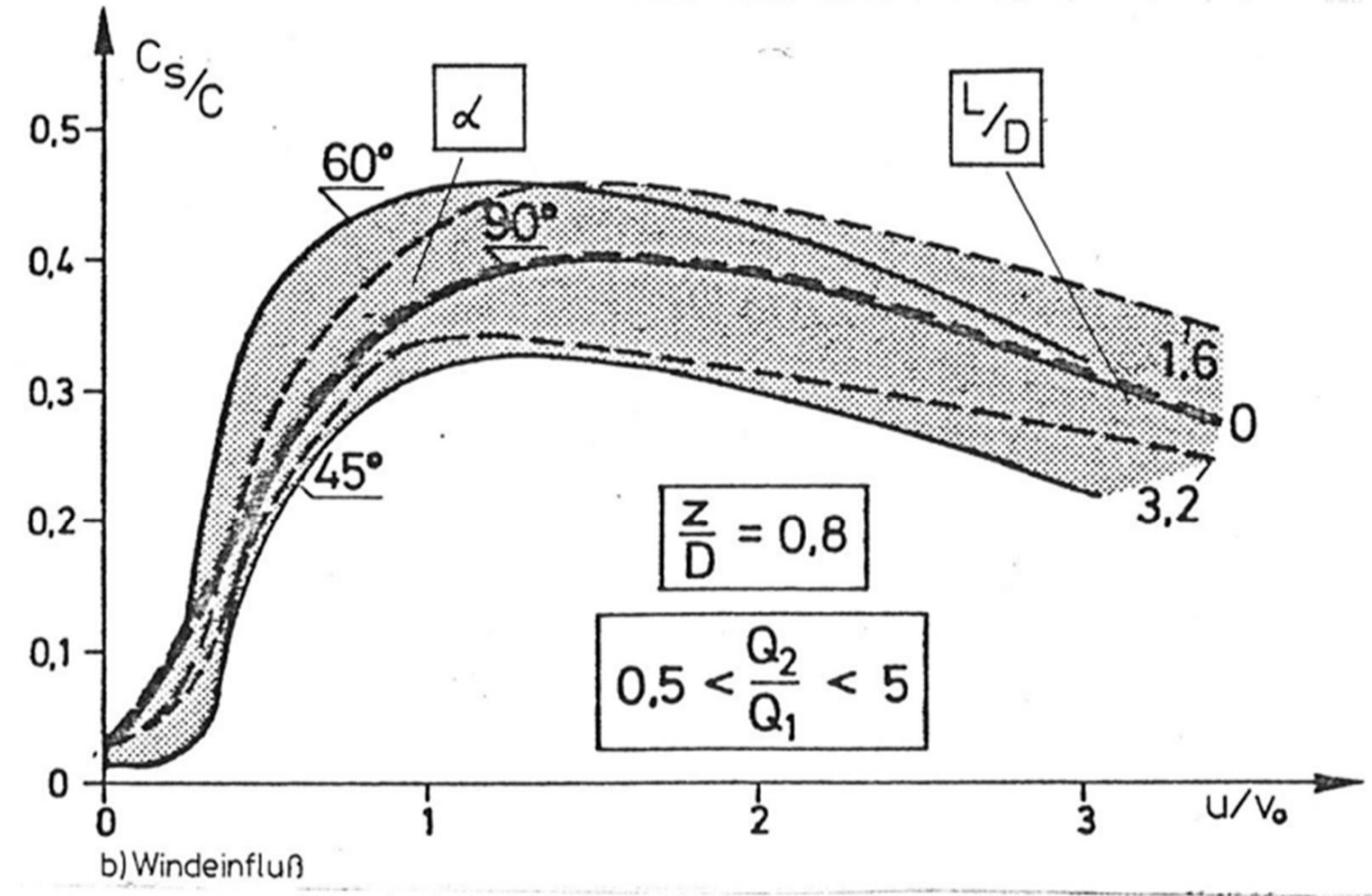
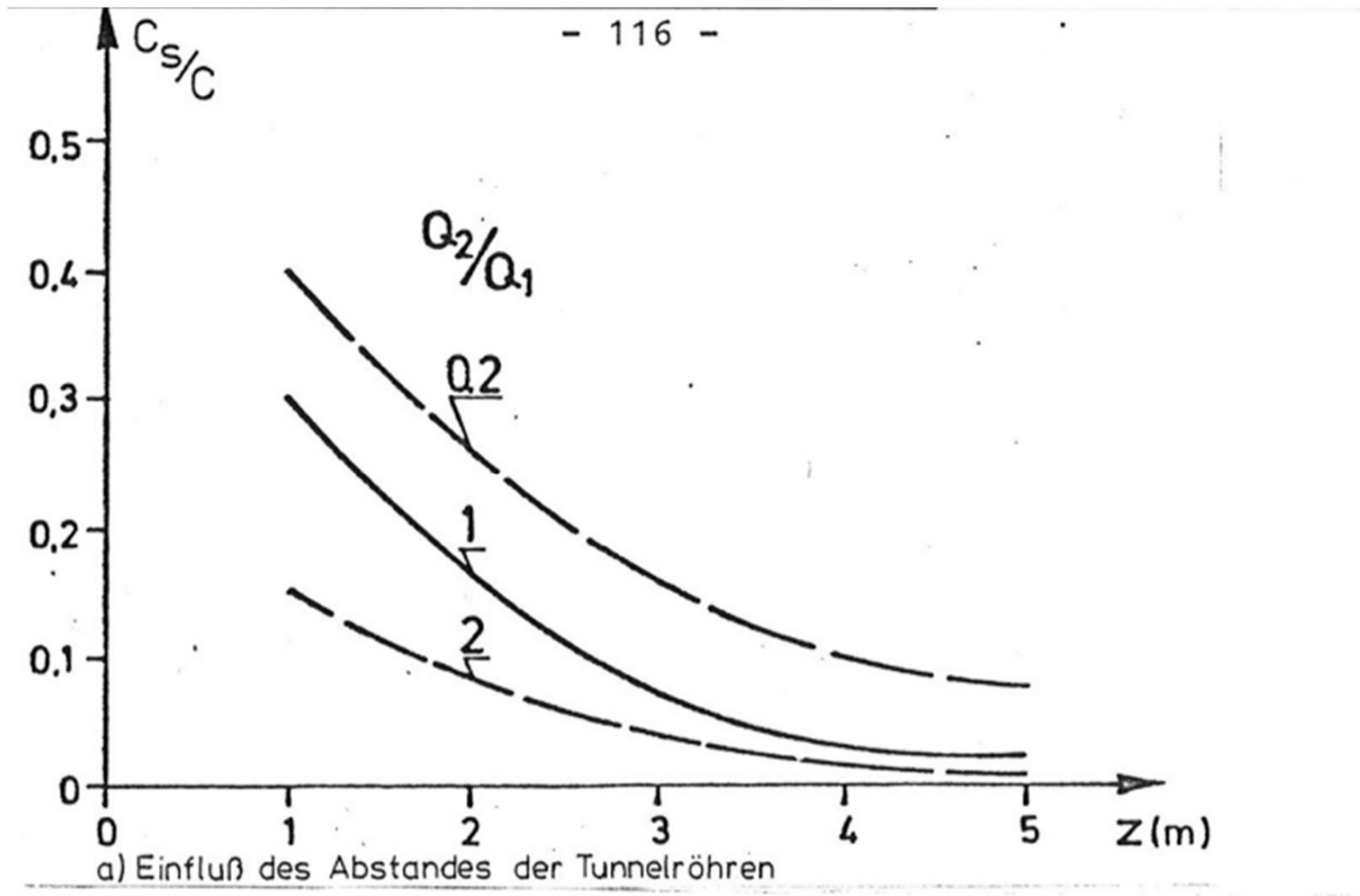


Abbildung 14: Rezirkulation bei parallelen Portalen nach Haerter und Baumann (Quelle: STUVA 1978)

2.5.3 Vermeidung von Strömungskurzschlüssen nach ASTRA 13001 2008

Nach der Schweizer Richtlinie ASTRA 13001 2008 sind folgende Massnahmen zur Vermeidung von Strömungskurzschlüssen festgehalten:

Die Rezirkulation von Rauch und Schadstoffen von einer Tunnelröhre in eine andere und zwischen Abluftbauwerken und Aussenluftfassungen bzw. Portalen ist durch geeignete bauliche Massnahmen zu vermeiden. Bei Tunneln mit zwei parallelen Röhren genügt es in der Regel, zu diesem Zweck eine 100 m lange Ausströmzone vor dem Portal von einer 30 m langen Einströmzone (Abb. 7.12) durch eine Wand mit der Höhe des Fahrtraums oder durch einen Versatz der Portale zu trennen. Mit Portallagen in Einschnitten oder mit hohen Lärmschutzwänden sind die Dimensionen zu vergrössern.

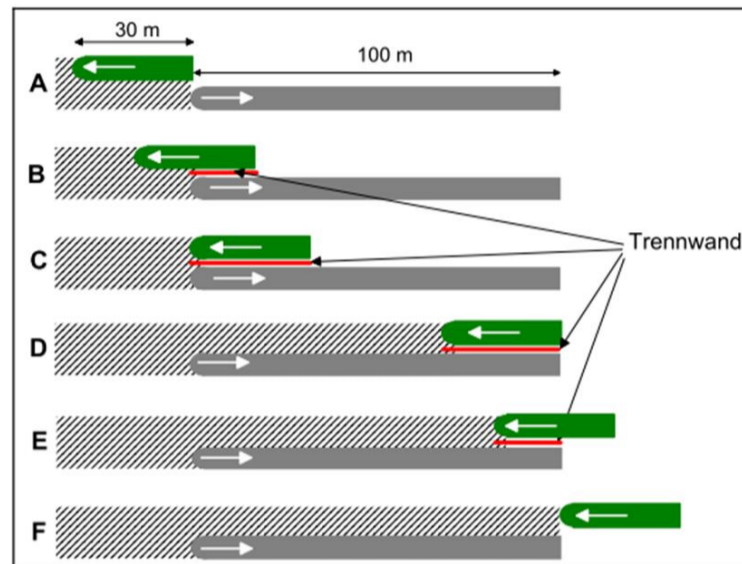


Abbildung 15: Anordnungen von Portalen und Trennwand zur Vermeidung eines Strömungskurzschlusses (Quelle: ASTRA 13001 2008)

Bei einem Ereignis ist die Lüftung der Gegenröhre so zu betreiben, dass ein Strömungskurzschluss an den Portalen verhindert wird. Zu diesem Zweck muss die Gegenröhre für den Verkehr gesperrt werden.

Damit zwei sich folgende Tunnel lüftungstechnisch unabhängig voneinander betrachtet werden können, muss der Abstand zwischen den Portalen mindestens 100 m bei Querrung eines Tales, 200 m bei Führung der Strasse in einem tiefen Einschnitt zwischen den Tunneln und 250 m bei einer einseitigen Galerie betragen.

Bei der Positionierung einer Rauchaussparöffnung sind die Orographie und die örtlichen meteorologischen Verhältnisse sowie die Hinweise in SIA 197/2, Kap. 8.10.4, zu berücksichtigen. Als Richtwert für den Mindestabstand von Rauchaussparöffnung zu Portal gelten 50 m.

3 Beurteilung des Gefahrenpotentials durch Rezirkulation

3.1 Einleitung

Im Kapitel 0 wurde dargestellt, wie Fahrzeugbrände mit Wannenbränden beliebiger Leistung bezüglich Brandleistung und Rauchproduktion zufriedenstellend physikalisch modelliert werden können. Anschliessend wurde das Gefahrenpotential von Fahrzeugbränden in Tunneln und mit den Kennzahlen der Sichtweite und der damit verknüpften maximal zulässigen Russkonzentration dargestellt. In einem Zahlenbeispiel wurde der Begriff der kritischen Rezirkulation eingeführt und dessen Zusammenhang mit der Brandlüftung in einem Tunnel mit Absaugung, der Russkonzentration am Kaminaustritt und der maximal zulässigen Russkonzentration in der Gegenröhre aufgezeigt.

Die Rezirkulation von Kamin zu Portal zeichnet sich dadurch aus, dass die Zeit beim Teil „Emission“ nach Tabelle 2 eine untergeordnete Rolle spielt: Der aus dem Kamin austretende Volumenstrom ist gemäss ASTRA 13001 (2008) eine Funktion der Tunnelgeometrie und wird in der Regel so lange ausgeblasen, bis der Brand vollständig gelöscht ist oder die Feuerwehr andere Massnahmen eingeleitet hat. In diesem Fall ist es also zulässig, von einer konstanten Rauchquelle zu sprechen, auch wenn diese nur für die Dauer des vollentwickelten Brandes gilt und sich die Brandleistung mit der Zeit verändert. Als konstante Rauchquellen können auch die Fälle eines Brandes in einem natürlich belüfteten und einem längsbelüfteten Tunnel und in den letzten 300 m eines Tunnels mit Rauchabsaugung zählen, da die Rauchgase in diesen Fällen stets durch ein Portal ausgestossen werden.

Bei der Rezirkulation von Portal zu Portal ist jedoch zu beachten, dass die Zeit sowohl bei den Teilphänomenen „Emission“ als auch „Immission“ bei der Ursachenkette nach Tabelle 1 in Tunneln mit mechanischer Belüftung eine entscheidende Rolle spielt. Die mechanische Belüftung ermöglicht es, sowohl in der Ereignisröhre als auch in der Gegenröhre die Luftströme derart zu steuern, dass wenige Minuten nach Brandausbruch kein Rauch mehr aus der Ereignisröhre strömt bzw. in die Gegenröhre eingetretener Rauch wieder zum Portal zurückgedrängt wird (vgl. Kapitel 0). Damit ist es möglich, Emission und Immission vor Erreichen der maximalen Brandleistung zu kontrollieren. Es kann also nicht von einer konstanten Rauchquelle gesprochen werden. Daher ist in diesem Fall noch eine Wahrscheinlichkeitsbetrachtung notwendig, um das Gefahrenpotential voll einzuschätzen.

3.2 Rezirkulation bei konstanter Rauchquelle mit Absaugung

Zur Abschätzung des Gefahrenpotentials der Rauchrezirkulation von einer konstanten Rauchquelle ist ein Schaubild zweckmässig, das die Brandleistung mit der kritischen Rezirkulation für die Sichttrübung verknüpft. Ein solches Schaubild wird hier vorgestellt.

Die Gleichung 5 ergibt die Abmessungen des Brandes in Funktion der Brandleistung und des Brennstoffes. Aus Gleichung 4 kann dann die Massenverlustrate bestimmt werden. Aus Gleichung 6 folgt dann in Funktion der Abmessungen der Brandleistung und die Massenproduktion an Brandprodukt i , hier Russ. Schliesslich ergibt sich aus Gleichung 7 die Russkonzentration in der Kaminabluft in Abhängigkeit des abgesaugten Volumenstroms. Aus der Gleichung 14 und der Gleichung 15 lassen sich Werte für die zulässige Russkonzentration bestimmen. Dies in Abhängigkeit der Sichttrübung und, je nach Methode, der spezifischen Kenngrössen des Brands. Schliesslich wird die kritische Rezirkulation mit Gleichung 21 bestimmt.

Die wesentlichen Parameter der Rezirkulation und deren typische Werte sind somit:

- die Brandleistung \dot{Q} [MW], typischerweise zwischen 5 und 200 MW;
- der Brennstoff (vgl. Daten zu Wannenbränden in Tabelle 5);

- die Abluftmenge \dot{V}_L [m^3s^{-1}], typischerweise zwischen 100 und 300 m^3s^{-1} ;
- die Sichtweite S [m] für Werte zwischen 10 und 50 m;
- die Sichttrübung K [m^{-1}], bei Sichtweite 25 m, je nach Art der Lichtquelle zwischen 0.12 und 0.32 m^{-1} ;
- daraus folgend der Grenzwert der Russkonzentration $c_{S,zulässig}$ [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] (zulässige Russkonzentration), je nach Sichtweite, Art der Lichtquelle und Berechnungsweise, zwischen 0.005 und 0.105 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Diese Parameterwerte und deren funktionale Abhängigkeit können in einem Schaubild, wie beispielhaft in Abbildung 16 dargestellt, aufgetragen werden.

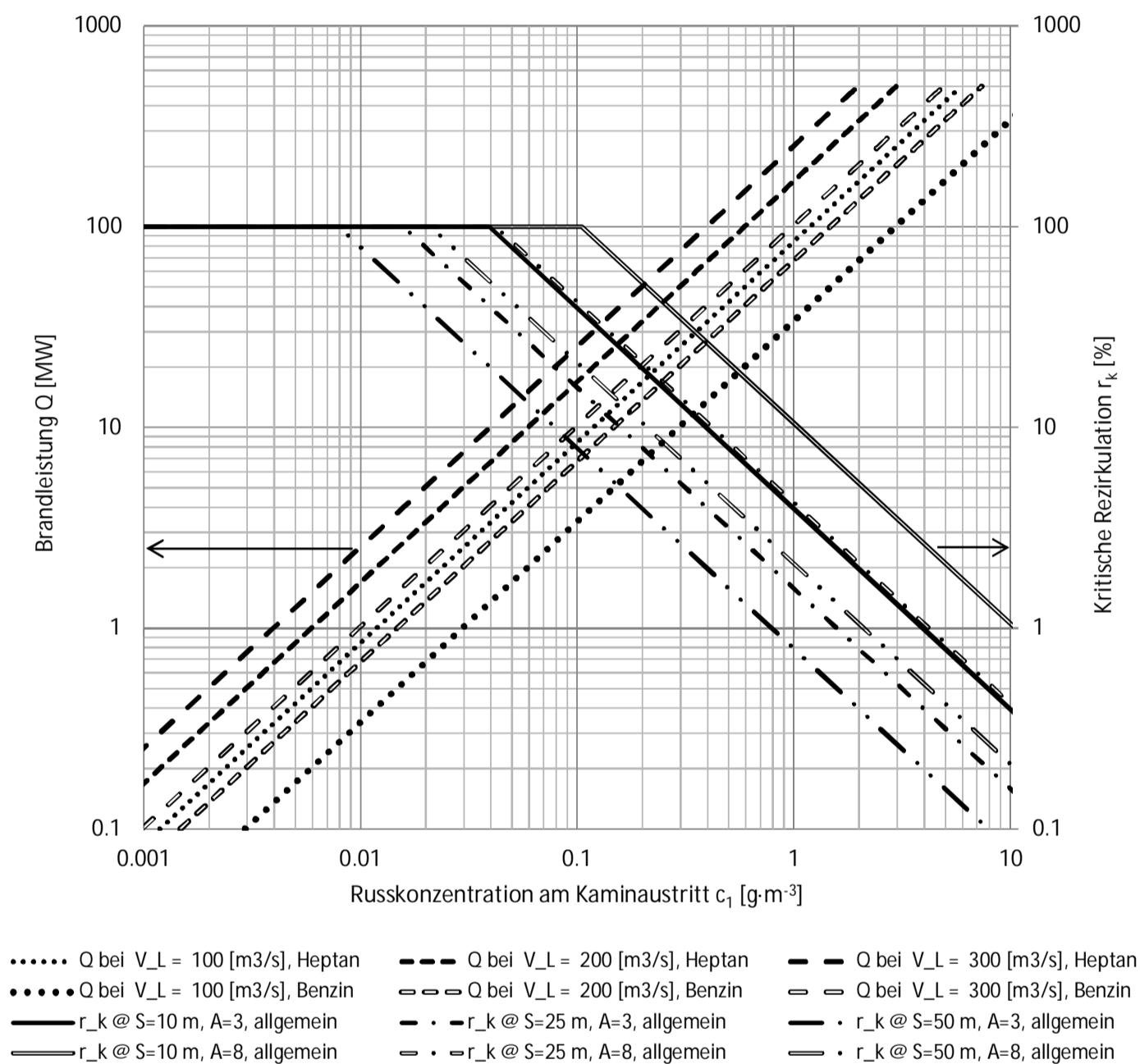


Abbildung 16: Kamin-Portal-Rezirkulation: Schaubild der Abhängigkeit zwischen Brand-

leistung \dot{Q} [MW] und kritischer Rezirkulation für Russ $r_{S,k}$ von einem Heptan- bzw. Benzinbrand über die Russkonzentration am Kaminaustritt c_1 [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]. Es sind Kurven für verschiedene Parameterwerte des Abluftvolumenstroms \dot{V}_L [m^3s^{-1}] und der Sichtweite S [m] angegeben. Die kritische Rezirkulation ist für emittierende und reflektierende Schilder bei $K_m = 7.6$ [m^2g^{-1}] für Benzin bzw. bei $K_m = 11.8$ [m^2g^{-1}] für Heptan dargestellt. Die Russkonzentration am Kaminaustritt c_1 [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] stellt eine untergeordnete Rolle in der Darstellung dar. Sie ermöglicht die gleichzeitige Darstellung vieler Werte der dominierenden Parameter.

Dieses Schaubild zeigt die Abhängigkeit zwischen Brandleistung \dot{Q} [MW] und der kritischen Rezirkulation für Russ $r_{S,k}$ von einem allgemeinen Brand mit dem Zwischenschritt der Russkonzentration am Kaminaustritt c_1 [g·m⁻³]. Es sind Kurven für verschiedene Parameterwerte des Abluftvolumenstroms \dot{V}_L [m³s⁻¹] und der Sichtweite S [m]. Die kritische Rezirkulation ist für emittierende und reflektierende Schilder bei $K_m=7.6$ [m²g⁻¹] dargestellt. Die Russkonzentration am Kaminaustritt c_1 [g·m⁻³] stellt eine untergeordnete Rolle in der Darstellung dar. Sie ermöglicht die gleichzeitige Darstellung vieler Werte der dominierenden Parameter. Die Kurvenschar der kritischen Rezirkulation ist nach oben auf 100 % begrenzt; in der logarithmischen Auftragung verlaufen die Kurven linear mit Steigung -1, da $r_k \sim (c_1)^{-1}$. Die Kurvenschar der Brandleistung verläuft in der logarithmischen Auftragung nahezu linear mit Steigung ca. 1.

Anwendungsbeispiel

Die Anwendung des Schaubilds aus Abbildung 16 zur Abschätzung der kritischen Rezirkulation soll an einem 30-MW-Heptan-Brand bei 240 m³s⁻¹ Absaugung und einer zulässigen Sichtweite von 25 m (vgl. Abbildung 17) für die Werte eines Heptanbrands erklärt werden.

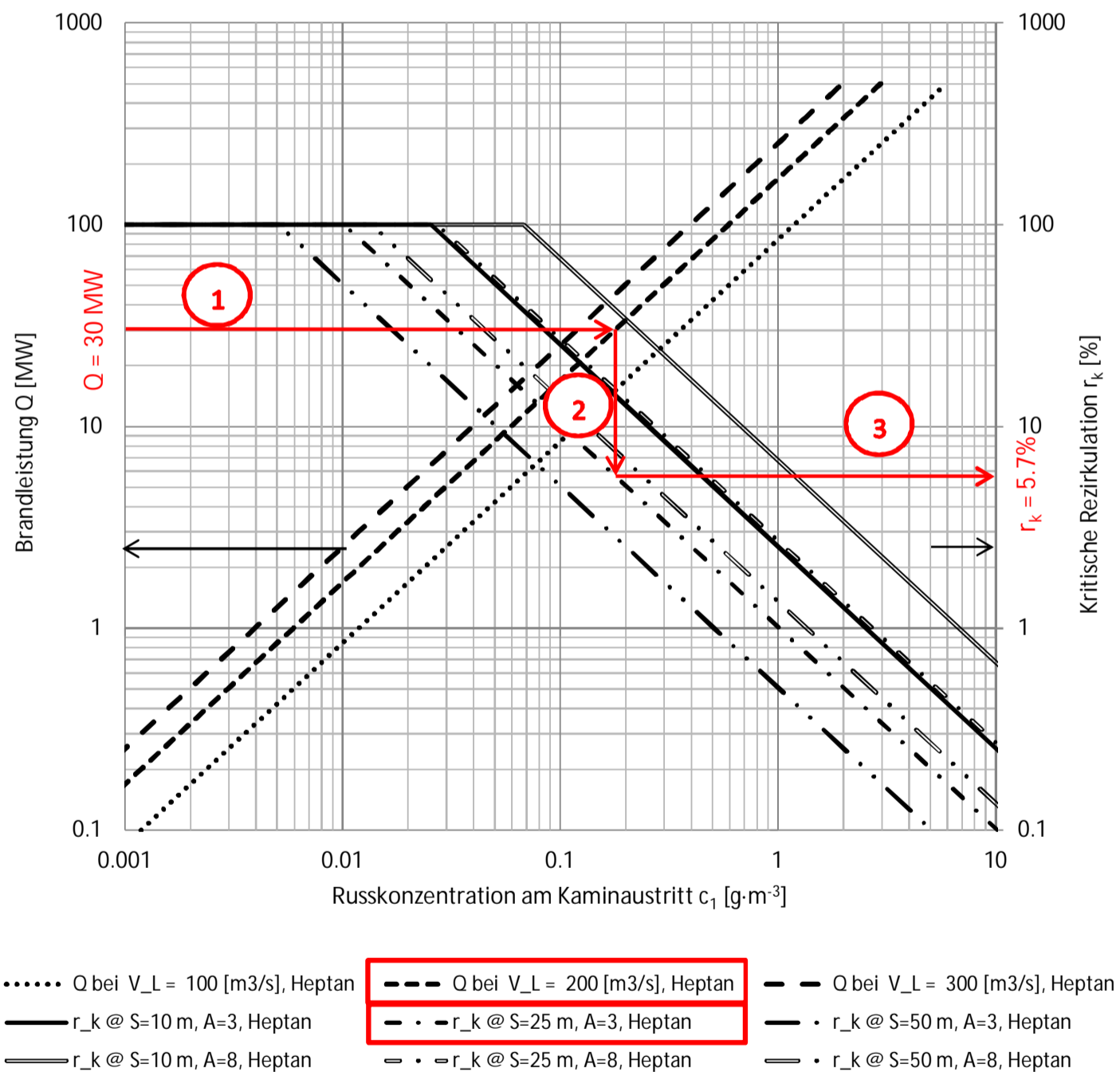


Abbildung 17: Anwendungsbeispiel des Brandleistung-Rezirkulation-Schaubilds mit 30-MW-Heptan-Brand bei 200 m³s⁻¹-Absaugung und einer Sichtweite von 25 m. Dieses Schaubild unterscheidet sich von demjenigen in Abbildung 16 dadurch, dass hier für den Zusammenhang zwischen Konzentration am Kaminaustritt und kritischer Rezirkulation nur die spezifischen Werte des Heptanrauchs verwendet werden ($K_m = 11.8$ m²g⁻¹).

Folgende Schritte sind dazu notwendig:

- Man steige bei 30 MW Brandleistung von links in das Schaubild ein und fahre waagrecht, bis man auf die Brandleistungslinie bei $\dot{V}_L = 240 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ trifft.
- Man fahre von dieser Brandleistungslinie senkrecht nach unten oder oben, bis man auf die Linie der kritischen Rezirkulation für den Heptanbrand bei Sichtweite 25 m und reflektierendem Schild ($A = 3$) den Heptanbrand trifft.
- Man fahre waagrecht nach rechts und lese den Wert der kritischen Rezirkulation $r_{S,k} = 7\%$ auf der Skala ab.

Somit ist der Wert der kritischen Rezirkulation für die gegebenen Parameterwerte graphisch ermittelt. Dieses Schaubild lässt sich auch in umgekehrter Richtung durchlaufen: Prognostiziert zum Beispiel eine Simulation eine Rezirkulation von 13.5 %, dann ist diese Rezirkulation für Brände von Brandleistung grösser gleich 30 MW kritisch.

Abgrenzung

Das soeben vorgestellte Schaubild ermöglicht, das Gefahrenpotential der Rezirkulation zwischen einer konstanten Rauchquelle (Emission) und einer Tunnelröhre (Immission) abzuschätzen in Abhängigkeit der Brandleistung. Es verknüpft also die Phänomene „Emission“ und „Immission“ direkt miteinander (vgl. Tabelle 2). Es macht aber keinerlei Aussagen über die Mechanismen der Transmission der Rauchgase, sondern nur darüber, ob diese Transmission als gefährlich eingestuft werden muss oder nicht. Die Thematik der Mechanismen der Transmission wurde in den Grundlagen bereits angeschnitten und wird in den Kapiteln zur Strömungssimulation weiter vertieft.

Ferner gibt es auch keinen Aufschluss über die zeitlichen Abhängigkeiten von Tunnelbränden, die Umschaltung von der Betriebslüftung zur Ereignislüftung und die Ausbreitungszeit des Rauchs von der Quelle zum Ort der Immission. Das vorgestellte Schaubild muss im konkreten Anwendungsfall im Kontext dieser Fragestellungen interpretiert werden.

3.3 Rezirkulation bei konstanter Rauchquelle mit Längslüftung

Das in Kapitel 3.2 vorgestellte Schaubild kann für Längslüftungen angepasst werden, indem der Zusammenhang zwischen Brandleistung und Russkonzentration am Austritt für verschiedene Werte der Strömungsgeschwindigkeit anstatt des Volumenstroms in der Ereignisröhre dargestellt wird. Allerdings büsst das Schaubild dann etwas von seiner allgemeinen Gültigkeit ein, denn es gilt dann nur für einen spezifischen Wert der Querschnittsfläche des Fahrtraums. Das in Abbildung 18 vorgestellte Schaubild gilt für eine Querschnittsfläche von $A_{tun} = 62.5 \text{ m}^2$ (z.B. Tunnel Habsburg).

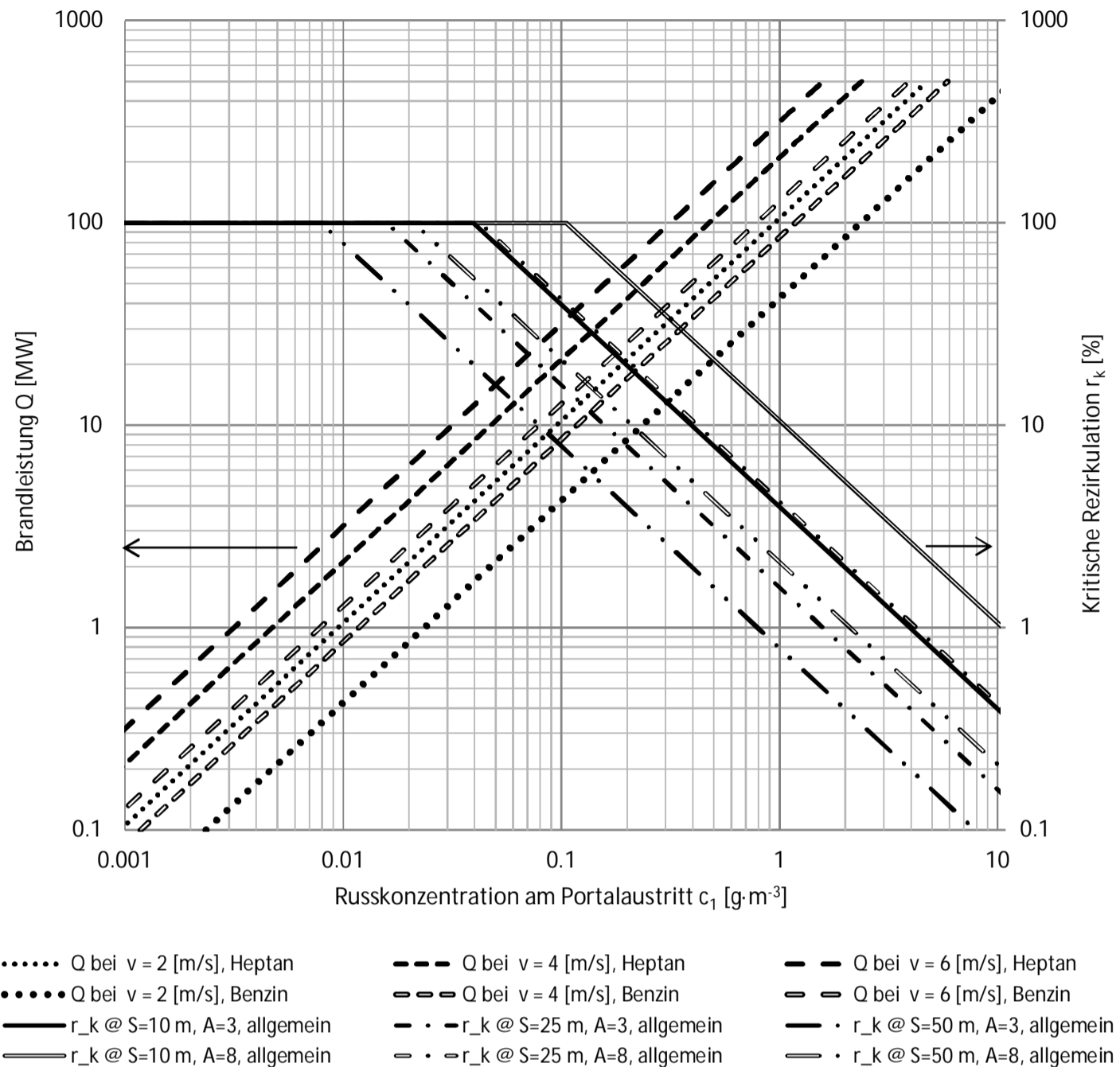


Abbildung 18: Portal-Portal-Rezirkulation: Schaubild der Abhängigkeit zwischen Brand-

leistung \dot{Q} [MW] und kritischer Rezirkulation für Russ $r_{s,k}$ von einem Heptan- bzw. Benzinbrand über die Russkonzentration am Austrittsportale c_1 [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] bei $A_{\text{tun}} = 62.5 \text{ m}^2$. Es sind Kurven für verschiedene Parameterwerte der Längsströmung im Tunnel v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] und der Sichtweite S [m] angegeben. Die kritische Rezirkulation ist für emittierende und reflektierende Schilder bei $K_m = 7.6 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ für Benzin bzw. bei $K_m = 11.8 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ für Heptan dargestellt. Die Russkonzentration am Portalaustritt c_1 [$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] stellt eine untergeordnete Rolle in der Darstellung dar. Sie ermöglicht die gleichzeitige Darstellung vieler Werte der dominierenden Parameter.

3.4 Wahrscheinlichkeitsbetrachtung

Die vorausgehenden Kapitel haben gezeigt, dass unter gewissen Umständen durchaus eine kritische Rezirkulation eintreten kann. Es stellt sich nun die berechtigte Frage, wie gross die Eintrittshäufigkeit resp. das resultierende Risiko für den Tunnelbenutzer ist. Eine quantitative Antwort (z.B. Todesopfer pro Jahr) kann eine Risikoanalyse geben. Diese muss aber spezifisch für ein Tunnelobjekt durchgeführt werden.

Ziel dieses Kapitels ist nicht die tiefgründige Diskussion oder gar die Durchführung einer Risikoanalyse. Diese Themen sind in der einschlägigen Literatur bestens beschrieben und gehen über den Umfang des vorliegenden Forschungsprojekts hinaus.

Vielmehr sollen grundsätzliche Überlegungen angestellt und Anregungen für die Durchführung einer Risikoanalyse geliefert werden.

Das Risiko ist allgemein definiert aus dem Produkt Eintrittshäufigkeit und Schadensausmass. Häufig sind Massnahmen auch anhand einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse zu begründen. In den folgenden Kapiteln werden diese Aspekte kurz erläutert.

3.4.1 Eintrittshäufigkeit

Die Eintrittshäufigkeit bezeichnet dabei die Häufigkeit, mit der eine kritische Rezirkulation innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls eintritt (Einheit Anzahl Ereignisse pro Zeit). Grundsätzliche Überlegungen zur Rezirkulation zeigen, dass eine kritische Rezirkulation nur bei einer ungünstigen Verkettung von Bedingungen eintritt. Die elementarsten Bedingungen sind folgende:

- Rauchaustritt aus dem Ausfahrtsportal der Ereignisröhre (Emission);
- Rauchübertrag vom Ausfahrtsportal der Ereignisröhre zum Einfahrtsportal der Gegenröhre (Transmission);
- Raucheintritt durch das Einfahrtsportal der Gegenröhre (Immission).

Die Wahrscheinlichkeit, dass diese elementaren Bedingungen erfüllt sind, ist von vielen weiteren Unter-Bedingungen abhängig. Einige der wichtigsten sind in der Folge dargestellt:

- **Initialereignis Brand**
Eine Rauchquelle, d.h. z.B. ein Fahrzeugbrand, muss vorhanden sein. Die Wahrscheinlichkeit für ein Brandereignis ist von vielen Faktoren abhängig, wie z.B. Verkehrsart, -menge, -zusammensetzung und Tunnelcharakteristik (Ein-/Ausfahrten, Steigung, Kurvenradius etc.). Die häufigsten Brandursachen sind Kollision und technischer Defekt.
- **Portallagen, Gelände (Lage und Versatz der Portale, Orographie)**
Die Portallage, -distanz und das Gelände müssen eine Rezirkulation zulassen. Diesbezüglich gibt es nur einen Zustand (Wahrscheinlichkeit = 1).
- **Brandort im Tunnel**
Der Brandort muss ungünstig sein (meist im Bereich des Ausfahrtsportals). Ist der Brand weit im Tunnelinnern, bleibt in der Regel genügend Zeit, um eine Rezirkulation mit geeignetem Betrieb der Fahrraumlüftung zu verhindern. Die Wahrscheinlichkeit des Brandortes kann auf verschiedene Arten bestimmt werden, wie z.B. auf Grund von Längenverhältnissen, Unfallstatistiken usw.
- **Windrichtung und -geschwindigkeit**
Nur bei gewissen Windverhältnissen tritt Rezirkulation überhaupt ein. Die Wahrscheinlichkeit kann anhand von Windrosen bestimmt werden. Vorsicht ist geboten, wenn die Windmessstelle nicht unmittelbar beim Portal liegt (was meistens nicht der Fall ist). Die Windrichtung kann kleinräumig stark variieren.
- **Wirkung Branddetektion Brandlüftung**
Mit geeignetem Betrieb der Fahrraumlüftung kann eine Rezirkulation in vielen Fällen wirksam reduziert oder verhindert werden. Dazu ist aber eine funktionierende Detektion und Fahrraumlüftung erforderlich. Die Wahrscheinlichkeit einer Falschdetektion, eines Ausfalls oder Fehlbetriebs ist schwierig abzuschätzen. In Zulauf et al. (2009) wird er mit 1 % angegeben.
- **Brandleistung**
Die Brandleistung hat unter anderem Einfluss auf die Rauchproduktion und auf die Temperatur der ausströmenden Rauchgase aus dem Ausfahrtsportal. Die beiden Effekte sind gegenläufig. In Zulauf et al. (2009) werden die Wahrscheinlichkeiten je Brandleistung folgendermassen angegeben: 5 MW -> 90 %, 30 MW -> 9.9 %, 50 MW -> 0.09 %, 100 MW -> 0.01 %.

Die Eintrittshäufigkeit kann nach dem Festlegen der einzelnen Wahrscheinlichkeiten z.B. anhand einer Ereignisbaumanalyse ermittelt werden.

Anhand von qualitativen Überlegungen wird die Eintrittshäufigkeit einer kritischen Rezirkulation bei typischen Tunneln mit mechanischer Fahrraumlüftung mindestens auf eine Grössenordnung kleiner geschätzt als die Eintrittshäufigkeit eines Brandereignisses.

3.4.2 Schadensausmass

Das Schadensausmass bezeichnet die Konsequenzen oder die Tragweite eines Ereignisses. Die Einheit hängt vom Fokus der Untersuchung ab. Es können sowohl die Anzahl Verletzte, Todesopfer wie auch eine monetäre Grösse oder Stautunden bestimmt werden.

Anhand von Simulationsmodellen (Rauchausbreitung, Flucht) kann das Schadensausmass bestimmt werden. Im Zusammenhang mit der Rezirkulation müssen immer beide Tunnelröhren und auch indirekte Gefährdungen berücksichtigt werden. Ein Beispiel dazu wäre, dass ein Tunnelbenützer in der Ereignisröhre stirbt, weil er den Notausgang in die Gegenröhre nicht verwendet, weil der Querschlag von der Gegenröhre her verraucht wird. Eine direkte Gefährdung mit Todesfolge, die von der Rezirkulation ausgeht, wird als sehr gering beurteilt, weil die häufigsten Todesursachen wie hohe Temperatur, Wärmestrahlung und Rauchvergiftung in der Gegenröhre nicht vorhanden oder deutlich reduziert sind. Eine Ausnahme stellt der Gefahrgutunfall mit Entweichung von giftigen Gasen dar.

Primär führt die Rezirkulation zu einer eingeschränkten Sichtweite in der Gegenröhre und entsprechend einem möglichen Verlust der Orientierung. Daher ist es allenfalls sinnvoller, als Schadensindikator die Anzahl der Tunnelbenützer anzusetzen, die bei der Flucht in einen kritisch verrauchten Bereich in der Gegenröhre gelangen, anstatt die Anzahl Todesopfer.

3.4.3 Risiko Kosten-Wirksamkeit

Kriterien für die absolute Risikobeurteilung in der Schweiz, die für die Tunnelanlagen angewendet werden können, findet man z.B. in der Störfallverordnung (StFV 1992) oder der ASTRA-Richtlinie 89001 (ASTRA 89001 2009).

Unter Berücksichtigung der vorgängig diskutierten Themen zeigt sich, dass das resultierende Todesfallrisiko für das Szenario Rezirkulation weit geringer ist als die Grenzwerte der erwähnten Dokumente. Dabei gilt es aber zu beachten, dass die Grenzwerte alle anderen möglichen Ereignisszenarien einschliessen (StFV nur Szenarien im Zusammenhang mit Gefahrgütern).

Bei der Kosten-Wirksamkeits-Analyse, im Zuge der Entscheidungsfindung für mögliche risikomindernde Massnahmen, wird das Risiko monetarisiert und die Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten pro Jahr ermittelt. Die Kosten-Wirksamkeit ergibt sich aus dem Verhältnis Kosten dividiert durch die monetarisierte Risikominderung (Sicherheitsgewinn) mit Bezug auf den Ist-Zustand. Ist das Verhältnis kleiner als 1, so ist die Massnahme als kostenwirksam anzusehen, d.h., die risikomindernde Wirkung ist grösser als die Kosten. Bei der Monetarisierung sind Aspekte wie Grenzkosten pro gerettetes Leben, Aversion usw. entscheidend.

Weil das Todesfallrisiko für das Szenario Rauch-Rezirkulation vergleichsmässig gering ist und die möglichen passiven Massnahmen (z.B. Rauchtrennwand) relativ teuer sind, resultiert meist ein schlechtes Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis für bauliche Massnahmen zur Verhinderung der Rezirkulation.

4 CFD-Modellierung und Validierung

4.1 Vorgehensweise

Bevor numerische Simulationen auf praktische Aufgabenstellungen angewendet werden, muss der numerische Code validiert und verifiziert werden. Die Verifizierung besteht darin, die Richtigkeit des numerischen Codes auf seine konzeptuelle und mathematische Implementierung hin zu überprüfen im Vergleich mit genauen analytischen Lösungen. Die Validierung besteht in der Prüfung, ob die numerische Simulation mit der physikalischen Wirklichkeit übereinstimmt. Sie erfolgt oft durch den Vergleich des Modells mit experimentellen Ergebnissen.

Für das laufende Forschungsprojekt wurde der ANSYS-CFX-Kode (Ansys 2009) für die numerischen Simulationen gewählt. ANSYS CFX ist ein allgemeiner dreidimensionaler CFD-Kode, der gründlich für unterschiedlichste industrielle Anwendungen verifiziert wurde. Detaillierte Code-Verifizierungen von ANSYS CFX werden von verschiedenen Instituten und Organisationen durchgeführt, wie zum Beispiel ERCOFTAC (European Research Community on Flow and Turbulence and Combustion) und COST (European Cooperation in Science and Technologies). Ansys Ltd. hat eine Liste verschiedener Verifikationstests veröffentlicht, die von Ansys selbst und von verschiedenen unabhängigen gewerblichen und nicht gewerblichen Körperschaften durchgeführt wurden. Diese Verifikationsberichte können unter Ansys 2009 gefunden werden.

Im Verlauf dieses Forschungsprojekts wurde eine gründliche Validierung durchgeführt. Die intensive experimentelle Arbeit von H.O. Baumann (siehe Baumann 1979) wurde als Bezugsnorm für die CFD-Validierung herangezogen. Diese experimentelle Arbeit gilt vielerorts als Referenzarbeit in der Untersuchung der Phänomene zur Rezirkulation zwischen Tunnelportalen.

Die gesamte Validierung im Rahmen dieser Forschungsarbeit besteht aus vier Hauptschritten. In einem ersten Schritt wird die Gitterunabhängigkeit der Ergebnisse geprüft. Sobald ein Gitter erzeugt worden ist, das ein Optimum zwischen Robustheit und Genauigkeit ergibt, wird der zweite bestimmende Parameter, nämlich das Diskretisierungsschema, untersucht. Als folgender Schritt werden verschiedene Turbulenzmodelle verglichen. Sobald das passende Gitter, das passende Diskretisierungsschema und das passende Turbulenzmodell ausgewählt sind, wird ein experimenteller Fall aus Baumanns Arbeit ausgewählt, um die CFD-Simulationen zu validieren.

4.2 Experimenteller Aufbau von H.O. Baumann

H.O. Baumann benutzte ein Modell in der Skala 1:50 für seine experimentelle Arbeit. Eine Ablichtung des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 19 gezeigt.

Die zwei pferdehufförmigen, nebeneinander angeordneten Tunnelportale weisen eine Querschnittsfläche von 219.6 cm^2 und einen hydraulischen Durchmesser von 15.65 cm auf. Der Abstand zwischen den Tunnelröhren ist in allen Versuchen konstant auf 12.6 cm gehalten. Die Tunnellängen waren auf 10 hydraulische Durchmesser begrenzt, folglich mit einer Länge von je 156.5 cm . Am Ende eines jeden Tunnels war ein biegeweiches Rohr angeschlossen, gefolgt von einem mit einer Lochblende bestückten Messrohr. Am Ende einer jeden Rohrstränge befand sich ein mit Keilriemen angetriebener drehzahlvariabler Ventilator. Diese Ventilatoren konnten höchstens $0.14 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ einblasen bzw. absaugen, folglich eine maximale Luftgeschwindigkeit von $6.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in den Tunnelröhren ermöglichend. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 20 gegeben.

Als Tracergas zur Messung der Rezirkulation von einem Portal zum anderen wurde Kohlenmonoxid (CO) verwendet. Das Kohlenmonoxid wurde unmittelbar stromabwärts des blasenden Ventilators in den Luftstrom eingespeist und einen hydraulischen Durchmesser stromaufwärts des Austrittsportals abgezapft und gemessen. Die Menge an CO, die

durch das Eintrittsportal eintrat, wurde 9 hydraulische Durchmesser stromabwärts des Eintrittsportals gemessen.

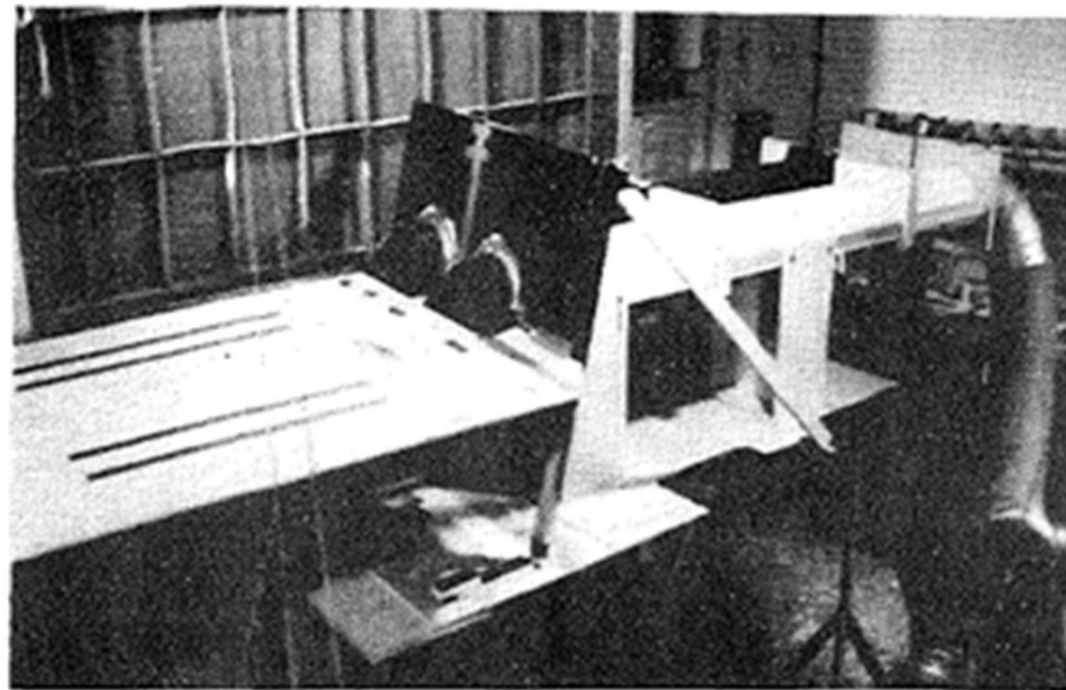


Abbildung 19: Ablichtung des Versuchsaufbaus von Baumanns Experimenten (Quelle: Baumann 1979)

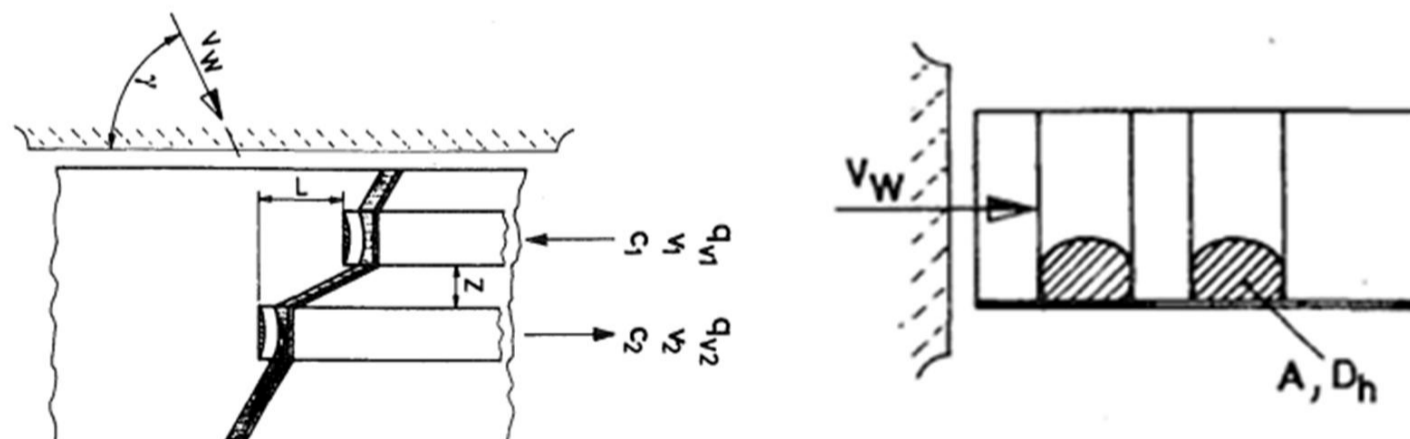
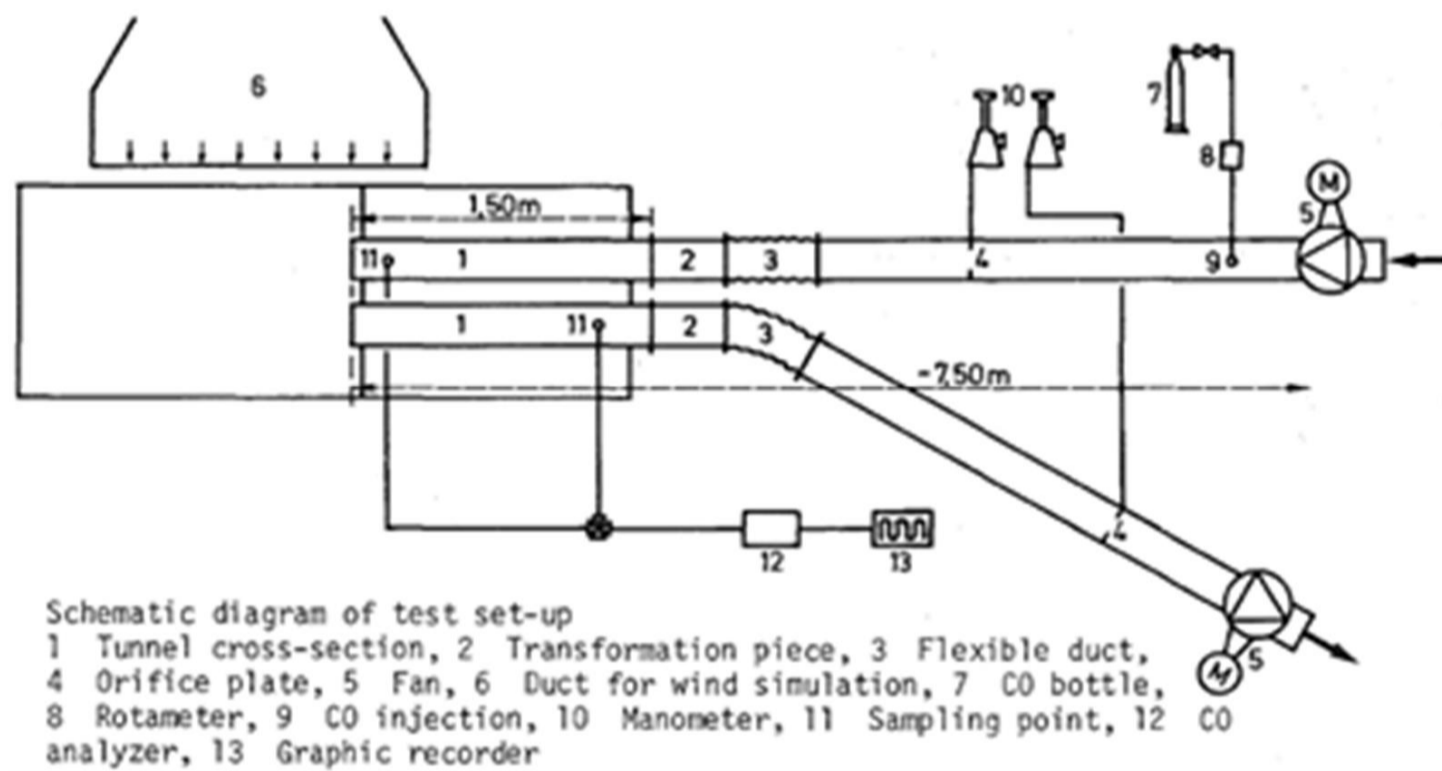


Abbildung 20: Schematischer Versuchsaufbau von Baumanns Experimenten (Quelle: Baumann 1979)

Die Wirkung des Umgebungswindes wurde mit einem grossen Radiallüfter mit Auslassöffnung von 1.8 x 1.4 m modelliert. Im Auslass wurde ein gleichförmiges Geschwin-

digkeitsprofil mit einem System von Leitblechen und Drahtgittern erzeugt.

Baumann führte eine Reihe von Versuchen durch, indem er die Windstärke, die Windrichtung, die topographische Umgebung (z.B. Ebene, Hügel, Brücke usw.), den Portalversatz und die Strömungsgeschwindigkeiten in den Tunneln veränderte. Seine Versuche berücksichtigten jedoch den Einfluss einer Trennwand zwischen zwei parallelen Tunneln nicht. Er führte diese Versuche sowohl für parallele als auch für aufeinanderfolgende Tunnel durch.

4.3 Das CFD-Modell

Die CFD-Modellierung wurde mit dem CFD-Kode ANSYS CFX V.12.1 durchgeführt. ANSYS CFX ist ein verifizierter und gut validierter allgemein anwendbarer gewerblicher CFD-Kode, entwickelt von Ansys Inc. (vgl. Ansys 2009).

4.3.1 Das Berechnungsgebiet

Das Berechnungsgebiet wird als das modellierte geometrische Volumen definiert, das in einer numerischen CFD-Studie untersucht wird. Für die CFD-Validierung als Teil des laufenden Forschungsprojekts wurde ein Berechnungsgebiet definiert, das dem Versuchsaufbau nach Baumann (1979) entspricht (vgl. Kapitel 4.2). In dieser Validierungsstudie wurde nur der Fall paralleler Tunnelröhren ohne Portalversatz verwendet, und dieser wird in den folgenden Absätzen erklärt.

Die COST-Richtlinien (COST 2007) wurden herangezogen, um die fehlenden Informationen aus Baumanns Versuchen zu ergänzen, wie die Ausdehnung des Berechnungsgebiets in seitlicher und senkrechter Richtung. Diese Abmessungen sind in atmosphärischen CFD-Berechnungen erforderlich, um die Fernfeldrandbedingungen zu setzen (Ein- und Auslässe). Die Lage des Radialgebläses für die Windsimulation fehlt in der Beschreibung des Versuchsaufbaus und wurde auf 40 cm Entfernung vom Eintrittstunnel geschätzt. Diese Schätzung beruht auf den verfügbaren Schemata und Fotografien (vgl. Baumann 1979). Das Berechnungsgebiet, das für die Validierung verwendet wurde, ist in der Abbildung 21 abgebildet.

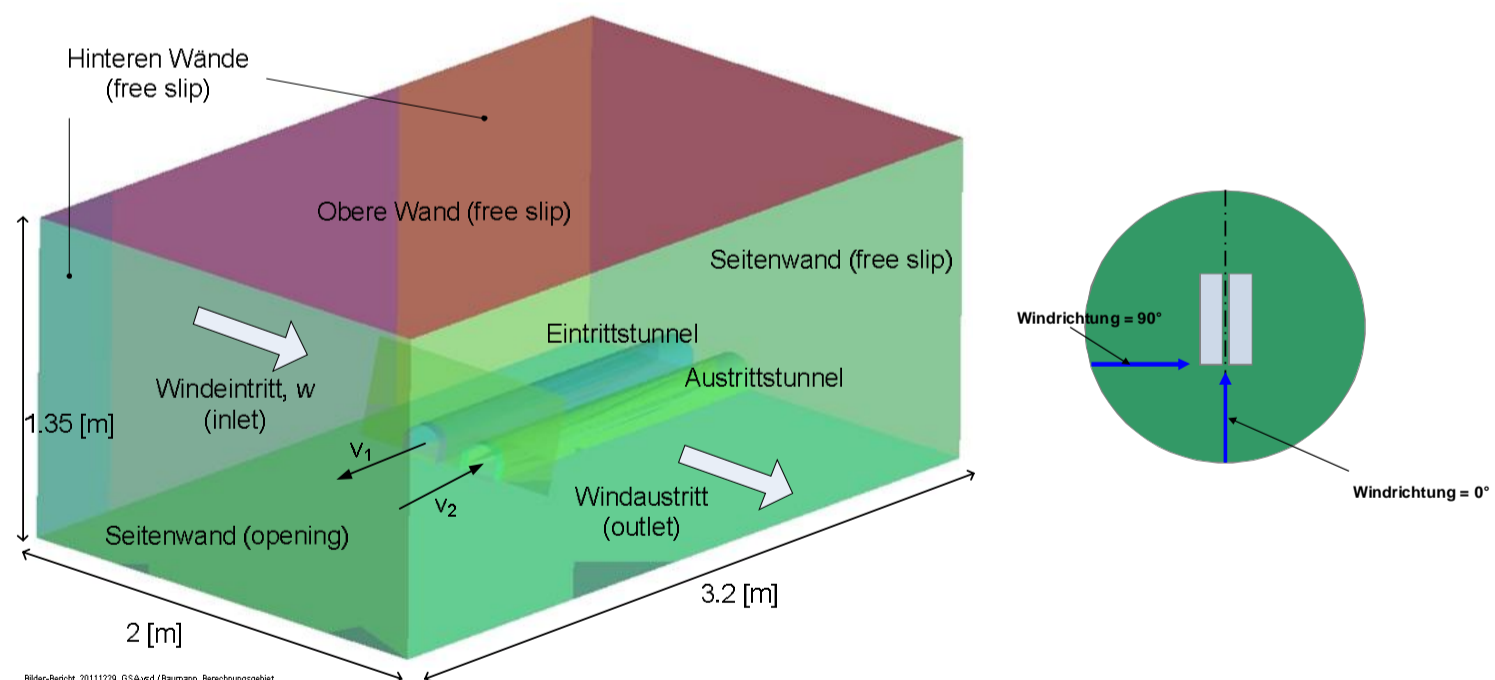


Abbildung 21: Berechnungsgebiet für die Validierung des CFD-Modells

Da die gesamte Versuchskammer nicht in CFD modelliert werden kann, bildet das Berechnungsgebiet ein Untergebiet der Versuchskammer. Alle Seitenwände und die obere Wand des Bereichs sind gedachte Wände in der Luft. An der oberen Wand, einer Seitenwand und der hinteren Wand werden Gleitbedingungen angewendet, sodass die Geschwindigkeitskomponente der Luft normal zu diesen Wänden und die Schubspannung an der Wand verschwinden. Die Seitenwand stromabwärts des Eintrittstunnels wird als Öffnung modelliert, um gleichzeitiges Ein- und Ausströmen durch die Wand in Abhängig-

keit der Strömungsbedingungen zuzulassen. Der Boden wird als glatte Wand modelliert ohne Rauigkeiten, aber mit einer Haftbedingung, die null Strömungsgeschwindigkeit auf der Zellengrenze erzwingt, die auf der Oberfläche anliegt.

4.3.2 Das Gitter

Das Berechnungsgebiet ist in kleine Zellen mit endlichem Volumen eingeteilt. Dieser Vorgang, ein stetiges Berechnungsgebiet in kleine Zellen aufzuteilen, wird Gittererzeugung genannt. Die Transportgleichungen der Strömung werden dann iterativ in diesen Zellen gelöst, bis eine konvergierte Lösung erreicht wird. Um über die Qualität der Ergebnisse sicher zu sein, ist eine Gitterunabhängigkeitsstudie erforderlich. Eine solche Studie muss zeigen, dass die erhaltenen Ergebnisse nicht von der räumlichen Diskretisierung abhängen. Ferner kann eine Gitterunabhängigkeitsstudie dazu beitragen, ein Gitter zu finden, das die notwendige Ausgewogenheit zwischen Robustheit der Berechnung und Genauigkeit der Ergebnisse aufweist: Unnötig grosse Gitter, die erhebliche Rechenkapazität erfordern, werden in der Studie ausgeschieden und durch relativ kleinere Gitter ersetzt, die für sehr ähnliche Ergebnisse weniger Rechenkapazität binden.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde eine Gitterunabhängigkeitsstudie für das Berechnungsmodell des Versuchaufbaus von Baumann mit den folgenden Randbedingungen durchgeführt:

- Windstärke in der Umgebung: 1 m/s
- Luftgeschwindigkeit aus dem Eintrittstunnel: 1 m/s
- Luftgeschwindigkeit aus dem Austrittstunnel: 1 m/s
- Windrichtung: 90° (Querwind zum Tunnelportal)

Die Gitterunabhängigkeitsstudie wurde mit dem Standardturbulenzmodell in ANSYS CFX durchgeführt. Dies ist das Scherspannungstransportmodell (Shear Stress Transport, SST). Drei hexaedrische Gitter verschiedener Grösse wurden hinsichtlich der Rezirkulation untersucht (vgl. Abbildung 22). Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in Tabelle 15 dargestellt.

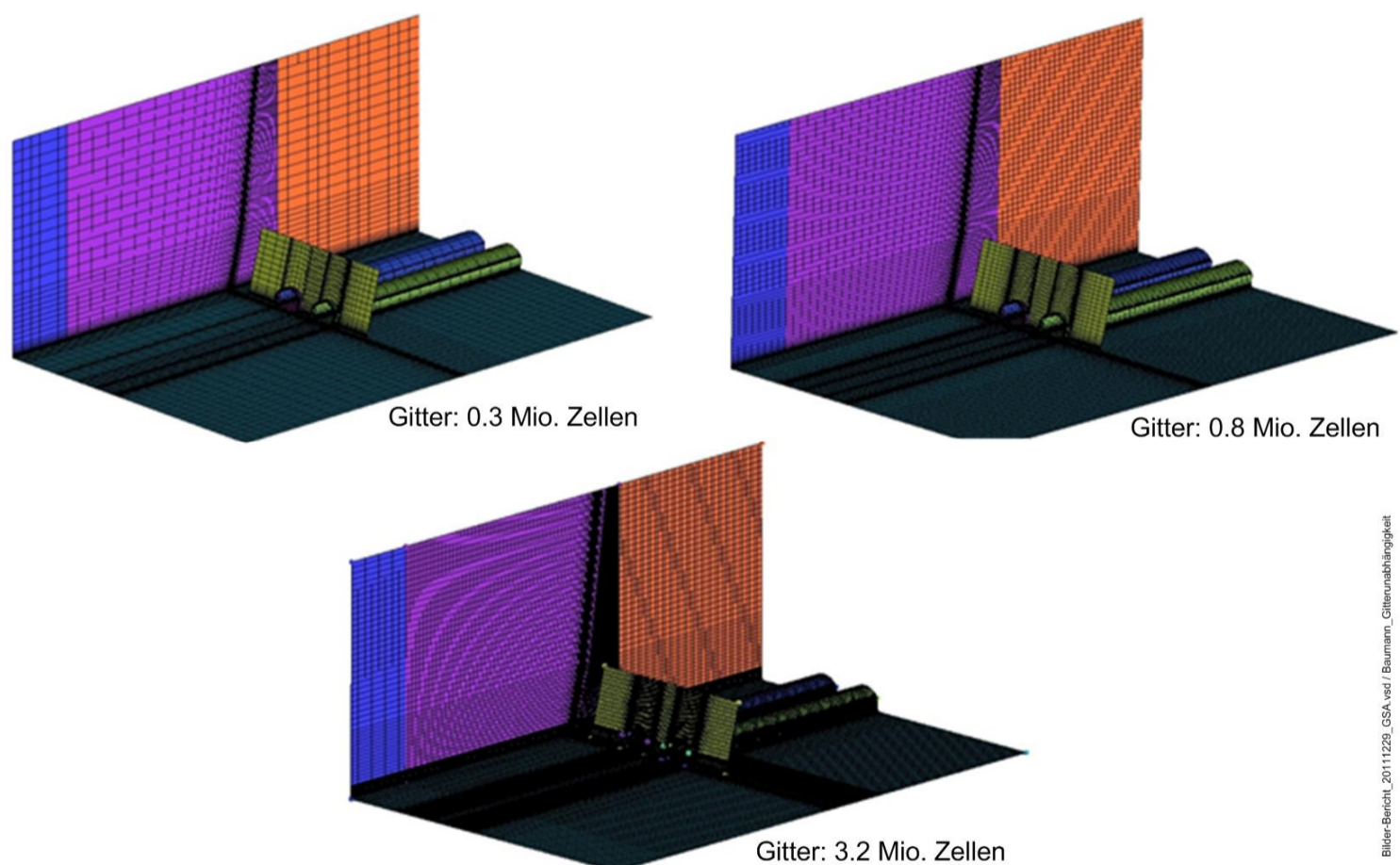


Abbildung 22: Verschiedene Gitter für die Gitterunabhängigkeitsstudie, mit 0.3, 0.8 und 3.2 Millionen Zellen

Anzahl Zellen [Mio]	Konzentrationsverhältnis, c_2/c_1	
	Simulation	Experimenteller Wert
0.3	0.608	0.360
0.8	0.355	
3.2	0.365	

Tabella 15: Ergebnisse der Simulationen mit 3 verschiedenen Gittern

Die Ergebnisse zeigen, dass der Unterschied zwischen den Gittern mit 0.8 und 3.2 Millionen Zellen nicht besonders gross ist im Vergleich zur Gittergrösse und der Berechnungskapazität. Als Ergebnis der Gitterunabhängigkeitsstudie wurde das Gitter mit 0.8 Millionen Zellen für den weiteren Validierungsprozess gewählt.

4.3.3 Die Diskretisierung

Reibungsbehaftete Strömungen werden durch die sogenannten Navier-Stokes-Gleichungen beschrieben. Diese sind partielle Differentialgleichungen, die in passende algebraische Gleichungen umgeschrieben werden müssen, um mit dem Computer gelöst werden zu können. Diese Umrechnung bzw. die algebraischen Gleichungen unterliegen Rundungsfehlern. Es gibt zahlreiche Methoden, die verwendet werden, um die Navier-Stokes-Gleichungen zu diskretisieren. ANSYS CFX lässt folgende Methoden zu: erste Ordnung upwind (first order upwind), zweite Ordnung und eine Mischung aus beiden Methoden mit einem dem Programm eigenen Mischfaktor. Diese Mischung wird in der Terminologie von ANSYS CFX „höhere Ordnung“ genannt. ANSYS erlaubt es, für verschiedene Variablen und Transportgleichungen (Masse, Impuls und Energie) unterschiedliche Diskretisierungsschemata anzuwenden.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Diskretisierungsschemata am ausgewählten Gitter von 0.8 Mio. Zellen ausprobiert. Die Ergebnisse des numerischen Berechnungsmodells wurden mit den experimentellen Ergebnissen von Baumann verglichen für folgende Randbedingungen:

- Windstärke in der Umgebung: 1 m/s
- Luftgeschwindigkeit aus dem Eintrittstunnel: 1 m/s
- Luftgeschwindigkeit aus dem Austrittstunnel: 1 m/s
- Windrichtung: 90° (Seitenwind zum Tunnelportal)

Die Ergebnisse von 20 Simulationen mit Diskretisierungen der ersten Ordnung, der zweiten Ordnung (hochauflösend) und einer Mischung aus der zweiten Ordnung für das Strömungsfeld und der ersten Ordnung für den Massenanteil an CO werden in der Abbildung 23 gezeigt. Darin ist eine Kurve für die experimentellen Werte aufgezeichnet, um einen festen Vergleich mit den Ergebnissen aufstellen zu können.

Von einem numerischen Standpunkt müsste ein konvergiertes hoch auflösendes Schema genauere Ergebnisse liefern als das Ergebnis erster Ordnung. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass eine hohe Auflösung für das Strömungsfeld und eine Auflösung erster Ordnung für den Massenanteil von CO im Vergleich mit den Experimenten bessere Ergebnisse liefern als die Simulationen höherer Ordnung. Die Ergebnisse zeigen ferner, dass mit steigender Ordnung der Diskretisierung die CO-Konzentrationen im Vergleich zur Diskretisierung erster Ordnung stufenweise ansteigen.

Es wurden keine Änderungen der Ergebnisse festgestellt, auch nicht nach Anpassung einiger numerischer Parameter der Simulation, die nicht mit dem Diskretisierungsschema zusammenhängen. Es gibt zwei mögliche Erklärungen für diese Tendenz:

1. Die Messungen während Baumanns Versuchen im Jahr 1979 waren ungenau, enthalten Messfehler oder unterlagen Strömungseinflüssen der Umgebung, die nicht messbar waren.
2. Die fehlenden Informationen über den Versuchsaufbau, die für das CFD-Modell geschätzt wurden, haben einen Einfluss auf die Ergebnisse.

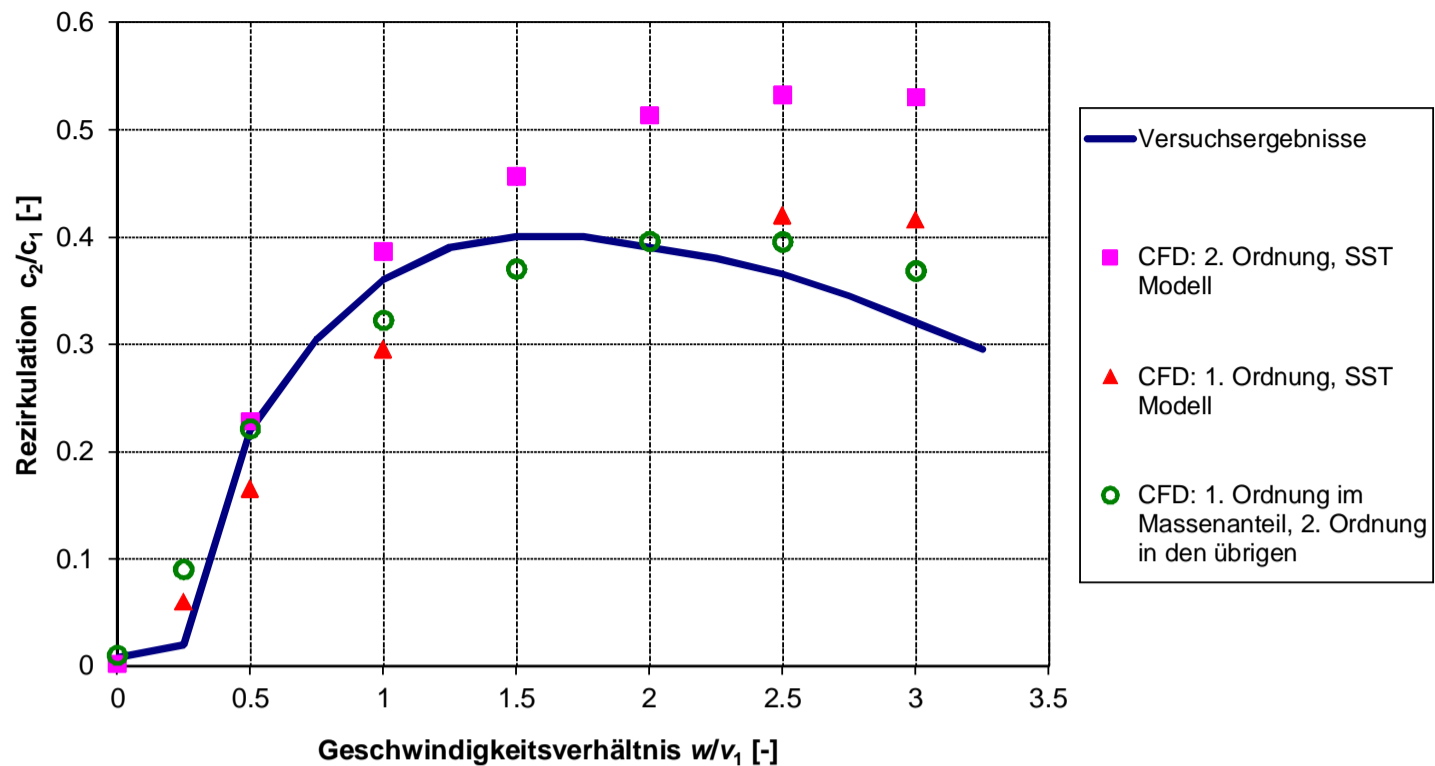


Abbildung 23: Ergebnisse der Simulationen mit verschiedenen Diskretisierungen im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen von Baumann für den Fall $w = 1 \text{ m/s}$, $v_1 = 1 \text{ m/s}$, $v_2 = 1 \text{ m/s}$ und 90° Windrichtung. Zweite Ordnung für das Strömungsfeld und erste Ordnung für den CO-Massenanteil entsprechen den Versuchsergebnissen am besten.

In Anbetracht der Ergebnisse und trotz der Unterschiede zwischen den Ergebnissen und dem Experiment (ca. 40 % zwischen Versuch und hoch auflösenden Simulationen und ca. 11 % zwischen Versuch und Simulationen mit der Mischung aus erster und höherer Ordnung) wurde entschieden, weitere Validierungen mit einer Diskretisierung höherer Ordnung für das Strömungsfeld und erster Ordnung für den CO-Massenanteil vorzunehmen.

Diese Ergebnisse wurden dem Entwickler der CFD-Kodes mitgeteilt, um seine Meinung darüber und Ratschläge zu einer möglichen numerischen Bewandnis, die für die Autoren in diesem Projektstadium nicht absehbar waren, zu erfragen. Nach ihrer Meinung haben die Unterschiede keine numerische Ursache; das Turbulenzmodell ist bewährt und das Schema 2. Ordnung nachweislich besser als die anderen Schemata. Sie vermuten die Unterschiede in der mangelnden Kenntnis über den experimentellen Aufbau und mögliche Mängel an den Messergebnissen bzw. den Messgeräten.

4.3.4 Das Turbulenzmodell

Die Fluktuationen der Geschwindigkeit in der Strömung in Raum und Zeit werden mathematisch mittels Turbulenzmodellen erfasst, um ein Strömungsproblem zu lösen, das sonst riesige Rechenkapazitäten erfordern würde.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurden zwei Turbulenzmodelle verglichen, nämlich das SST- und das $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell. Für das gegebene Gitter zeigten beide Modelle wenige Abweichungen voneinander. Auf der Grundlage der Empfehlungen des Kodeentwicklers wurde das SST-Turbulenzmodell für die weiteren Validierungen angewendet. Das SST-Turbulenzmodell, das in ANSYS CFX implementiert wurde, vereint die Vorteile des $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodells (vorteilhaft für freie Strömungen) und des $k-\omega$ -Turbulenzmodells (vorteilhaft für Grenzschichtströmungen). Der einzige Nachteil ist eine leicht gesteigerte Rechenleistung verglichen mit dem $k-\varepsilon$ -Turbulenzmodell. Infolge der verhältnismässig niedrigen Anzahl von Simulationsdurchläufen während der Validierung spielt der Aspekt der gesteigerten Rechenleistung im Zusammenhang mit dem Turbulenzmodell eine untergeordnete Rolle.

4.4 Die Validierung

H.O. Baumann führte verschiedene Versuche zur Untersuchung der Wirkung der Windrichtung und -geschwindigkeit auf den Strömungskurzschluss zwischen Tunnelportalen durch. Das gleiche Phänomen wurde mittels CFD-Simulationen für verschiedene Windrichtungen und eine bestimmte Anzahl Tunnel- zu Windstärkeverhältnissen untersucht. Die Arbeit von Baumann (1979) wird als Bezugsnorm für die CFD-Validierung herangezogen. Der geometrische Versuchsaufbau wurde in den Simulationen nachgebildet. Fehlende Informationen wurden aus den Fotografien und Skizzen der publizierten Arbeit geschätzt. Nur die Konfiguration ohne Portalversatz wurde in der Validierung untersucht. Als Tracergas verwendete H.O. Baumann Kohlenmonoxyd (CO); er machte aber keine Angaben über die Mengen. Für die CFD-Simulationen wurde ein Massenanteil der CO-Konzentration zur Luft von 0.3 angesetzt. Es wurde eine isotherme Strömungsbedingung simuliert.

Die Ergebnisse der Validierung im Vergleich mit Versuchsergebnissen sind in der Abbildung 24 dargestellt.

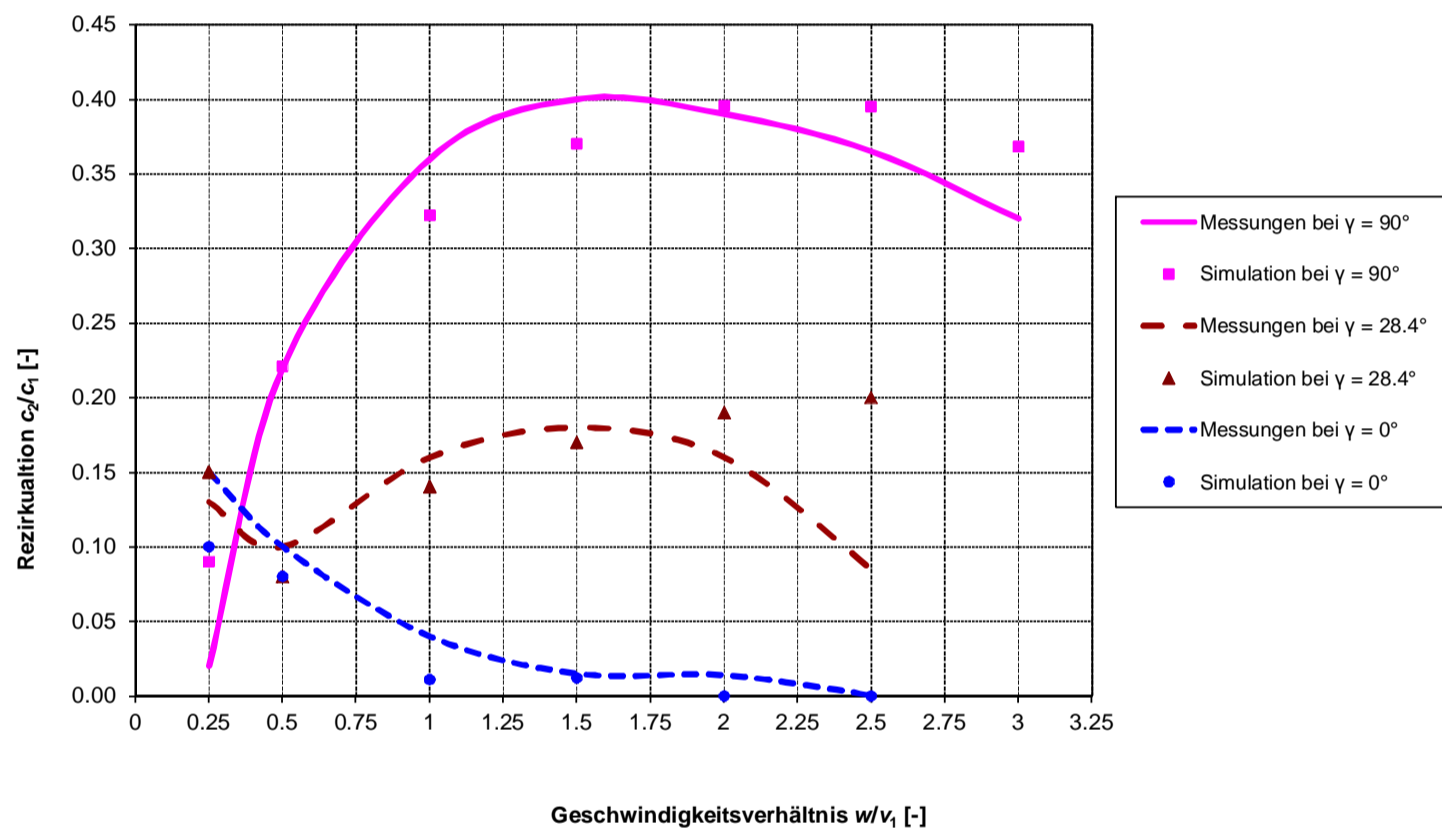


Abbildung 24: Ergebnisse der CFD-Validierungsstudie

In der Regel stimmen die CFD-Ergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen gut überein. Der Unterschied kann

- nicht dokumentierten Randbedingungen und
 - Effekten, die in den Versuchen auftraten und in der CFD-Modellierung und Simulation nicht berücksichtigt werden konnten
- zugeschrieben werden.

5 Portal-Portal-Rezirkulation

5.1 Einleitung

Die Lüftung in Strassentunneln im Normal- und Ereignisbetrieb wurde in Kapitel 2.3 beschrieben und diskutiert; die Bedingungen für Rauchaustritt an Portalen wurde in Kapitel 0 beschrieben.

Die Ausbreitung von Schadstoffen und von Rauch vom Portal in die Umgebung ist von den lokalen meteorologischen Bedingungen (Windrichtung und Stärke, Temperaturdifferenzen Tunnelluft und Umgebung, atmosphärische Stabilität usw.) und den lokalen geometrischen und orographischen Verhältnissen (Bodenbeschaffenheit, Vorhandensein oder Fehlen von konstruktiven Elementen wie Gebäude und Mauern, Hanglagen usw.) abhängig. Es besteht in vielen Fällen die Möglichkeit, dass ein Teil der austretenden Strömung aus der einen Röhre auf das Portal der Gegenröhre oder des Sicherheitsstollens einwirkt, wodurch im Normalbetrieb die Schadstoffkonzentration in der Gegenröhre ansteigt und im Ereignisbetrieb die Sicherheit der Tunnelnutzer in dieser Röhre oder im Sicherheitsstollen beeinträchtigt wird, wenn dies nicht unterbunden wird.

Bei einem Brandereignis besteht dieser Strömungskurzschluss in der Regel nur während der ersten Brandminuten bis zur vollen Wirksamkeit der Ereignislüftung und zur Strömungsumkehr in der Gegenröhre. In folgenden Fällen bleibt dieser Strömungskurzschluss länger oder sogar dauerhaft bestehen:

1. im Normalbetrieb;
2. bei kurzen Tunneln ohne Lüftungssystem;
3. bei der Freisetzung von (giftigen) Gasen ohne Wärmeentwicklung (Kaltbrand).

Im vorliegenden Forschungsprojekt werden von den bestimmenden meteorologischen Bedingungen nur die Windrichtung und -stärke und von den lokalen geometrischen und orographischen Verhältnissen nur die Länge der Trennwand und der Portalversatz parametrisch mittels numerischen dreidimensionalen Strömungssimulationen (Englisch: CFD, Computational Fluid Dynamics) untersucht. Das in dieser Studie angewendete CFD-Modell, die unterschiedlichen Randbedingungen, Parameter und Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

5.2 Das CFD-Modell

Die CFD-Modellierung wurde mit dem CFD-Kode ANSYS CFX V.13.0 durchgeführt. ANSYS CFX ist ein verifizierter und gut validierter allgemein anwendbarer gewerblicher CFD-Kode, entwickelt von Ansys Inc. (Ansys 2009).

5.2.1 Das Berechnungsgebiet

Das Berechnungsgebiet wird als das modellierte geometrische Volumen definiert, das mittels CFD untersucht wird. Das Berechnungsgebiet wird als ein Zylinder mit senkrechter Achse, 500 m Durchmesser und 500 m Höhe definiert. Diese Abmessungen werden aufgrund verschiedener Empfehlungen aus der Literatur, wie zum Beispiel COST (2007), so gewählt, um jegliche Interferenz zwischen den Rändern des Gebiets (die Fernfeldströmung, hier der Wind) und der untersuchten Zone (Tunnelportale und nähere Umgebung) zu vermeiden.

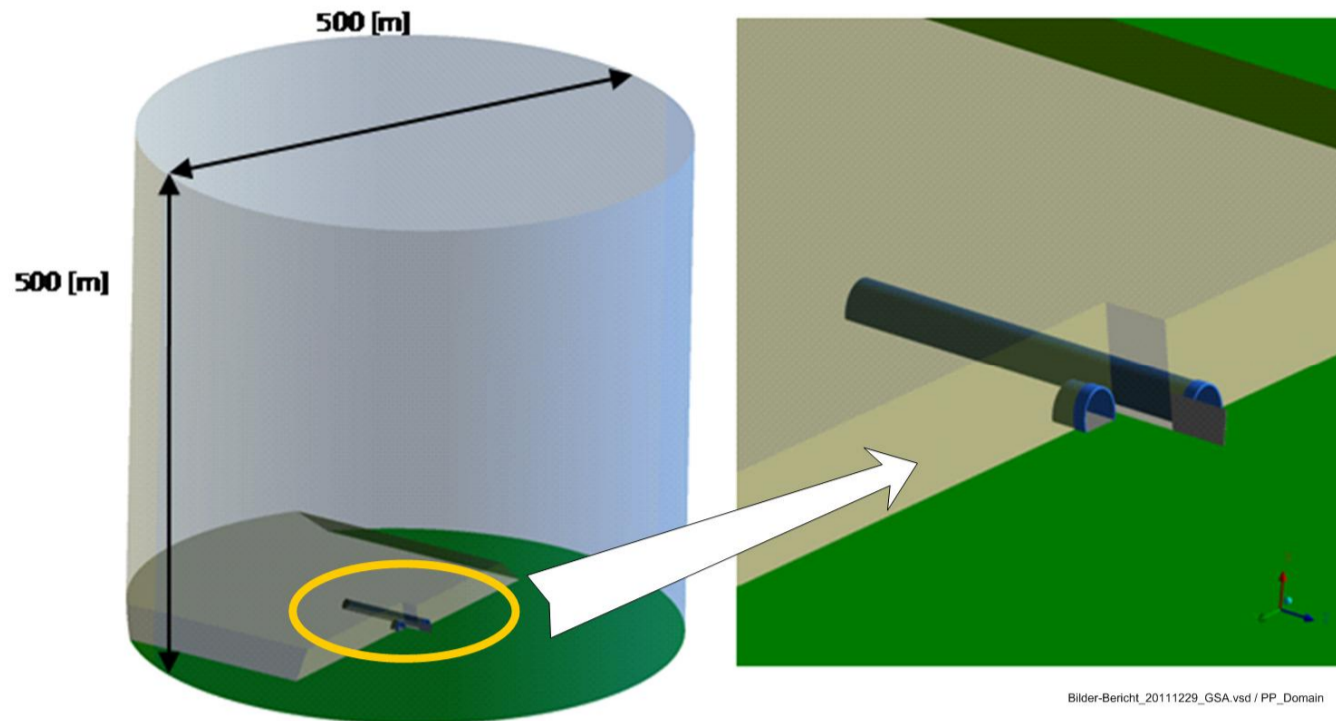


Abbildung 25: Form und Abmessungen des Berechnungsgebiets für die Parameterstudie Kamin-Portal

5.2.2 Das Gitter

Das Berechnungsgebiet ist in kleine Zellen mit endlichem Volumen eingeteilt. Dieser Vorgang, ein stetiges Berechnungsgebiet in kleine Zellen aufzuteilen, wird Gittererzeugung genannt. Die Transportgleichungen der Strömung werden dann iterativ in diesen Zellen gelöst, bis eine konvergierte Lösung erreicht wird. Als allgemeine Faustregel sollte der innere, untersuchte Bereich so detailliert wie möglich abgebildet werden. Das erfordert ein feines Gitter in diesem Bereich. Die Abbildung 26 zeigt ein Beispiel eines Gitters, das mittels des ANSYS-CFX-Gittererzeugungsprogramms (vgl. Ansys 2009) erzeugt wurde. Die Portalumgebung ist feiner aufgelöst, mit Zellen ab 0.1 cm Grösse, als das Fernfeld, das mit Zellen bis zu 17 m Grösse aufgelöst ist. Eine sanfte Wachstumsrate der Zellgrösse vom inneren Gitterbereich zu den umgebenden, gröberen Gitterbereichen bestimmt sehr oft die Qualität des gesamten Gitters; in der vorliegenden Studie wurde diese auf 1.1 in Übereinstimmung mit der Richtlinie VSWKI (2011) festgelegt. An den Wänden ist das Gitter im Gegensatz zum übrigen Bereich zusätzlich sehr fein aufgelöst; die Wandregionen sind mit rechteckigen Zellschichten (prism layers) aufgelöst; mit deren Hilfe können die durch steile Strömungsgradienten verursachten Strömungsphänomene wie turbulente Grenzschichten und Nachlaufströmungen erfasst werden.

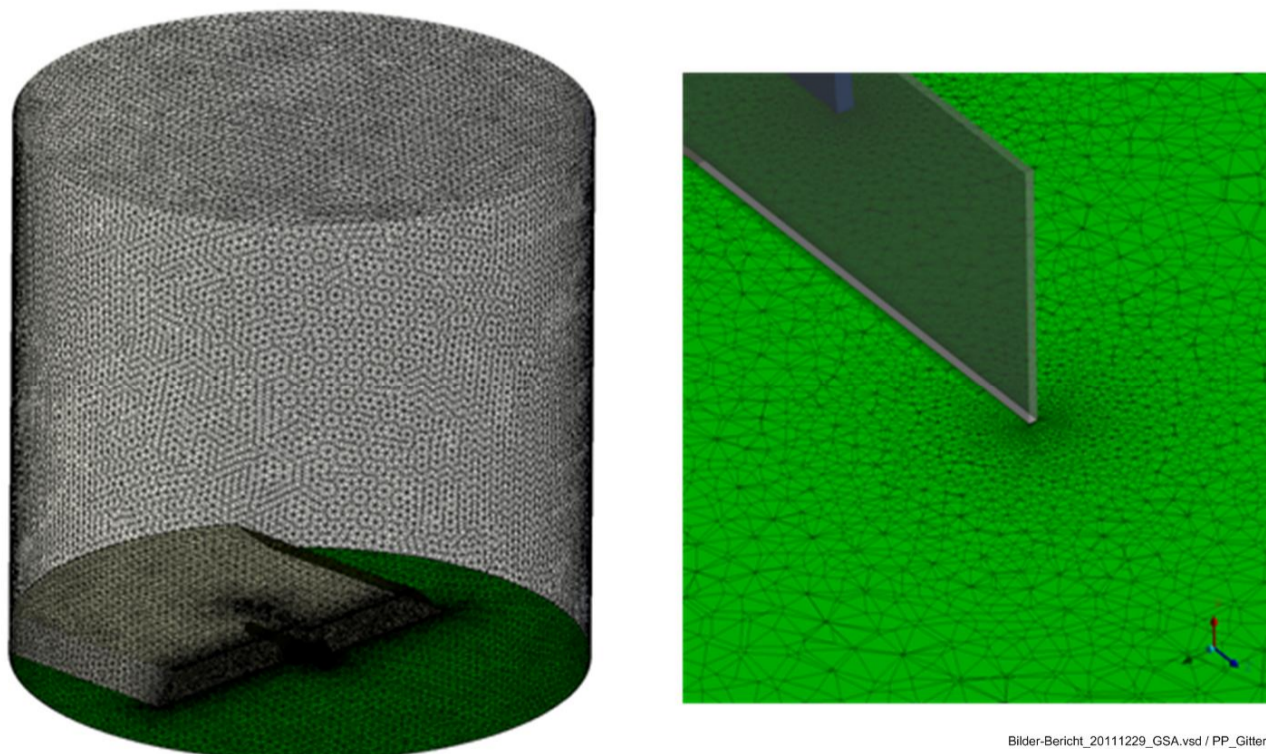


Abbildung 26: Gitterabstufung im Berechnungsgebiet für die Parameterstudie Portal-Portal

Um die Ergebnisqualität zu garantieren, muss der Einfluss des Gitters untersucht werden, bevor die parametrischen Studien durchgeführt werden. Dabei geht es darum, den Einfluss der Feinheit des Gitters und der Zellenwachstumsrate usw. auf das Ergebnis zu untersuchen. Für diese Gitterunabhängigkeitsstudie wurden drei Gitter für eine Portalkonfiguration ohne Trennwand mit parallelen Portalen ohne Portalversatz, bei Windstärke $w = 5 \text{ m/s}$ auf 10 m über Grund und Windrichtung $\alpha = 30^\circ$ erzeugt. Das Windprofil ist mit einem logarithmischen Ansatz modelliert (vgl. Aynsley et al. 1977); die Windrichtung ist ab der Normalen zur Tunnelachse gemessen. Die Einströmungsgeschwindigkeit in den Tunnel v_2 ist auf $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ festgelegt, die Ausströmungsgeschwindigkeit auf v_1 auf $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Um die Ergebnisse zu vergleichen, wird das Konzentrationsverhältnis c_2/c_1 des Rauchs am Eintritts- (c_2) und Austrittsportal (c_1) (vgl. Kapitel 2.2.7) herangezogen. Der Rauch wird als eine skalare Variable simuliert.

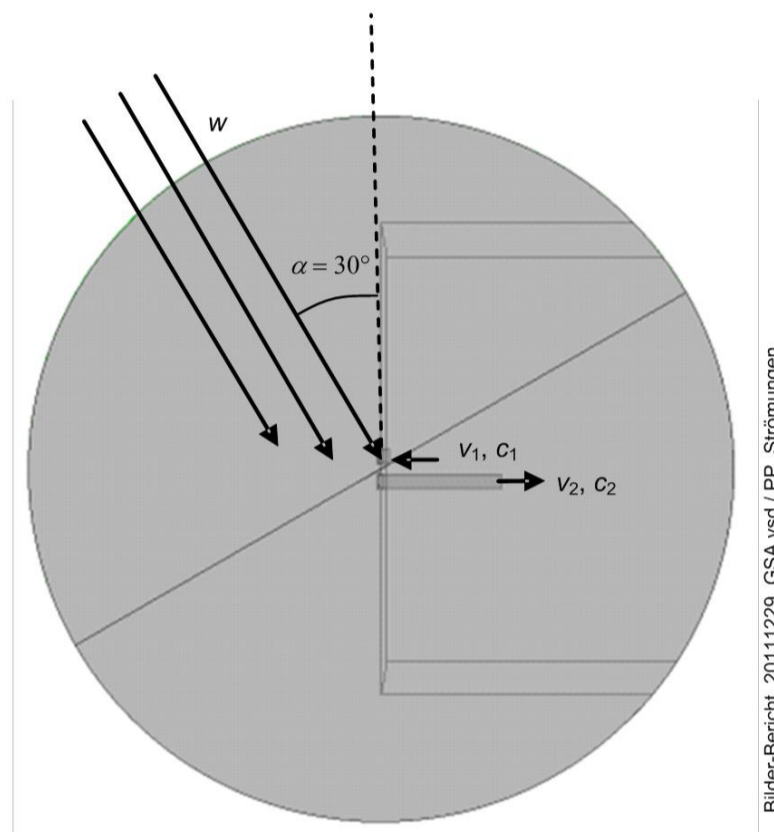


Abbildung 27: Modellbeschreibung der Gitterunabhängigkeitsstudie für das Portal-Portal-Gitter

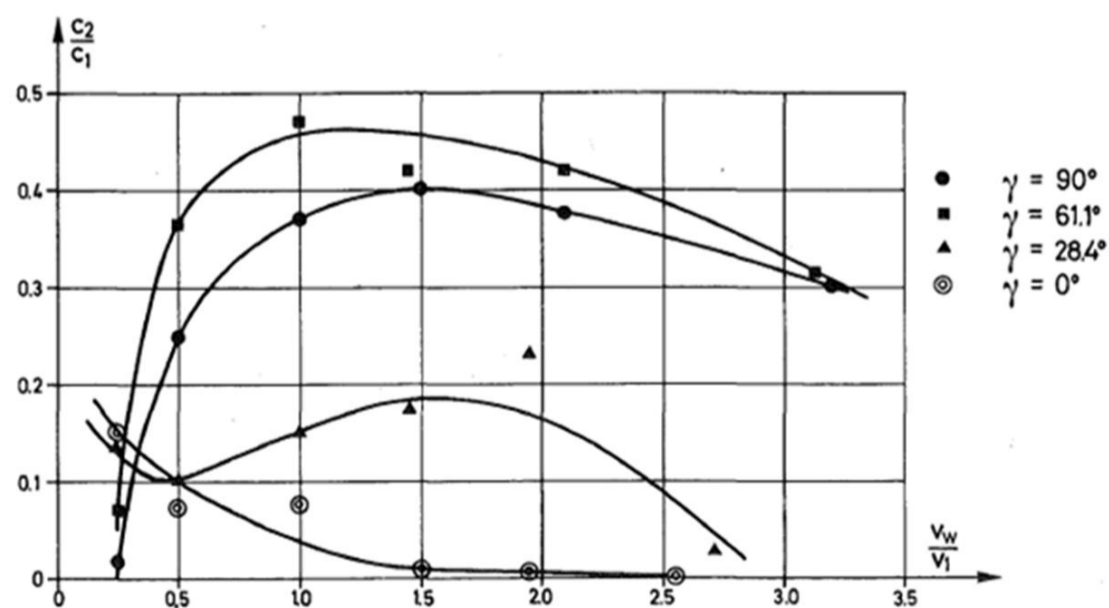


Abbildung 28: Portal-Portal-Rezirkulation in parallelen Tunneln ohne Portalversatz: Experimentelle Ergebnisse von Baumann (1979) für verschiedene Werte der Windstärke w/v_1 und der Windrichtung γ . Merke, dass Baumann die Windrichtung anders definiert als die vorliegende Studie: Es besteht zwischen γ und α die Beziehung $\gamma = 90^\circ - \alpha$.

Die Ergebnisse sind wegen unterschiedlicher Randbedingungen nicht unmittelbar mit der Arbeit von Baumann (1979, vgl. Kapitel 4.2) vergleichbar; z.B. sind die Verhältnisse w/v_1 und v_2/v_1 nicht identisch und die Skala der Modelle ist unterschiedlich. Nichtsdestotrotz geben die Ergebnisse von Baumann einen Erwartungswert der Rezirkulation in einer solchen Konfiguration, ungefähr 50 % (vgl. Abbildung 28).

Die Ergebnisse der Gitterunabhängigkeitsstudie sind in Abbildung 29 dargestellt. Daraus wird deutlich, dass Gitter B und C fast die gleichen Ergebnisse liefern, sodass das kleinere Gitter B ausreichen würde. Da aber die parametrische Studie verschiedenste geometrische Konfigurationen bzgl. Portalversatz und Trennwandlänge abdeckt, wurde entschieden, trotz höherer Rechenzeit das Gitter C zu verwenden, um somit mögliche gitterbedingte Effekte zu vermeiden.

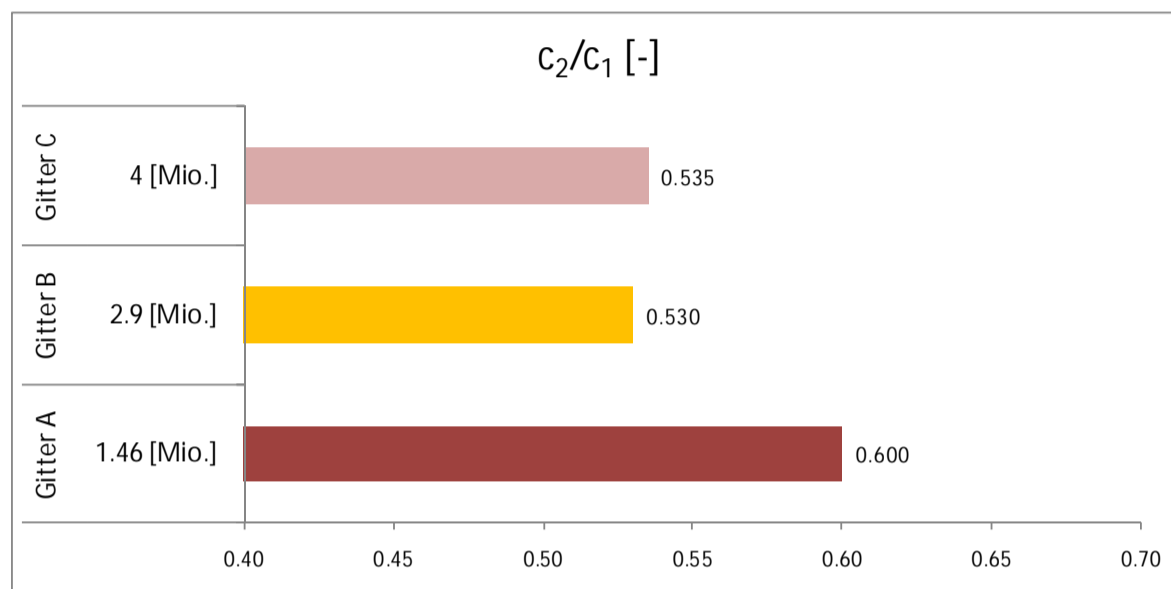


Abbildung 29: Ergebnis der Gitterunabhängigkeitsstudie der Parameterstudie Portal-Portal-Rezirkulation

Die vorliegende Studie enthält 238 unterschiedliche Fälle und 50 unterschiedliche Gitter. Wie bereits erklärt, wurden alle Gitter mit den Parametern für Gitter C generiert. Diese Parameter sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Grösste Zellfläche [m]	Kleinste Zellfläche [m]	Grösstes Zellvolumen [m ³]	Zellwachstumsrate [-]	Anzahl Zellen [Mio.]
8.65	0.08	17.3	1.1	4

Tabelle 16: Gitterparameter für das Gitter C der Parameterstudie Portal-Portal-Rezirkulation

Auf der Grundlage dieser Gitterparameter beträgt die Gittergrösse der verschiedenen Gitter zwischen 4 und 5 Millionen Zellen.

5.2.3 Die Simulationsparameter und Randbedingungen

Da sich die geometrischen und meteorologischen Bedingungen von Tunnel zu Tunnel grundlegend ändern können, liegt der Fokus dieser Studie auf der Untersuchung der die Rezirkulation von Portal zu Portal beeinflussenden Faktoren und dem Vergleich mit verschiedenen geometrischen und meteorologischen Bedingungen. Infolge der Kosten der Simulation und der finanziellen und zeitlichen Begrenzungen können nicht alle geometrischen und meteorologischen Faktoren und deren Kombinationen in das Simulationssystem integriert werden. Es werden daher nur die folgenden vier als einflussreichste Faktoren erkannte Variablen berücksichtigt:

- die Windstärke $w \in \{0.1, 1.0, 2.0, 5.0\} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- die Windrichtung $\alpha \in \{0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ\}$, gemessen ab der Ebene normal zur Tunnelachse;
- die Länge der Trennwand $l_w \in \{0, 10, 20, 30, 50\} \text{ m}$;

- der Portalversatz $l_p \in \{-100, -50, 0, 15, 30\}$ m.

Die untersuchten geometrischen Konfigurationen sind in Tabelle 17 dokumentiert.

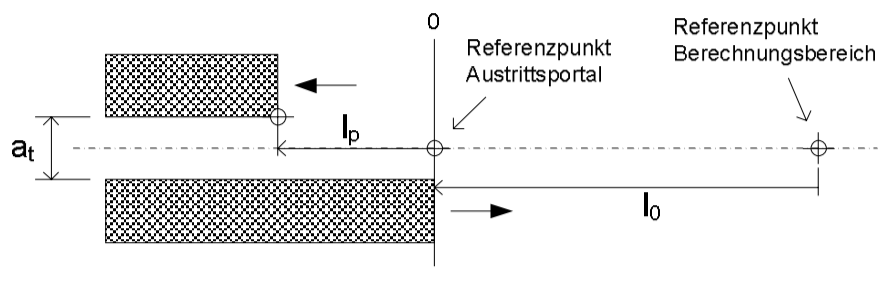
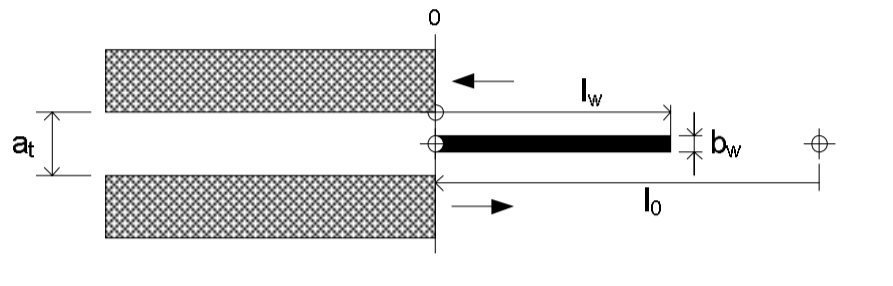
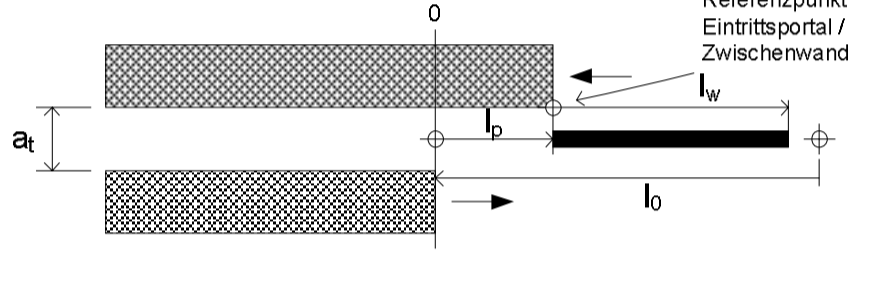
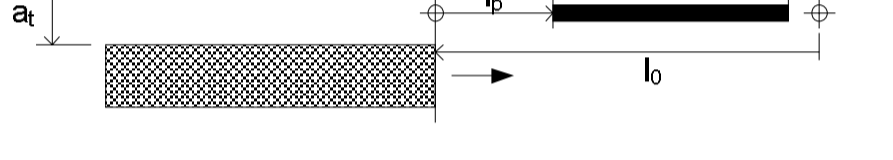
Konfiguration	Skizze	Parameterwerte
1		$l_0 = 0$ $l_p = \{-100, -50\}$ m $a_t = 7.1$ m
2		$l_0 = 0$ $l_p = 0$ m $l_w = \{0, 10, 20, 30, 50\}$ m $a_t = 7.1$ m $b_w = 0.2$ m
3		$l_0 = 0, l_p = 15$ m $l_w = \{0, 10, 20, 30\}$ m $a_t = 7.1$ m $b_w = 0.2$ m
4		$l_0 = 0, l_p = 30$ m $l_w = \{0, 10, 20\}$ m $a_t = 7.1$ m $b_w = 0.2$ m

Tabelle 17: Geometrische Portalkonfigurationen mit Parameterwerten. Insgesamt gibt es 14 verschiedene Konfigurationen.

Für die soeben vorgestellten 14 geometrischen Portalkonfigurationen n_p wurden je 4 Windstärken n_w und 4 Windrichtungen n_α untersucht, also $n_p \cdot n_w \cdot n_\alpha = 224$ Rechenfälle. Für die Windrichtung $\alpha = 120^\circ$ wurde nur die Windstärke $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ betrachtet, wodurch sich weitere 14 Rechenfälle ergeben. Somit wurden insgesamt 238 Fälle gerechnet. Die Entscheidung, bei Windrichtung 120° nur schwache Windstärken zu berücksichtigen, beruht auf der Überlegung, dass bei dieser Windrichtung stärkere Winde die Luftströmung aus dem Austrittsportal vom Eintrittsportal wegdrücken werden, wodurch der Strömungskurzschluss reduziert oder sogar ganz verunmöglicht wird.

Der Querschnitt der Tunnelröhren beruht auf der Vorlage des Tunnels Visp mit einem Querschnitt von 70.2 m^2 und einem hydraulischen Durchmesser von 8.83 m. Der Röhrenabstand a_t beträgt konstant 7.1 m, gemessen von Innenwand zu Innenwand an der breitesten Stelle des Profils. Das ergibt ein Verhältnis von Portalabstand zu hydraulischem Durchmesser von $a_t / D_h = 0.804$. Allgemein wurde darauf geachtet, dass die geometrischen Proportionen des CFD-Modells mit denen der Versuchsanordnung Baumanns übereinstimmen. Zwischen dieser und jenem besteht ungefähr das geometrische Skalenverhältnis $1:56.5$. Das Gelände wurde als raue, grasbewachsene Fläche mit einzeln gestreuten Bäumen modelliert. Die Rauigkeitswerte wurden der Arbeit von Aynsley et al. (1977) entnommen. Die Wandhöhe h_w wurde auf 8.25 m festgelegt und die Höhe des Bergs über dem Tal auf 24 m (vgl. Abbildung 30).

Die Strömungsgeschwindigkeiten in bzw. aus den Tunnelportalen wurden konstant auf $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bzw. $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ gehalten. Der Wind tritt über eine Windeintrittsbedingung (Englisch: Wind inlet boundary condition) mit einem senkrechten logarithmischen Geschwindigkeitsprofil nach Richards & Hoxey (1993) in das Berechnungsgebiet ein; die nominale Geschwindigkeit des Profils liegt 10 m über dem Boden. Die Windeintrittsbedingung be-

legt eine Zylinderhalbschale der Aussenfläche des Berechnungsgebiets. Zusätzlich zu dieser Eintrittsbedingung strömt ein Volumenstrom von entsprechend $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ durch den Einfahrtstunnel bei 1 hydraulischen Durchmesser vom Portal in das Berechnungsgebiet ein. Dort wird auch eine nicht reaktive skalare Grösse mit Konzentration c_1 (äquivalent zu $1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ Massenstrom) freigesetzt. Die Konzentration c_2 dieser Spezies wird im Einfahrtstunnel 9 hydraulische Durchmesser stromabwärts vom Portal gemessen. Der Transport dieser skalaren Grösse ist sowohl ein konvektiver als auch ein diffusiver Prozess und erfordert folglich die Definition eines kinematischen Diffusionskoeffizienten. Dieser beschreibt, wie schnell die skalare Grösse durch das Medium in Abwesenheit der Konvektion diffundieren würde. In der vorliegenden Studie wird dieser Wert für die Rauchausbreitung in Luft auf $1\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ gesetzt (vgl. Ansys 2009).

Die Luft verlässt das Berechnungsgebiet erstens als Tunnelluft im Austrittstunnel 9 hydraulische Durchmesser stromabwärts des Portals mit einem Massenstrom, der 8 m/s Strömungsgeschwindigkeit im Austrittstunnel entspricht, und zweitens als Wind an der Austrittsbedingung an der anderen Zylinderhalbschale der Aussenfläche des Berechnungsgebiets (vgl. Abbildung 30).

Der obere Deckel des Berechnungsgebiets ist als eine Wand mit Gleitbedingung modelliert. D.h., dass an dieser Stelle eine zur Wand tangentialer Strömung erzwungen wird und somit keine Strömung durch die Wand tritt. Der hydrostatische Druck im Gebiet wird im Programm aufgrund der Höhen und der Erdbeschleunigung berechnet.

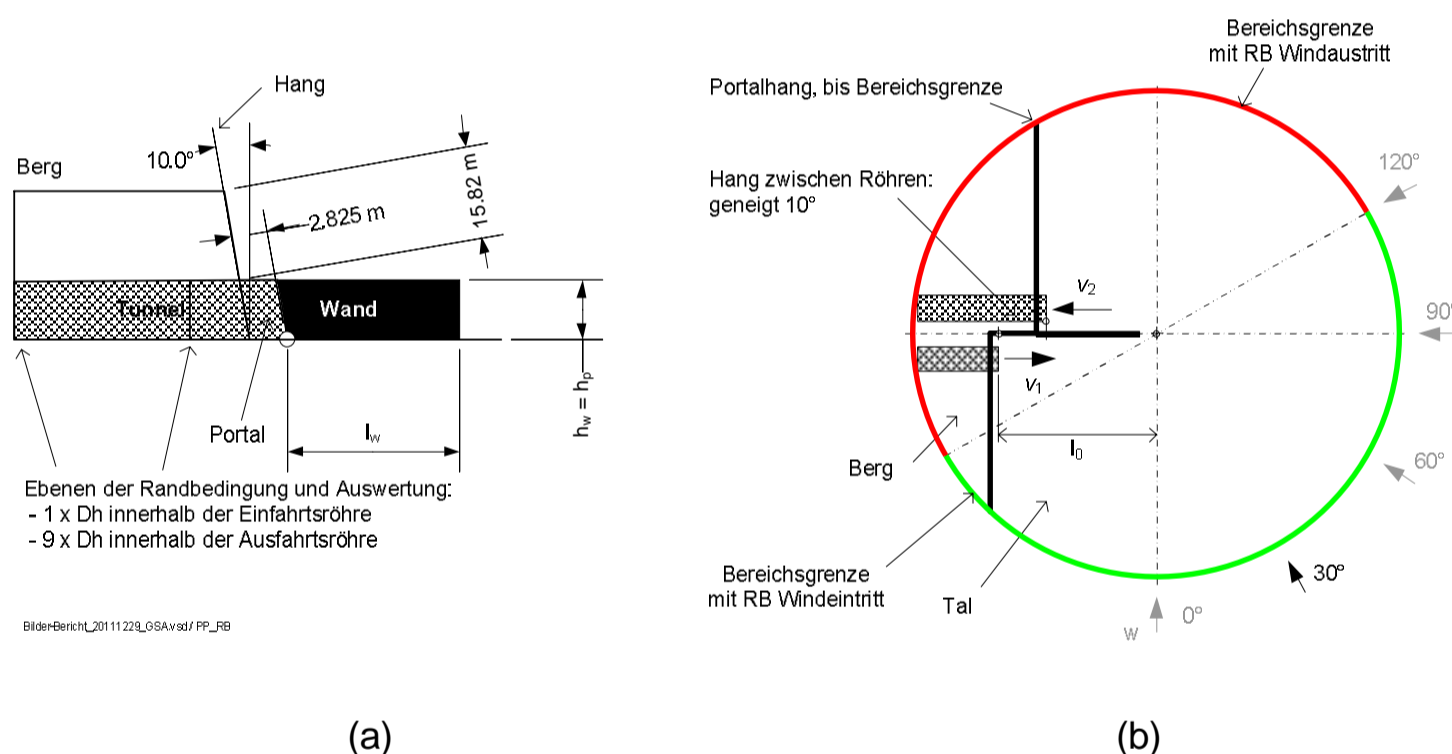


Abbildung 30: Graphische Darstellung verschiedener Randbedingungen (a) im Schnitt und (b) im Grundriss auf den Grenzen des Berechnungsgebiets bei Windrichtung 30°

5.2.4 Die Annahmen

Für die dargestellten Ergebnisse wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Strömung ist isotherm, die Atmosphäre ist neutral.
- Die Dichte der skalaren nicht reaktiven Strömung (Rauch) ist gleich der Dichte der Luft.
- Der Boden wird als Wand mit Haftbedingung behandelt, d.h., dass die Strömungsgeschwindigkeit an der Wandoberfläche gleich null ist. Die Wirkung der Bodenrauigkeiten wird mit der äquivalenten Kornrauigkeit für offenes Gelände/niedriges Gestrüpp/vereinzelte Bäume nach Aynsley et al. (1977) modelliert.
- Der eintretende Wind wird mit dem logarithmischen Windprofil nach Richards & Hoxey (1993) modelliert mit nominaler Windgeschwindigkeit 10 m über Grund (vgl. Kapitel 2.4.1).

5.2.5 Das Turbulenzmodell

Turbulenz wird definiert als die Fluktuation des Strömungsfeldes in Raum und Zeit. Turbulenz geschieht dann, wenn die Trägheitskräfte die viskosen Kräfte dominieren. Die turbulenten Strömungen sind in verschiedenen Zeit- und Raumskalen vorhanden und können stark unsteady sein. Infolge der oben genannten Eigenschaften erweist sich Turbulenz als ein sehr komplexes Phänomen. Grundsätzlich können die Differentialgleichungen der Strömung, die sog. Navier-Stokes-Gleichungen, sowohl laminare als auch turbulente Strömungen beschreiben, ohne dass zusätzliche Informationen notwendig wären. Dies umzusetzen verlangt aber die direkte Lösung dieser Gleichungen mittels direkter numerischer Simulation (DNS). Da aber auch die kleinstmögliche Gitterzelle die Längen- und Zeitskalen der Strömung nicht beschreiben kann, ist die Anwendung von DNS in praktischen Anwendungen derzeit unmöglich, hauptsächlich wegen der dafür erforderlichen Rechenleistung (viele Grössenordnungen grösser als in naher Zukunft verfügbar).

Für die praktischen Anwendungen hat die CFD-Forschung verschiedene Turbulenzmodelle entwickelt, die den durch die Turbulenz erzeugten Effekten Rechnung tragen, ohne extrem hohe Rechenleistungen für sehr feine Gitterberechnungen und/oder DNS zu erfordern.

In der vorliegenden Studie zur Portal-Portal-Rezirkulation wurde das SST- (Shear Stress Transport) Modell angewendet. Das SST-Turbulenzmodell, das in ANSYS CFX implementiert wurde, vereint die Vorteile des k - ϵ -Turbulenzmodells (vorteilhaft für freie Strömungen) und des k - ω -Turbulenzmodells (vorteilhaft für Grenzschichtströmungen) mit einem Mischansatz. Der einzige Nachteil ist eine leicht gesteigerte Anforderung an die Rechenleistung verglichen mit dem k - ϵ -Turbulenzmodell. Der Hauptgrund für die Anwendung von SST ist die Erkenntnis, dass Strömungseffekte wegen den vorhandenen Tunnel- und Trennwänden sowohl in Wandnähe als auch in der Hauptströmung die Rezirkulation beeinflussen können. Zudem verfügt SST über eine fortgeschrittene Wandfunktion, die es ermöglicht, die Wandrauigkeit ohne Kompromisse in der Gitterqualität zu modellieren; andere Turbulenzmodelle verlangen, dass die Grösse der ersten Gitterzelle an der Wand grösser als die eingegebene Wandrauigkeit sei, sodass die Auflösung der Strömung insbesondere für grosse Wandrauigkeiten abnimmt. Die Leistungen des SST-Modells wurden in verschiedenen Validierungsstudien nachgewiesen, vgl. Bardina et al. (1997a) und Bardina et al. (1997b).

5.2.6 Die numerischen Parameter

Für eine CFD-Berechnung werden zahlreiche Eingaben benötigt. Einige dieser Parameter beeinflussen die Strömungsphysik direkt, während andere rein numerisch sind und dazu gebraucht werden, eine konvergierte Lösung zu erreichen und numerische Diskrepanzen zu vermeiden. Einige der wichtigsten Eingabeparameter dieser Simulationen sind weiter unten gegeben.

Der Solver

Für die vorliegende Studie wird der ANSYS-CFX-Solver v. 13.0 verwendet. Der ANSYS-CFX-Solver ist ein gekoppelter Solver: Er löst die bestimmenden Transportgleichungen als ein einziges Gleichungssystem, im Gegensatz zu einem getrennten Solver, in dem die Impulsgleichung mit einer Annahmen für das Druckfeld zuerst gelöst und anschliessend korrigiert wird. Letztere Methode benötigt eine grössere Anzahl Iterationen, um eine konvergierte Lösung zu erreichen, als der gekoppelte Solver.

Die stationäre Simulation

Eine stationäre Simulation ist dadurch gekennzeichnet, dass die Strömungseigenschaften zeitunabhängig sind. Zahlreiche Phänomene können als stationär betrachtet werden, wenn ihre Eigenschaften über längere Zeiträume konstant bleiben und wenn für deren Beschreibung die Echtzeitinformationen nicht erforderlich sind. Zahlreiche Strömungen können in der Praxis nach einer anfänglichen instationären Strömungsentwicklung als stationär betrachtet werden. Diese Simulationsmethode ermöglicht es, die notwendigen Informationen und ein gemittelt Bild der Strömungsphänomene innerhalb realistischer Simulationsdauern und unter Ausschluss der nicht benötigten zusätzlichen Informationen,

wie lokale zeitabhängige Fluktuationen, zu erhalten. In der vorliegenden Arbeit wird eine stationäre Strömung betrachtet; dies entspricht einem voll ausgebildeten, konstant wehenden Wind und einer konstanten Brandleistung zu einer Zeit, zu der keine Ereignislüftung bzw. Überdrucklüftung in Betrieb ist. Diese Bedingungen sind gegenüber den in Kapitel 2.3 beschriebenen Lüftungsszenarien tatsächlich idealisiert.

Die Zeitskalen

Wie soeben erläutert, beruht die vorliegende Arbeit auf stationären Betrachtungen der Strömungsphänomene. Der ANSYS-CFX-Solver benötigt einen Pseudo-Zeitschritt, um iterative zu einer konvergierten Lösung zu gelangen. Dieser Zeitschritt wirkt hauptsächlich als ein Beschleunigungsparameter. Für die vorliegende Arbeit wird ein Zeitschritt verwendet, der vom Solver selbst bestimmt wird (vgl. ANSYS-CFX-Solver-Theorieführer). Bei Bedarf wird dieser angepasst, um die Konvergenz zu erreichen.

Das Diskretisierungsschema

Es wird ein „hoch auflösendes“ Diskretisierungsschema angewendet, um die Endergebnisse zu erreichen, wie von Ansys empfohlen (Ansys 2009). Ein „hoch auflösendes“ Diskretisierungsschema wurde deshalb verwendet, weil es lokal einen Mischfaktor zwischen Diskretisierungsschemata erster und zweiter Ordnung anwendet und somit einen ausgezeichneten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Robustheit eingeht. Um die Genauigkeit der Ergebnisse weiter zu steigern, wurde die Fähigkeit des ANSYS-CFX-Solvers für unstrukturierte Gitter, mit doppelter Präzision zu rechnen, angewendet.

Das Konvergenzkriterium

Die Diskretisierung der partiellen Differentialgleichungen in algebraische, für digitale Computer lösbare Formen führt zu numerischen Rundungsfehlern. Auf einem beliebig feinen Gitter würden diese Fehler gegen null streben. Da das Gitter in praktischen Anwendungen nicht unendlich fein sein kann, bleibt ein gewisser Grad an Rundungsfehlern bestehen. Die Gültigkeit einer CFD-Lösung wird am Abfall dieser Fehler, auch Residuen genannt, über die Iterationen beurteilt. Dieser Residuenverlauf sowie der Verlauf verschiedener Strömungsgrößen an kritischen Punkten definiert das Konvergenzkriterium.

In der vorliegenden Arbeit wird es wie folgt definiert: Die Konvergenz ist dann erreicht, wenn die Standardabweichung des Konzentrationsverhältnisses c_2 / c_1 über mindestens 60 Iterationen konstant bleibt. Als zusätzliches Kriterium wird der Solver gezwungen, 150 Iterationen durchzuführen, bevor das Kriterium der Standardabweichung angewendet wird. Als Qualitätskontrolle gilt zusätzlich, dass das globale Ungleichgewicht verschiedener Variablen bzw. die Residuen kleiner als 10^{-3} bzw. 10^{-4} sein sollen. Diese Kriterien werden auf der Grundlage der verfügbaren Richtlinien COST 2007 und ERCOFTAC festgelegt. In einigen Fällen, wenn die Lösung des Konzentrationsverhältnisses regelmässig zu schwingen anfing, wurde das Konzentrationsverhältnis aus dem Mittelwert der Schwingung über eine Periode ermittelt (vgl. Anhang I.1.2).

Die verfügbare Rechenleistung

Auf einem 2.6-GHz-Intel-Xeon-Cluster mit insgesamt 16 GB RAM wurden 8 Prozessoren parallel verwendet. Die Dauer einer Simulation bis zur Erreichung der Konvergenzkriterien schwankte von Fall zu Fall zwischen minimal 2.5 Stunden und maximal 1 Tag.

5.2.7 Die Simulationsmethodik

Die verschiedenen geometrischen Variationen und ihre Kombinationen wurden mit den Gitterparametern aus der Gitterunabhängigkeitsstudie unter Anwendung der ANSYS-Mesh-Software vernetzt. Diese Gitter wurden dann in die Software ANSYS CFX Pre importiert, wo die verschiedenen oben definierten numerischen Parameter und Randbedingungen definiert wurden. Jeder Fall wird bis zur Erreichung des bestimmten Konvergenzkriteriums mit dem ANSYS-CFX-Solver gerechnet. Nachdem die Simulation beendet ist, werden die Ergebnisse mit dem ANSYS-CFX-Nachlaufrechnungswerkzeug analysiert. Die Rezirkulationsrate c_2 / c_1 wird wie oben definiert erhalten. Die gesammelten Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten untersucht.

Meist wurde als Anfangsbedingung das Geschwindigkeitsfeld im ganzen Berechnungsgebiet auf null gesetzt. Wenn sich von einer Konfiguration zur nächsten nur die Windstärke änderte, wurde die Lösung der letzten Konfiguration als Startlösung für die nächste Konfiguration verwendet. Damit konnte Rechenzeit gespart werden. Es konnten alle Fälle bis auf 4 zur Konvergenz gebracht werden. Die vier übrigen Fälle befinden sich bei 90° Windrichtung und Starkwind zwischen 2 und 5 m·s⁻¹, Portalversatz grösser gleich null und Wandlängen grösser null. Gemäss Kapitel 2.4.5 sind Strömungen der Portalabluft bei Gegenwind mit starken Turbulenzen verbunden. Darauf gestützt wird vermutet, dass die Physik der Konfigurationen derart instationär ist, dass eine aussagekräftige Konvergenz mit einem stationären Modell erreicht werden kann.

5.3 Die Auswertung

Das Ziel der Auswertung ist, die Abhängigkeiten der Rezirkulation von den Parameterwerten zu erkennen, Gesetzmässigkeiten zu formulieren und praktische Empfehlungen für die Portalgestaltung abzugeben. Es wurden insgesamt 238 Simulationen durchgeführt; davon sind 234 Simulationen brauchbar. Diese grosse Datenmenge lässt drei Auswertungsmethoden zu:

- Den Vergleich von Untermengen der gerechneten Ergebnisse mit experimentellen Daten von Baumann (1979).
- Die statistische Auswertung der Daten mit Histogrammen der Parameterwerte. Diese Methode erlaubt es, den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Rezirkulation zu erkennen.
- Die Einzelauswertung der Daten. Die Rezirkulation wird gegen bestimmte Parameterwerte bei konstanten anderen Parametern aufgezeichnet. Es ermöglicht, einige Tendenzen zu erkennen.

Die folgenden Kapitel beschreiben diese Auswertungen.

5.3.1 Die Validierung mit experimentellen Daten

Die Unterschiede zwischen den experimentellen Ergebnissen von Baumann (1979) und dem CFD-Modell sind in Tabelle 18 dargestellt.

Baumanns Windtunnelmodell	CFD-Modell Fp Rez
Die Modellskala beträgt 1:50.	Die Strömung wird in voller Grösse modelliert.
Die Tunnelportale sind scharfkantig. Der Einfluss der Wandstärke wird nicht berücksichtigt.	Die Wandstärke wird mit einem realen Tunnelportal berücksichtigt.
Es werden keine Bodenrauigkeiten noch die Wirkung lokaler Scherströmungen berücksichtigt.	Die Bodenrauigkeit wird mit in der einschlägigen Literatur publizierten Werten berücksichtigt.
Es wird ein gleichförmiges Windprofil mittels eines Gitters erzeugt.	Es wird ein logarithmisches Windprofil angewendet.
Der Gebläseaustritt für Windquelle befindet sich sehr nahe an den Portalen.	Die Windrandbedingung befindet sich 250 m von den Portalen.
Es werden keine Angaben zu den Temperaturverhältnissen im Laborraum gemacht.	Es wird im ganzen Gebiet 25°C angesetzt (isotherme Bedingung).
Es wird nur nachteiliger Portalversatz untersucht.	Es werden vorteilhafte und nachteilige Portalversätze untersucht.
Weder die Geschwindigkeiten der Ein- und Ausströmung der Portale noch die Windstärke werden beziffert. Es werden nur Verhältnisse angegeben.	Es werden absolute Strömungsgeschwindigkeiten an den verschiedenen Randbedingungen angegeben.
Es werden keine Angaben zum Turbulenzgrad der eintretenden Strömungen gemacht.	Der Turbulenzgrad wird als eine Funktion der Geschwindigkeit und der Strömungsrandbedingung modelliert. Die Eingabewerte entstammen der verfügbaren Literatur.

Tabelle 18: Vergleich der Modellierung bei Baumann (1979) und in den Simulationen

Trotz der starken Unterschiede wird im Folgenden ein Vergleich der Ergebnisse versucht. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit experimentellen Daten ist nur bei identischen Parameterwerten aussagekräftig. Die Tabelle 19 gibt eine Übersicht der massge-

benden dimensionslosen Parameter der CFD-Studie und der experimentellen Ergebnisse von Baumann (1979).

Parameter		Baumann (1979)	Simulationen
Verhältnis der Portalströme	q_2 / q_1	0.4 – 3.0	1.33
Verhältnis Windstärke zu Austrittsstrom	w/v_1	0.0 – 3.2	0.017 – 0.833
Windrichtung	α	0°, 30°, 60°, 90°	0°, 30°, 60°, 90°, 120°
Portalversatz	l_p / D_h	0, 1.6, 3.2	-11.3, -5.7, 0.0, 1.7, 3.4
Wandlänge	l_w / D_h	0	0.0, 1.1, 2.3, 3.4, 5.7

Tabelle 19: Vergleich der Wertebereiche der massgebenden dimensionslosen Parameter in den Simulationen und der experimentellen Studie von Baumann (1979)

Viele Messreihen von Baumann (1979) wurden bei konstantem Verhältnis der Portalströme $q_2/q_1 = 1$ durchgeführt, die Simulationen hingegen alle bei einem konstanten Verhältnis $q_2/q_1 = 1.33$. Die experimentellen Daten zeigen aber eine sehr schwache Abhängigkeit der Rezirkulationswerte vom Verhältnis der Portalströme: Bei $q_2/q_1 = 1$ und bei $q_2/q_1 = 1.33$ sind die Messwerte in den meisten beobachteten Fällen fast identisch. Deshalb werden im Folgenden die Simulationen bei $L_w = 0$ m mit den Daten bei $q_2/q_1 = 1$ verglichen. Die Werte des Portalversatzes sind in den Experimenten und den Simulationen in drei Fällen vergleichbar. Das Verhältnis der Windstärke zur Austrittsgeschwindigkeit w/v_1 deckt in den Versuchen einen viel grösseren Bereich ab als in den Simulationen, in denen sie nur zwischen 0.017 und 0.83 verändert werden. Es ist also möglich, folgende 2 Vergleiche anzustellen:

- Rezirkulation ohne Trennwand bei Querwind ($\alpha = 0^\circ$), Portalversatz l_p / D_h zwischen 0 und 3.2 und Windstärke w/v_1 zwischen 0 und 1 (vgl. Abbildung 31)
- Rezirkulation ohne Trennwand bei parallelen Portalen ($l_p / D_h = 0$), Windrichtung α zwischen 0° und 90° und Windstärke w/v_1 zwischen 0 und 1 (vgl. Abbildung 32)

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten in Abbildung 31 zeigt, dass die Simulationen mindestens tendenziell mit den Versuchen übereinstimmen: Die Rezirkulation nimmt mit steigender Windstärke zu. Der Einfluss des Portalversatzes bei grosser Windstärke fällt ausserdem in den Simulationen viel stärker aus als in den Versuchen: In den Simulationen sinkt die Rezirkulation massiv mit steigendem Portalversatz; in den Versuchen steigt die Rezirkulation jedoch vorerst mit steigendem Portalversatz.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten in Abbildung 32 zeigt bei $\alpha = 0^\circ$ und $\alpha = 30^\circ$ tendenziell das gleiche Verhalten wie die Versuche: Wiederum steigt die Rezirkulation mit steigender Windstärke an. Bei $\alpha = 90^\circ$ stimmt diese Tendenz nur bedingt. Bei $\alpha = 60^\circ$ weichen die Simulationsergebnisse gänzlich von den Versuchsdaten ab: Während in den Simulationen die Rezirkulation bei $\alpha = 60^\circ$ auf über 0.5 ansteigt, bewegt sie sich in den Versuchen durchgehend zwischen 0.1 und 0.15.

Insgesamt fällt auf, dass die Ergebnisse der Validierung (vgl. Kapitel 4) besser mit den Versuchen übereinstimmen als die aktuellen Ergebnisse der Parameterstudie Portal-Portal. Dies kann damit erklärt werden, dass die Validierungsstudie die Laborbedingungen der Experimente Baumanns (1978) so treu wie möglich nachbildet, die Parameterstudie hingegen die natürlichen Bedingungen anstrebt.

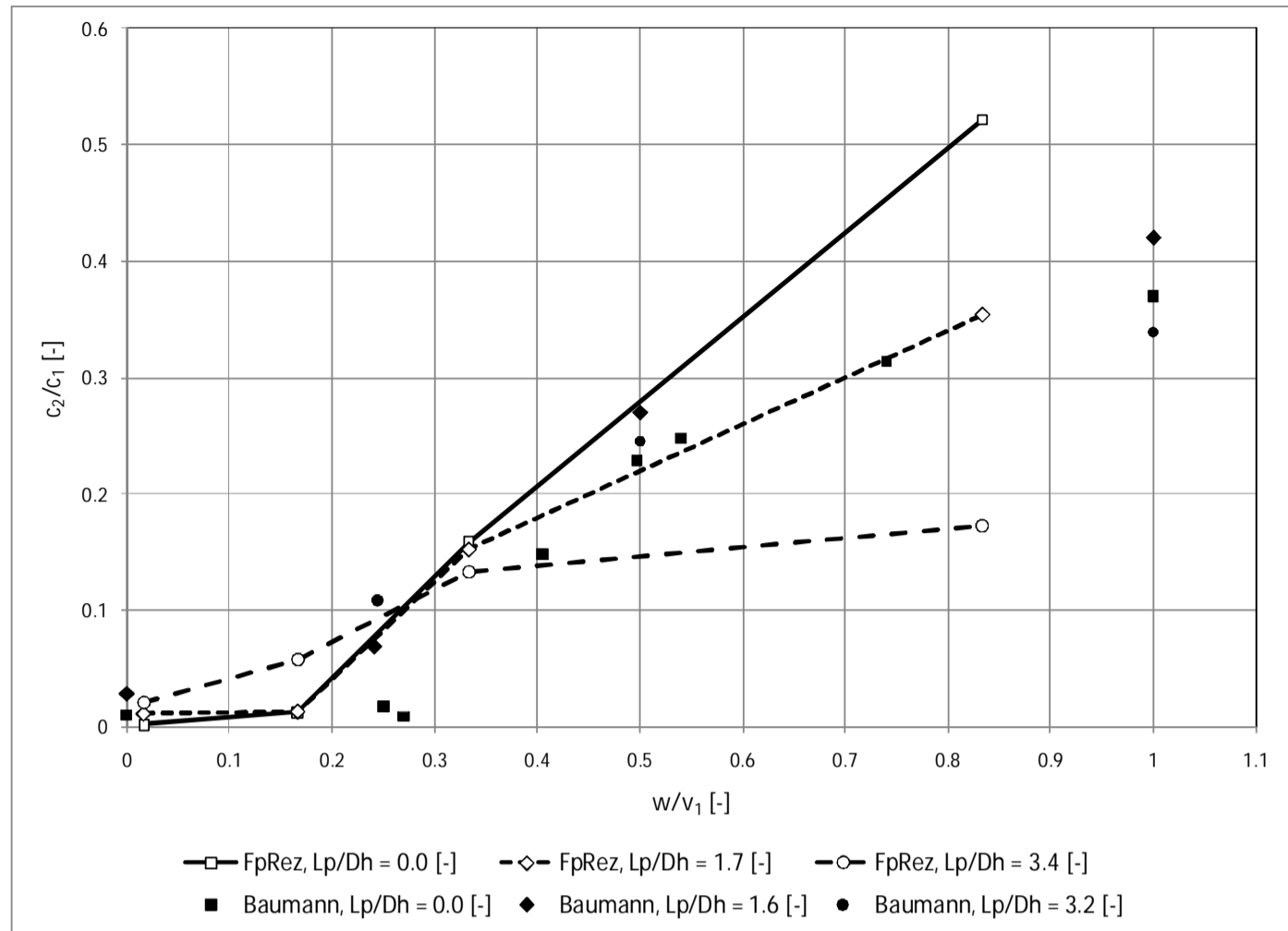


Abbildung 31: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten von Baumann (1979) bei Querwind ($\alpha = 0^\circ$), Verhältnis der Portalströme $q_2/q_1 = 1$ bzw. 1.33 und verschiedenen Werten des Portalversatzes l_p/D_h

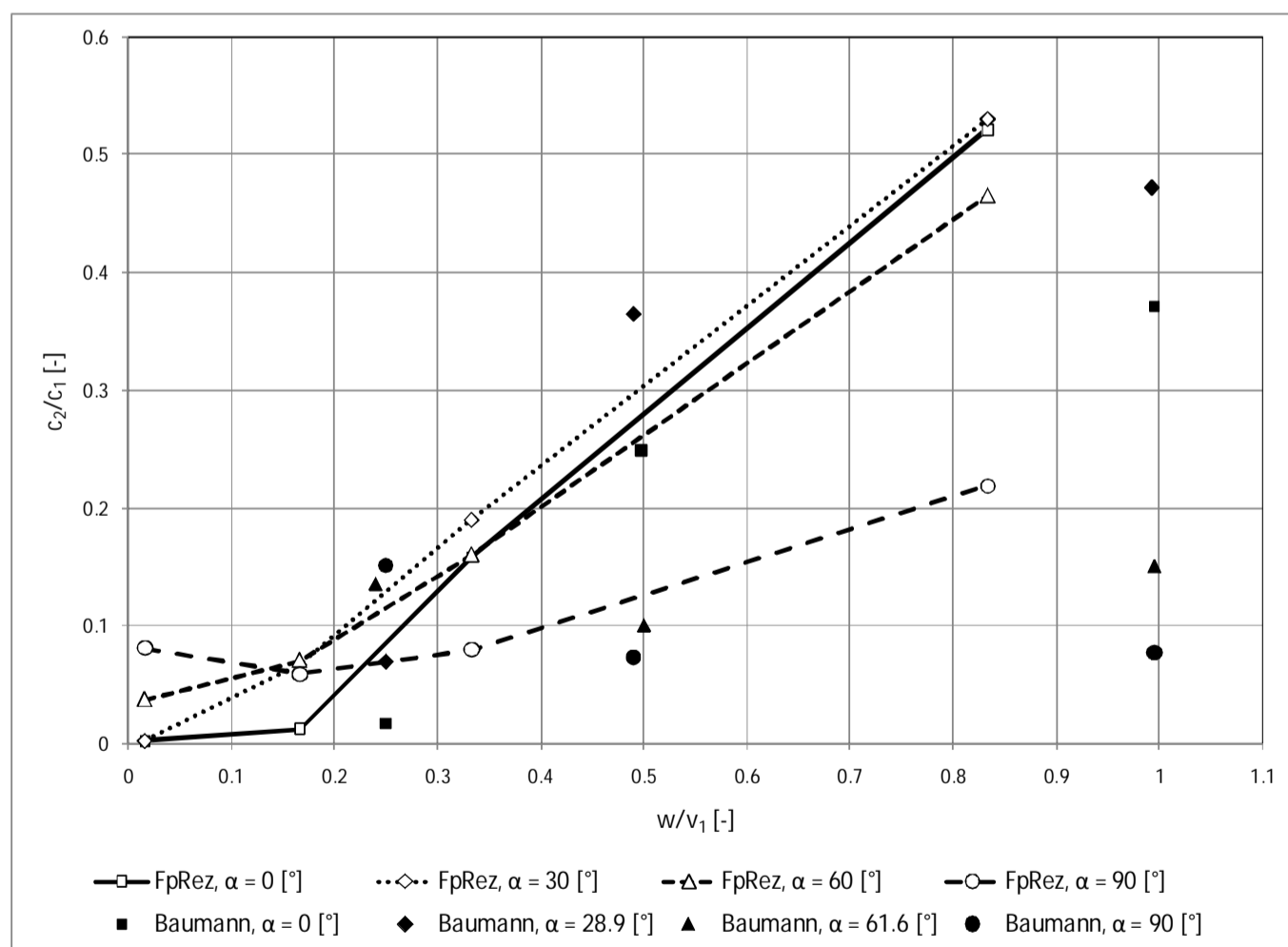


Abbildung 32: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten von Baumann (1979) bei parallelen Portalen ($l_p/D_h = 0$), Verhältnis der Portalströme $q_2/q_1 = 1$ bzw. 1.33 und verschiedenen Werten der Windrichtung α

5.3.2 Die Histogramme der Parameterwerte

Von den 238 berechneten Fällen können 232 Fälle in der Auswertung berücksichtigt werden. Für die 6 restlichen Fälle konnte keine konvergierte Lösung erreicht werden. Diese Fälle treten alle bei $\alpha = 90^\circ$ auf. Dies wird auf transiente Strömungsphänomene zurückgeführt.

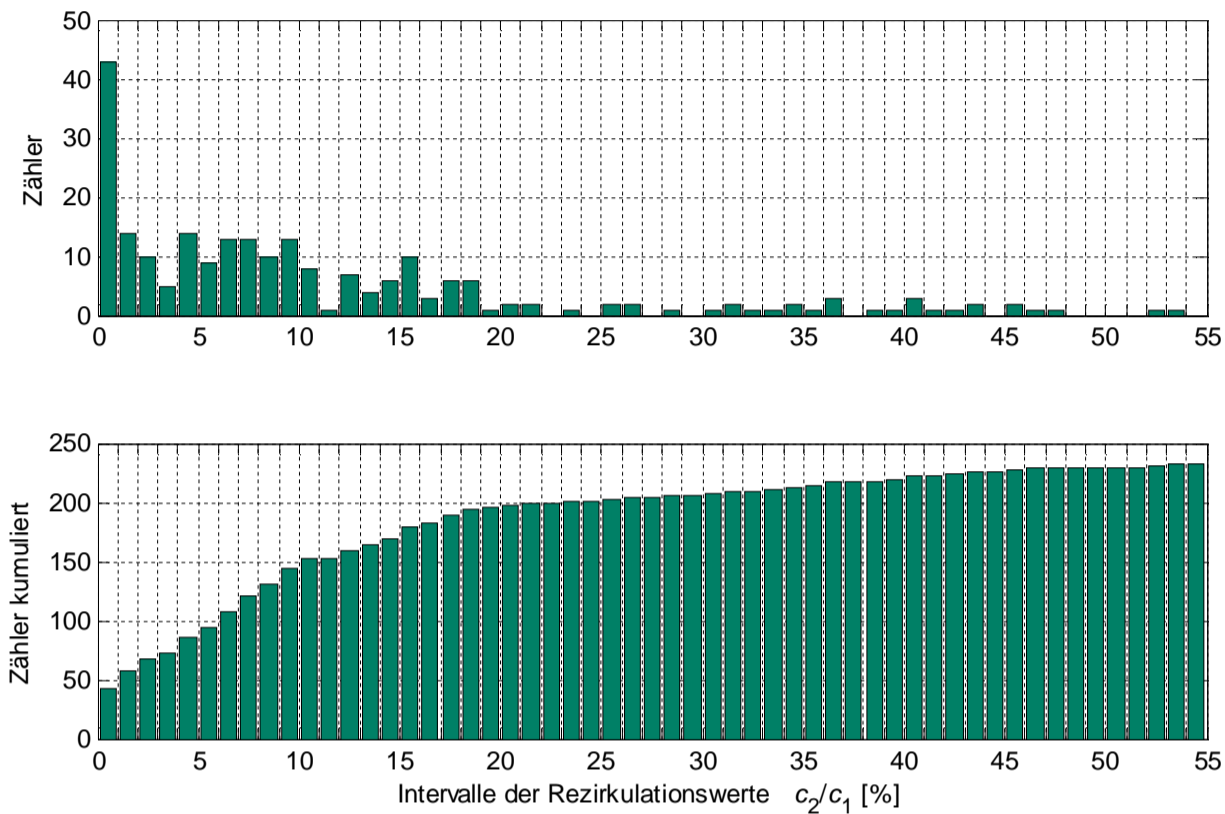


Abbildung 33: Portal-Portal. Histogramm der Rezirkulationswerte über alle Ergebnisse in 1%-Schritten

Die Verteilung aller 232 Rezirkulationswerte ist in Abbildung 31 dargestellt. Die Verteilung mit Mittelwert 11.2 % und Standardabweichung 12.1 % weist folgende Merkmale auf:

- Insgesamt 43 bzw. 18.5 % der Werte sind kleiner als $c_2/c_1 = 1$ %.
- Bei ca. $c_2/c_1 = 20$ % weist die Verteilung eine deutliche Abflachung aus: 84.5 % der Werte liegen unter 20 %.

Die Anzahl berücksichtigter Fälle ist in Tabelle 20 in Anzahl pro Parameterwert aufgeteilt. Aus dieser Liste wird deutlich, dass die geometrischen Parameter sehr ungleichmässig auf die Fälle verteilt sind, die Windparameter infolge der Falldefinition in Kapitel 5.2.3 hingegen gleichmässiger,.

Portalversatz l_p		Trennwandlänge l_w		Windstärke w		Windrichtung α	
Werte	# Fälle	Werte	# Fälle	Werte	# Fälle	Werte	# Fälle
-100 m	17	0 m	85	0.1 m·s ⁻¹	69	0°	56
-50 m	17	10 m	51	1.0 m·s ⁻¹	55	30°	56
0 m	81	20 m	51	2.0 m·s ⁻¹	54	60°	56
15 m	66	30 m	32	5.0 m·s ⁻¹	54	90°	50
30 m	51	50 m	13	-	-	120°	14

Tabelle 20: Portal-Portal: Anzahl der berücksichtigten Fälle pro Parameterwert

In der Abbildung 34 sind die Histogramme der vier Parameter in vier Balkendiagrammen gezeigt. Jedes Balkendiagramm enthält vier bis fünf Histogramme, für jeden Wert des jeweiligen Parameters. Die Abszisse der Balkendiagramme besteht aus 11 Intervallen der Rezirkulationswerte der Breite 5 %; der Maximalwert der Rezirkulation ist geringer als 55 %. Die Einheit der Abszisse ist in Prozent. Die Balken in einem Intervall zeigen die

Anzahl Rezirkulationswerte in diesem Intervall für den jeweiligen Parameterwert an.

Histogramme des Portalversatzes l_p

Ein negativer Portalversatz ist mit sehr niedrigen Rezirkulationswerten verbunden: Ausser 2 Werten zwischen 20 % und 25 % liegen alle Werte für $l_p < 0$ m unter 10 %. Der Portalversatz 0 m weist die grösste Streuung und den grössten Mittelwert aus, dicht gefolgt von 15 m Portalversatz (vgl. Tabelle 21). Bei steigendem Portalversatz nimmt die Rezirkulation tendenziell wieder ab. Das legt den Schluss nahe, dass bei keinem Portalversatz im Allgemeinen die günstigsten Bedingungen für Rezirkulation auftreten und dass der Portalversatz eine Mindestlänge haben muss, um wirksam zu sein.

Portalversatz l_p	$l_p = -100$ m	$l_p = -50$ m	$l_p = 0$ m	$l_p = 15$ m	$l_p = 30$ m
Mittelwert \bar{r}	2.2 %	3.3 %	13.9 %	12.5 %	10.8 %
Standardabweichung	3.4 %	5.1 %	13.2 %	12.4 %	11.1 %

Tabelle 21: Mittelwerte der den Werten des Portalversatzes zugeordneten Rezirkulationswerte

Histogramme der Trennwandlänge l_w

Gemäss Tabelle 20 sind sehr viel mehr Fälle ohne Wand untersucht worden als solche mit Wand. Deshalb werden hier nur die Fälle mit Wand diskutiert. Die Mittelwerte der Verteilungen mit Wand sind alle ungefähr gleich gross, sodass kein Schluss aus den Mittelwerten möglich ist (vgl. Tabelle 22). Das Histogramm zeigt jedoch, dass die höchsten Rezirkulationswerte über 40 % mit keiner oder kurzen Trennwänden verknüpft sind.

Portalversatz l_w	$l_w = 0$ m	$l_w = 10$ m	$l_w = 20$ m	$l_w = 30$ m	$l_w = 50$ m
Mittelwert \bar{r}	9.0 %	12.8 %	12.1 %	12.6 %	12.0 %
Standardabweichung	12.5 %	13.5 %	11.4 %	10.4 %	10.2 %

Tabelle 22: Mittelwerte der den Wandlängen zugeordneten Rezirkulationswerte

Histogramme der Windrichtung α

Auffallend an den Histogrammen ist, dass eine Rezirkulation über 25 % nur für Winkel kleiner oder gleich 60° eintritt. Diese Tendenz wird durch die Mittelwerte in Tabelle 23 bestätigt: Die höchsten Rezirkulationswerte treten bei 30° auf, gefolgt von 60° und 0° . Die geringsten Werte treten bei 120° auf. Diese Tendenz bestätigt eine Beobachtung von Baumann (1979), dass die höchsten Rezirkulationen bei Querwind mit leichter axialer Komponente auftreten (ca. 30°).

Windrichtung α	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 120^\circ$
Mittelwert \bar{r}	10.6 %	13.4 %	12.9 %	8.5 %	7.6 %
Standardabweichung	12.4 %	15.4 %	13.5 %	5.2 %	2.1 %

Tabelle 23: Mittelwerte der den Windrichtungen zugeordneten Rezirkulationswerte

Histogramme der Windstärke w

Auffallend an diesem Histogramm ist, dass sämtliche Rezirkulationswerte über 20 % bei einem Querwind von $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ermittelt wurden. Somit zeigt sich die Windstärke im Zusammenhang mit der Windrichtung als der stärkste, aber nicht kontrollierbare Einflussfaktor im Phänomen der Rezirkulation.

Windstärke w	$w = 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$w = 1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$w = 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$w = 5.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Mittelwert \bar{r}	4.1 %	5.5 %	11.7 %	25.5 %
Standardabweichung	3.7 %	3.4 %	6.0 %	16.4 %

Tabelle 24: Mittelwerte der den Windstärken zugeordneten Rezirkulationswerte

5.3.3 Die Einzelauswertung

In der statistischen Auswertung des Kapitels 5.3.2 wurde festgestellt, dass die höchsten Rezirkulationswerte bei Portalversatz null auftreten. Wird dieser Parameter festgehalten und die Rezirkulation in Abhängigkeit der Trennwandlänge für verschiedene Werte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung aufgezeichnet, so entstehen die folgenden Abbildungen:

- Abbildung 35: Rezirkulation gegen Trennwandlänge, Portalversatz null für alle Diagramme, pro Diagramm Windstärke fest und Windrichtung veränderlich.
- Abbildung 36: Rezirkulation gegen Trennwandlänge, Portalversatz null für alle Diagramme, pro Diagramm Windstärke veränderlich und Windrichtung fest.
- Abbildung 37: Rezirkulation gegen Trennwandlänge, Portalversatz 15 m für alle Diagramme, pro Diagramm Windstärke fest und Windrichtung veränderlich.
- Abbildung 38: Rezirkulation gegen Trennwandlänge, Portalversatz 30 m für alle Diagramme, pro Diagramm Windstärke fest und Windrichtung veränderlich.

Schliesslich wird in Abbildung 39 die Rezirkulation gegen die Windstärke bei Portalversatz null für alle Diagramme und pro Diagramm eine feste Wandlänge und veränderliche Windrichtungen aufgezeichnet.

Der Vergleich dieser Vielzahl an Diagrammen führt zu folgenden Beobachtungen:

- Bei Portalversatz null und Starkwind sinkt die Rezirkulation bis zu einer Wandlänge 30 m. Bei Schwachwind zeigt die Wand keine Wirkung.
- Bei Portalversatz 15 m und 30 m hat die Trennwand keine oder kaum eine Auswirkung auf die Rezirkulation.
- Bestimmend ist die Windstärke; sie legt ein Niveau der Rezirkulation fest; die Windrichtung legt die Breite dieses Rezirkulationsniveaus fest.
- Bei der Windrichtung 90° verhält sich die Rezirkulation bei steigender Windstärke anders als bei den anderen Richtungen: Bei Schwachwind ist die Rezirkulation bei 90° im Allgemeinen höher als bei den anderen Windrichtungen; mit steigender Windstärke steigt sie weniger an als die anderen oder fällt sogar ab.
- Allgemein zeigt die Rezirkulation folgende Abhängigkeit von der Windstärke:
 - $w \leq 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: $r \leq 10 \%$
 - $w \leq 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: $r \leq 20 \%$
 - $w \geq 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$: $r > 20 \%$
 Dies gilt für Windrichtung $< 90^\circ$.
- Die höchsten Rezirkulationswerte treten bei Windrichtung 30° , Portalversatz null und Trennwandlänge null auf. Dies bestätigt die Ergebnisse von Baumann (1979).

5.3.4 Vergleich mit der Fallstudie Habsburg-Tunnel

In Pöyry 2012 wurde die Portal-Portal-Rezirkulation am Nordportal des Habsburg-Tunnels untersucht. Bei diesem Portal beträgt der Portalversatz ca. 5 m in positiver Richtung. Die Trennwand, gebildet durch die Zentrale, hat eine Länge von ca. 15 m und ist schräg abfallend vom Tunnelfirst bis auf Fahrbahnniveau. Dem Nordportal ist eine Brücke über die Aare vorgelagert; der Wind trifft also ohne Hindernisse auf das Portal. Es wurde ein CFD-Modell des Portals und dessen realen Umgebung erstellt. Die Windstärke wurde zwischen 2 und $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ variiert, die Windrichtung auf $\alpha = 30^\circ$ und die Aus- und Eintrittsgeschwindigkeit der Luft an den Portalen auf $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ festgelegt. Die atmosphärischen Bedingungen wurden in einem ersten Wurf isotherm und neutral angenommen. Es wurden nebst der Ist-Konfiguration des Portals noch weitere geometrische Varianten untersucht. Das Ergebnis der Ist-Konfiguration beträgt 35.0 % Rezirkulation bei $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und 13.6 % Rezirkulation bei $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Windstärke.

Die Ist-Konfiguration des Portals deckt sich nicht genau mit denen der vorliegenden Studie. Der treffendste Vergleich ist entweder die Konfiguration ohne Portalversatz mit 20 m Trennwand (vgl. Abbildung 36) oder mit 15 m Portalversatz ohne Trennwand (vgl. Abbildung 37). Im ersten Fall beträgt die Rezirkulation 38.0 % bei $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und 17.8 % bei $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Windstärke. Im zweiten Fall beträgt die Rezirkulation 37.0 % bei $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und

14.0 % bei $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Windstärke. Diese Ergebnisse decken sich sehr gut miteinander. Dies widerspricht jedoch der Beobachtung von Haerter und Baumann, dass die Rezirkulation sehr stark vom Verhältnis w/v_1 abhängt, besonders für die Werte zwischen 0 und 1 (vgl. Abbildung 14): In der Fallstudie Habsburg-Tunnel betragen diese Verhältnisse 0.5 und 1.0, in der vorliegenden Studie 0.33 und 0.83. Daher muss diese Übereinstimmung als Tendenz und nicht als genaue Aussage verstanden werden.

Im Fall des Tunnels Habsburg wurde auch die Wirkung des Auftriebs heissen Rauchs auf die Rezirkulation untersucht. Dazu wurde ein Temperaturunterschied von 25°C angenommen. Das ist gemäss Abbildung 10 durchaus möglich. Bei Windstärke $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ fiel die Rezirkulation von 35.0 % auf 1.5 % ab. Dies belegt den gewaltigen Einfluss des Auftriebs auf die Rezirkulation von Portal zu Portal, der aber hier nicht weiter untersucht werden kann. Das Ergebnis aus der Fallstudie Habsburg-Tunnel kann nicht verallgemeinert werden, da kleinere Temperaturdifferenzen unter Umständen auch zu grösserer Rezirkulation führen könnten. Sicher scheint jedoch, dass für einen Brand nahe am Portal, bei dem die Rauchgase noch viel wärmer als die Umgebung sind, der Auftrieb eine positive Auswirkung auf die Rezirkulation haben wird.

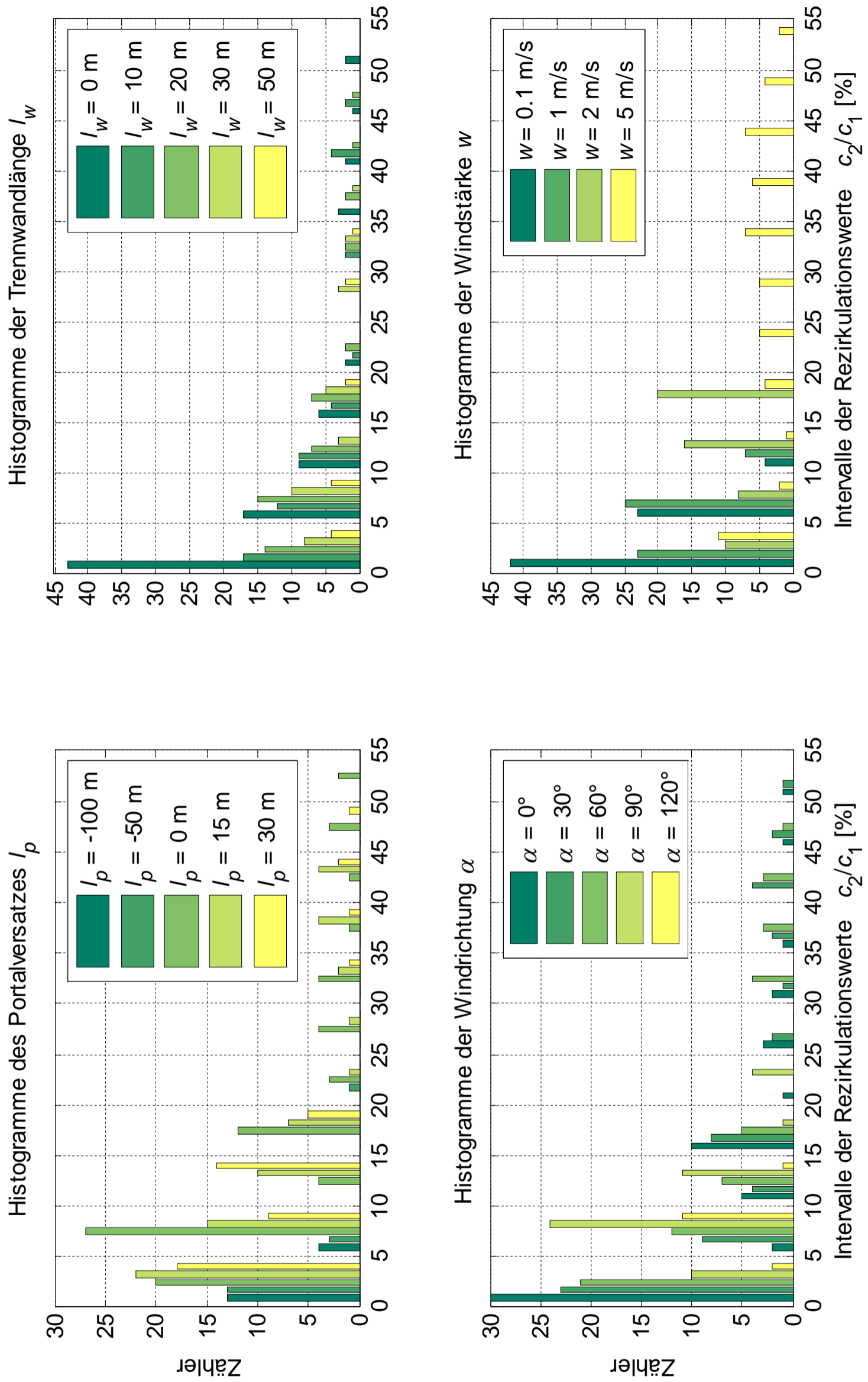


Abbildung 34: Portal-Portal-Rezirkulation: Histogramme der Verteilung der Rezirkulation in Abhängigkeit der Parameterwerte der Studie, nämlich Portalversatz, Trennwandlänge, Anströmwinkel und Windstärke

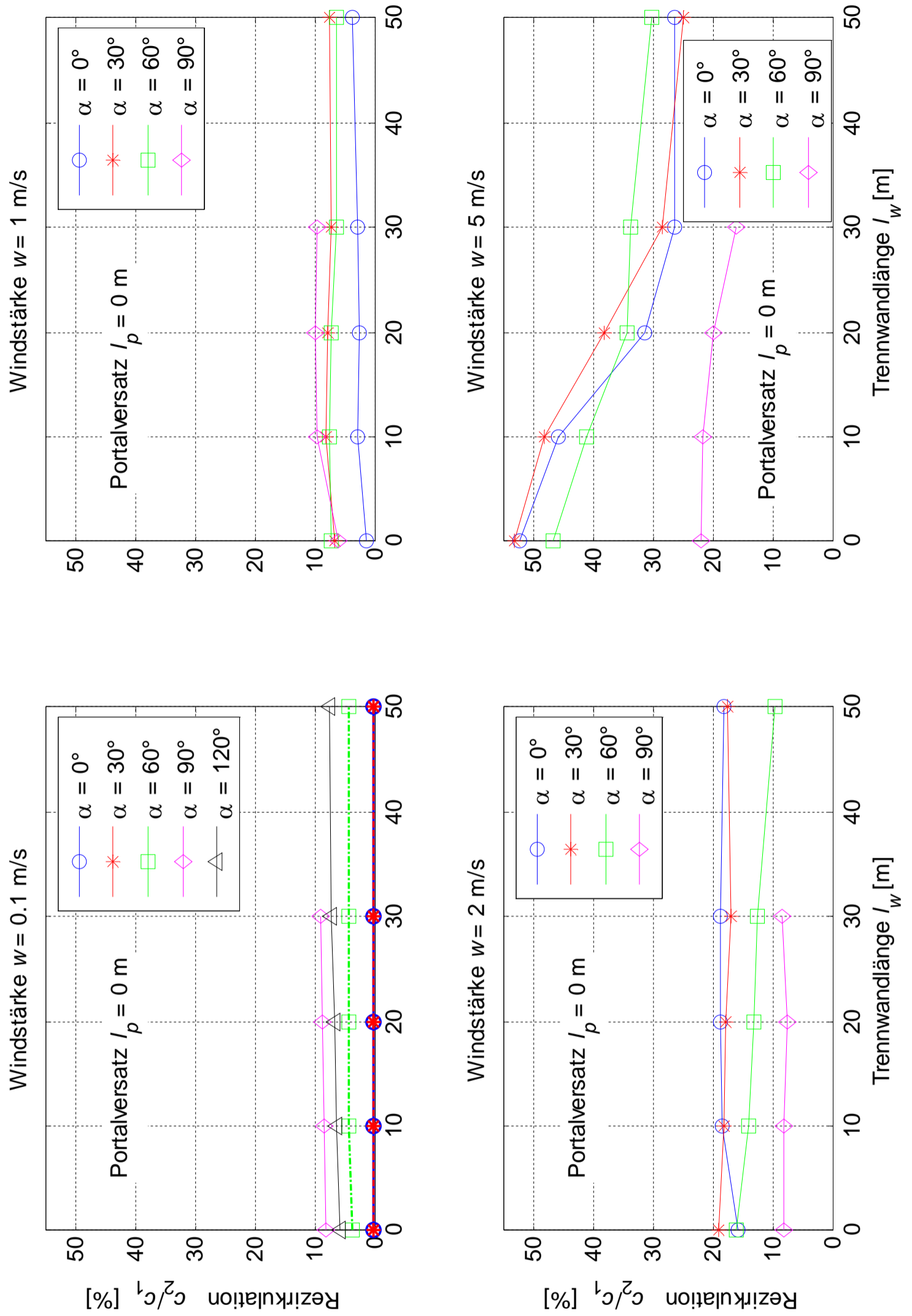


Abbildung 35: Portal-Portal-Rezirkulation: Rezirkulation gegen Trennwandlänge bei Portalversatz null in Abhängigkeit der Windstärke (einzelne Diagramme) und der Windrichtung (einzelne Kurven)

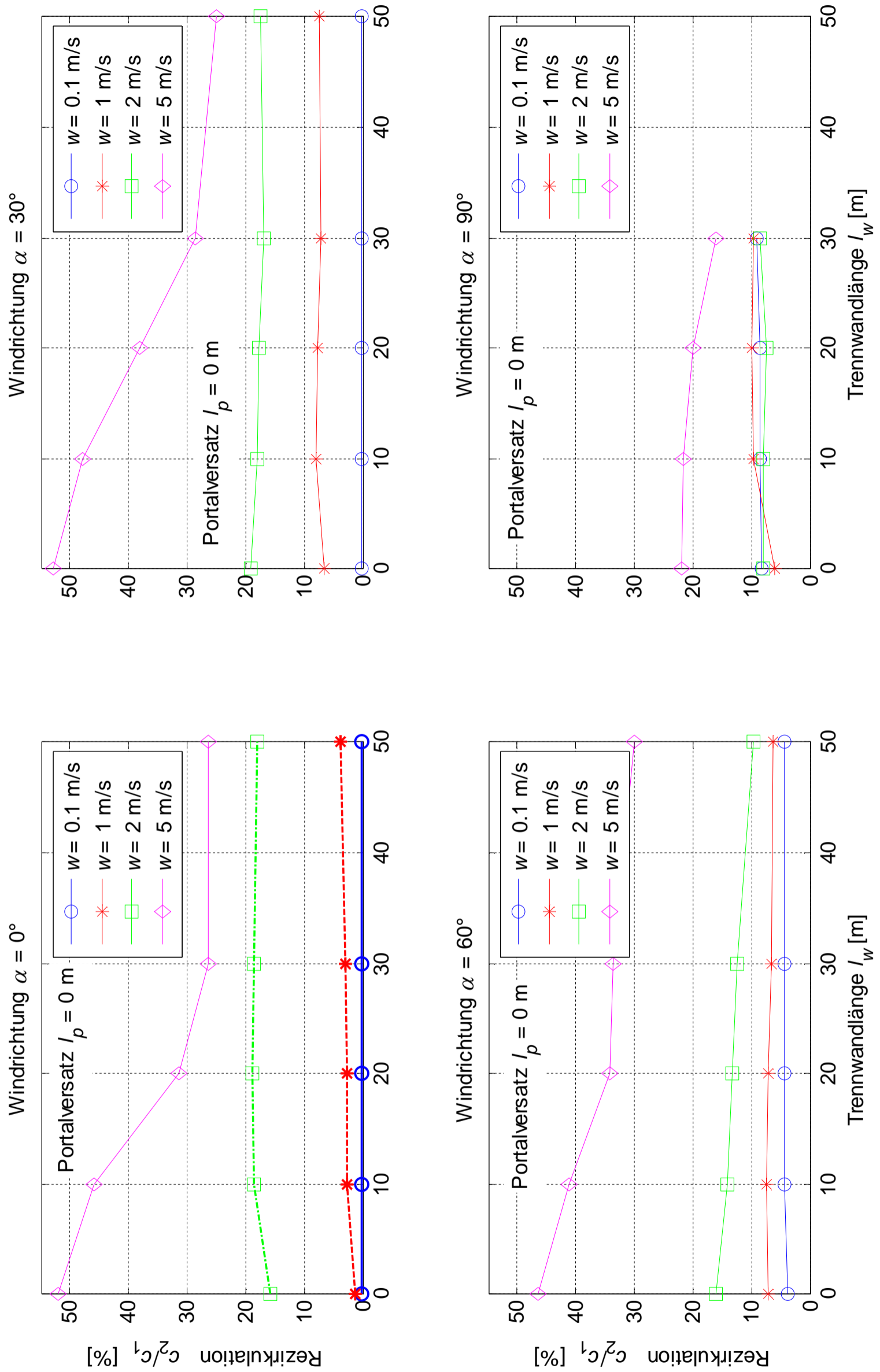


Abbildung 36: Portal-Portal-Rezirkulation: Rezirkulation gegen Trennwandlänge bei Portalversatz null in Abhängigkeit der Windrichtung (einzelne Diagramme) und der Windstärke (einzelne Kurven)

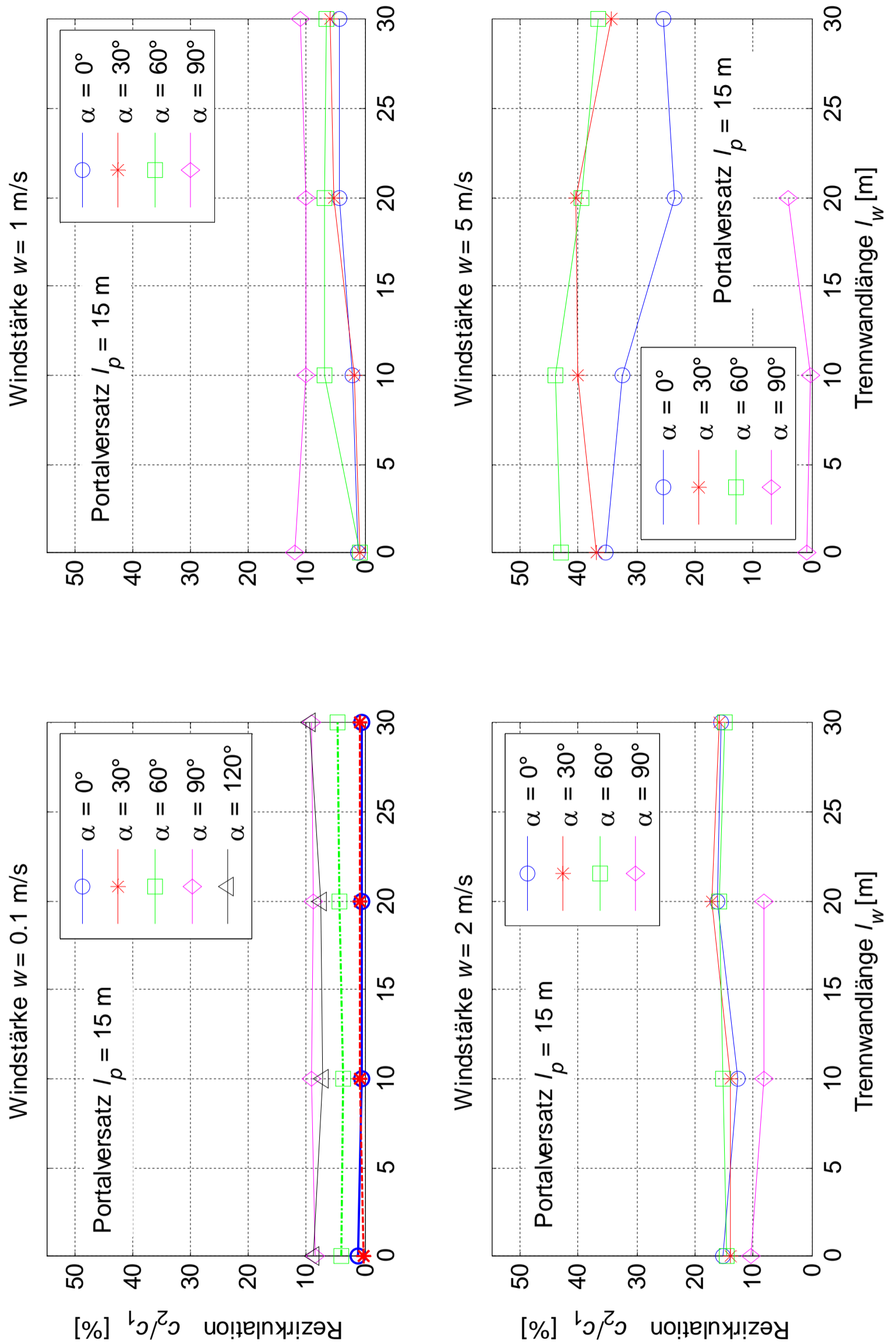


Abbildung 37: Portal-Portal-Rezirkulation: Rezirkulation gegen Trennwandlänge bei Portalversatz 15 m in Abhängigkeit der Windstärke (einzelne Diagramme) und der Windrichtung (einzelne Kurven)

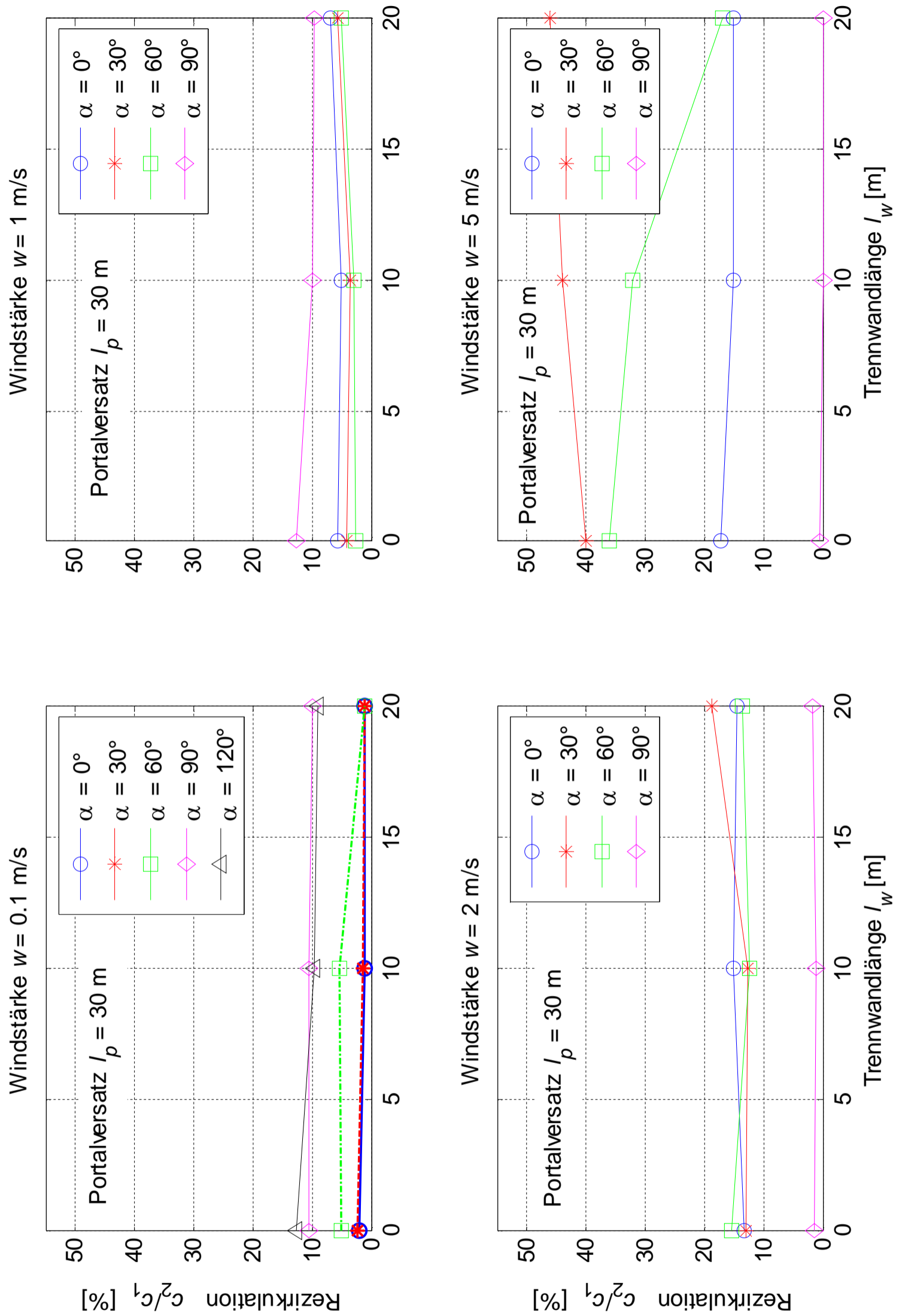


Abbildung 38: Portal-Portal-Rezirkulation: Rezirkulation gegen Trennwandlänge bei Portalversatz 30 m in Abhängigkeit der Windstärke (einzelne Diagramme) und der Windrichtung (einzelne Kurven)

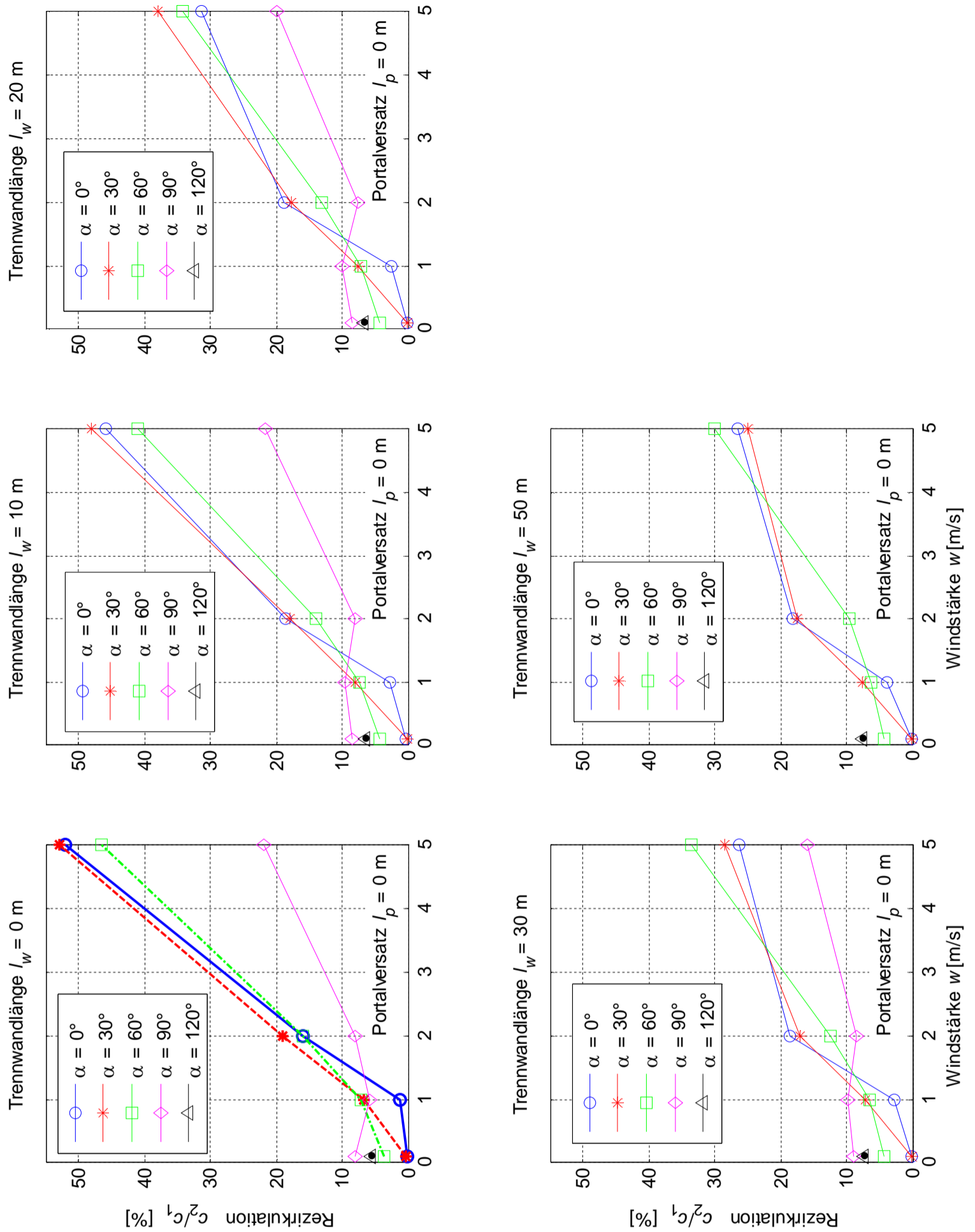


Abbildung 39: Portal-Portal-Rezirkulation: Rezirkulation gegen Windstärke bei Portalversatz null in Abhängigkeit der Trennwandlänge (einzelne Diagramme) und der Windrichtung (einzelne Kurven).

5.4 Synthese

5.4.1 Abgrenzung der Ergebnisse

Die CFD-Studie der Portal-Portal-Rezirkulation wurde

- für eine neutrale Atmosphäre und isotherme Bedingungen;
- mit einem logarithmischen Windprofil und Referenzgeschwindigkeit auf 10 m Höhe;
- in einem ebenen, offenen Gelände mit vereinzelt Bäumen und Gestrüpp

durchgeführt. Die Ergebnisse gelten für Rauch- und Schadstoffrezirkulation in den gegebenen geometrischen und atmosphärischen Grenzen. Die Ergebnisse gelten also nicht für Tunnel in einem Einschnitt oder einer Strassenschlucht. Sie gelten auch nicht für Portalströmungen wärmer als die Umgebung.

5.4.2 Beobachtungen

Die treibende Kraft für die Rezirkulation ist die Windstärke, vor der Windrichtung: Bei Wind mit Querkomponente ist die Rezirkulation umso stärker, als die Windstärke steigt. Bei Schwachwind zeigen die Trennwände keine Wirkung, unabhängig vom Portalversatz; erst bei starkem Wind und nur bei Portalversatz null ist eine Wirkung beobachtbar; dann erweist sich eine Trennwand von mindestens 30 m als optimale Länge. Ist der Wind gegen das Portal gerichtet, so ist die Rezirkulation bei Schwachwind stets höher als bei den Windrichtungen mit Querkomponenten; bei Portalversatz null steigt die Rezirkulation bei Starkwind an, jedoch viel schwächer als bei den andern Windrichtungen; in Fällen mit Portalversatz grösser null sinkt die Rezirkulation bei Starkwind ab.

Der Auftrieb hat bei heutigem Kenntnisstand bei grossen Temperaturdifferenzen ($\Delta\theta > 20^\circ$) einen positiven Einfluss auf die Rezirkulation. Eine Aussage für kleinere Temperaturdifferenzen ist bei heutigem Kenntnisstand nicht möglich.

Die ermittelten Rezirkulationswerte liegen im Licht von Kapitel 3.3 durchaus im kritischen Bereich, wie für das Ziel „Sichtweite 25 m“ gezeigt wird: Bei einem 30-MW-Brand liegt die kritische Rezirkulation bei Luftgeschwindigkeit 4 ms^{-1} in der Ereignisröhre gemäss Abbildung 18 zwischen 11 % und 30 %, je nachdem, ob die zu sehenden Objekte beleuchtet sind oder nicht. Diese Werte liegen gemäss der vorgehenden Diskussion auch bei Schwachwind im Bereich des Wahrscheinlichen. Die Portal-Portal-Rezirkulation ist also in der Regel nach der Methode gemäss Abbildung 18 kritisch.

5.4.3 Empfehlungen

Die Untersuchung bestätigt die Richtlinie ASTRA 13001 (2008), welche eine Trennwand von 30 m Länge mit Höhe des Fahrraums empfiehlt.

Die Portal-Portal-Rezirkulation ist also in der Regel nach der Methode gemäss Abbildung 18 kritisch. Daher ist eine Beurteilung der Situation an den jeweiligen Portalen nach Muster von Pöyry 2012 notwendig, insofern das Gefahrenpotential der Rezirkulation nicht mit anderen Massnahmen oder Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen unterbunden werden kann.

6 Kamin-Portal-Rezirkulation

6.1 Einleitung

Bei einem Brandereignis in einem Tunnel mit mechanischer Absaugung wird der aus dem Tunnel abgesaugte Rauch über einem in der Regel senkrechten Kamin in die Umgebung ausgestossen. Im schlimmsten Fall kann die ausgestossene Rauchfahne wieder durch die Tunnelportale eintreten, wodurch die Rettungsphase behindert wird (sowohl die Selbstrettung als auch die Rettungsarbeiten der Feuerwehr und Sanitäter durch die Tunnelportale). Die Menge dieser Rezirkulation wird hauptsächlich durch die Transport- und Diffusionsmechanismen in der Atmosphäre bestimmt, welche wiederum durch die meteorologischen Bedingungen wie Windstärke und -richtung, thermische Stabilität der umgebenden Atmosphäre und die lokalen geometrischen und topologischen Bedingungen wie Kaminort und Höhe, Austrittsgeschwindigkeit, angrenzende Bodenbedingungen geprägt werden.

Verschiedene analytische und numerische Methoden wurden in der Vergangenheit bereits eingesetzt, um das Phänomen des Rauchkurzschlusses bzw. der Rezirkulation allgemein zu begreifen und die Auswirkung verschiedener Faktoren auf die Rezirkulation zu verstehen. Im Gegensatz zu den Gauss'schen Modellierungsmethoden wird in der vorliegenden Arbeit ein verfeinertes CFD-Modell angewendet. Einer der Hauptgründe für die Anwendung von CFD ist die Begrenzung der Gauss'schen Modelle in z.B. der Parametrisierung komplexer turbulenter und diffusiver Prozesse sowie in der Erfassung der Geometrie von Kamin und Portal, welche eine Umlenkung der Strömung um 270° erfordert. Die Anwendbarkeit und Begrenzungen analytischer und Gauss'scher Modelle wird in verschiedenen Studien eingehend untersucht.

6.2 Das CFD-Modell

Die CFD-Modellierung wurde mit dem CFD Kode ANSYS CFX V.12.1 durchgeführt. ANSYS CFX ist ein verifizierter und gut validierter allgemein anwendbarer gewerblicher CFD-Kode, entwickelt von Ansys Inc. (Ansys 2009).

6.2.1 Das Berechnungsgebiet

Das Berechnungsgebiet wird als das modellierte geometrische Volumen definiert, das mittels CFD untersucht wird. Das Berechnungsgebiet wird als ein Zylinder mit senkrechter Achse, 600 m Durchmesser und 500 m Höhe definiert. Diese Abmessungen werden aufgrund verschiedener Empfehlungen aus der Literatur, wie zum Beispiel COST (2007), so gewählt, um jegliche Interferenz zwischen den Rändern des Gebiets (die Fernfeldströmung, hier der Wind) und der untersuchten Zone (Tunnelportale, Abluftkamin und nähere Umgebung) zu vermeiden.

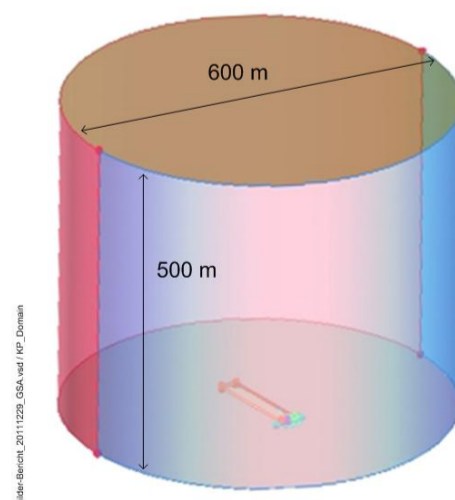


Abbildung 40: Form und Abmessungen des Berechnungsgebiets für die Parameterstudie Kamin-Portal

6.2.2 Das Gitter

Das Berechnungsgebiet ist in kleine Zellen mit endlichem Volumen eingeteilt. Dieser Vorgang, ein stetiges Berechnungsgebiet in kleine Zellen aufzuteilen, wird Gittererzeugung genannt. Die Transportgleichungen der Strömung werden dann iterativ in diesen Zellen gelöst, bis eine konvergierte Lösung erreicht wird. Als allgemeine Faustregel sollte der innere, untersuchte Bereich so detailliert wie möglich abgebildet werden. Das erfordert ein feines Gitter in diesem Bereich. Eine sanfte Wachstumsrate der Zellgrösse von diesem Gitterbereich zu den umgebenden, gröberen Gitterbereichen bestimmt sehr oft die Qualität des gesamten Gitters (vgl. Abbildung 41). Dies wiederum verlangt grosse Rechenleistung, sodass ein Kompromiss zwischen verfügbarer Rechenkapazität, Detaillierungsgrad und Ergebnisqualität eingegangen werden muss. Um die Ergebnisqualität zu garantieren, muss der Einfluss des Gitters untersucht werden, bevor die parametrischen Studien durchgeführt werden. Dies wird in einer Gitterunabhängigkeitsstudie vollzogen.

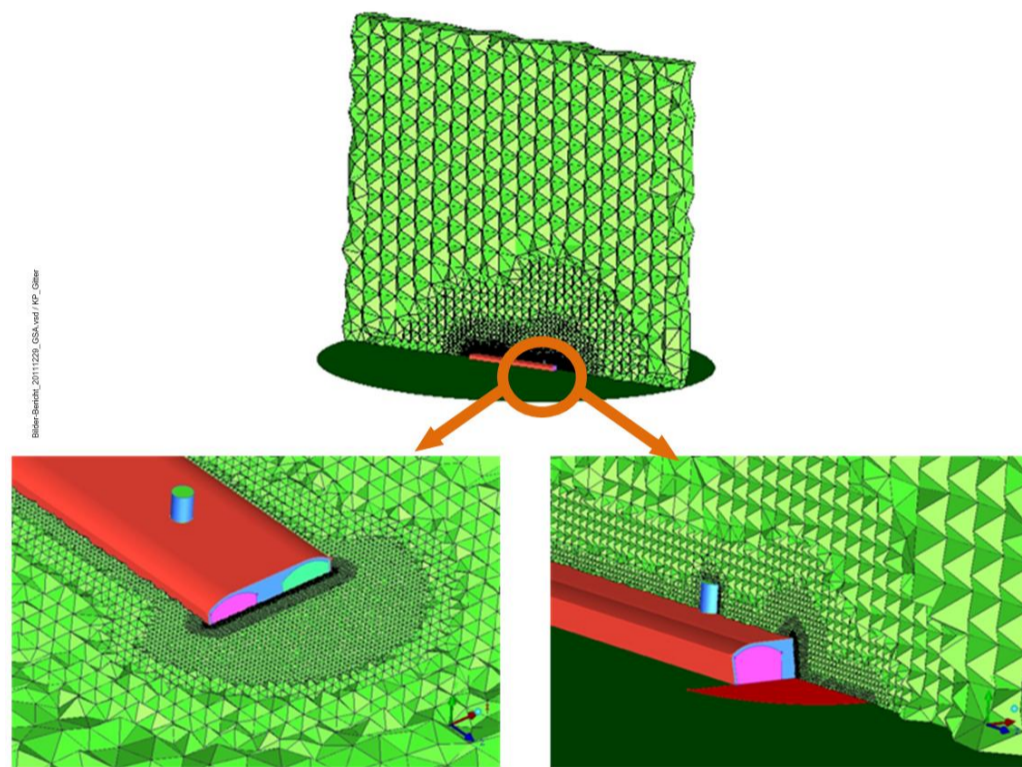


Abbildung 41: Gitterabstufung im Berechnungsgebiet für die Parameterstudie Kamin-Portal-Rezirkulation

In diesem Projekt wird eine Gitterunabhängigkeitsstudie mittels drei verschiedener Gittergrössen durchgeführt. Die unstrukturierten Gitter wurden für einen Kamin der Höhe 15 m über Portaloberkante in 20 m Entfernung vom Portal stromaufwärts generiert. Die Windstärke wurde auf $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ festgelegt und die Austrittsgeschwindigkeit aus dem Kamin auf $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurde das Konzentrationsverhältnis c_2 / c_1 zwischen der Rauchkonzentration am Kaminaustritt (c_1) und derjenigen am Portal (c_2) der einzelnen Gitter verglichen. Die drei Gitter sind in Abbildung 42 und die Ergebnisse in Abbildung 43 gezeigt. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurde das Gitter B für die Parameterstudie ausgewählt.

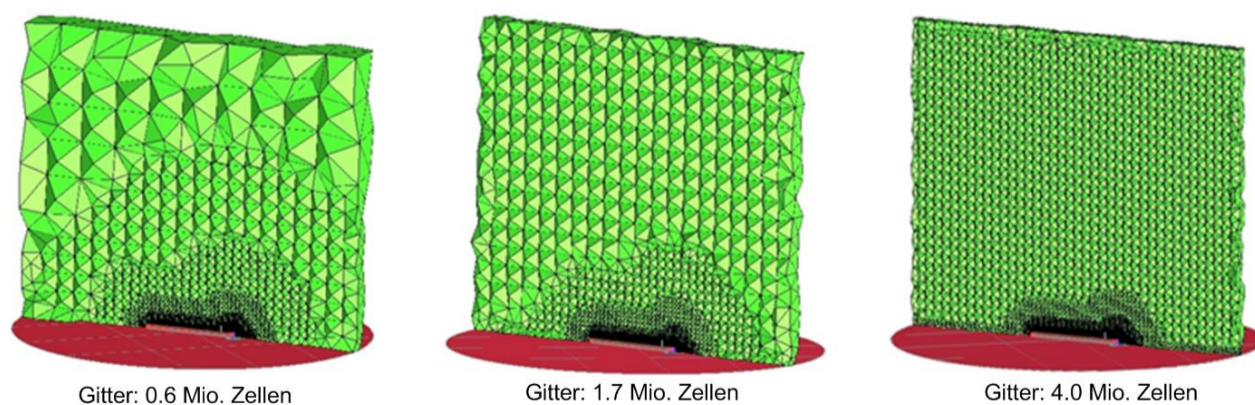


Abbildung 42: Schnitte durch drei verschiedene Gitter, benutzt für die Gitterunabhängigkeitsstudie der Parameterstudie Kamin-Portal-Rezirkulation

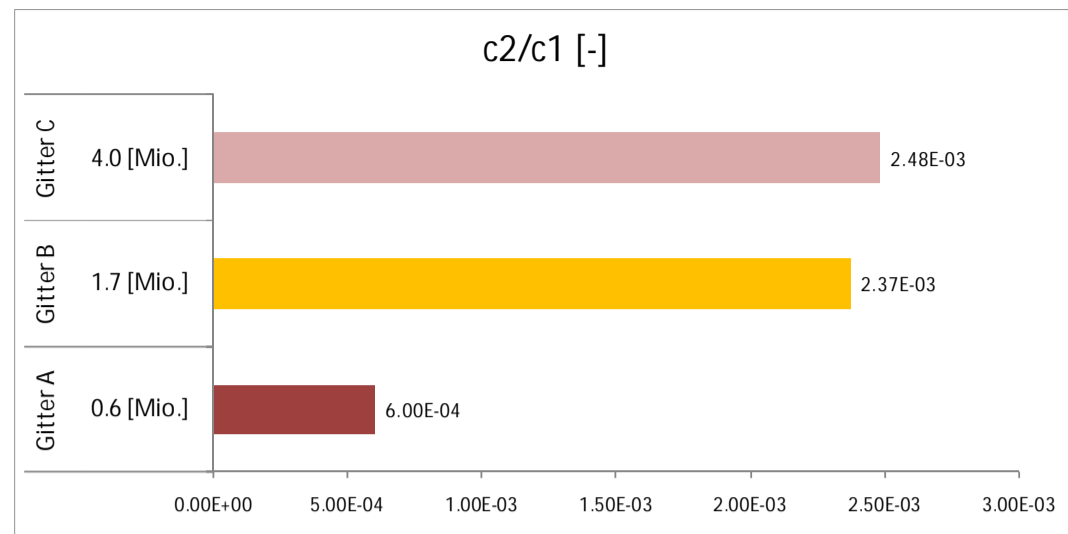


Abbildung 43: Ergebnis der Gitterunabhängigkeitsstudie der Parameterstudie Kamin-Portal-Rezirkulation

6.2.3 Die Simulationsparameter und Randbedingungen

Da sich die geometrischen und meteorologischen Bedingungen von Tunnel zu Tunnel grundlegend ändern können, liegt der Fokus dieser Studie auf der Untersuchung der die Rezirkulation beeinflussenden Faktoren und dem Vergleich mit verschiedenen geometrischen und meteorologischen Bedingungen. Infolge der Kosten der Simulation und der finanziellen und zeitlichen Begrenzungen können nicht alle geometrischen und meteorologischen Faktoren und deren Kombinationen in das Simulationssystem integriert werden. Es werden daher nur die folgenden Faktoren als Variablen berücksichtigt:

- der Abstand Kamin-Portal $l \in \{0, 20, 50, 100\}$ m;
- die Kaminhöhe $h \in \{0, 5, 15, 30\}$ m;
- die Austrittsgeschwindigkeit der Luft aus dem Kamin $v \in \{10, 15, 20, 25\}$ m·s⁻¹;
- die Windstärke $w \in \{0.1, 1.0, 2.0, 5.0\}$ m·s⁻¹.

Alle möglichen Kombinationen der oben genannten Variationen ergeben insgesamt 256 Simulationen. Als Test wurde ein weiterer, 257-ter Fall mit sehr grosser Kaminentfernung $l = 500$ m und sonst bereits vorhandene Werten $h = 15$ m, $v = 15$ m·s⁻¹, $w = 1$ m/s gerechnet.

Die Windrichtung wurde so gewählt, dass der Wind stets parallel zur Linie und in Richtung Kamin-Portal bläst. Der seitliche Abstand zwischen den ein- und ausströmenden Tunnelröhren (ca. 6.5 m im Schnitt) und deren Querschnittsfläche (55 m²) entspricht ge-läufigen Werten in Schweizer Tunneln. Die Strömungsgeschwindigkeit in beide Tunnelportale hinein wurde für alle Simulationen konstant gewählt und auf 0.5 m·s⁻¹ in der einen und 1.5 m·s⁻¹ in der anderen Röhre gesetzt. Diese Werte richten sich nach der Richtlinie ASTRA 13001 2008 für die Ereignislüftung.

Das Gelände ist als eine Ebene mit einer Haftbedingung modelliert. Diese erzwingt null Geschwindigkeit in der Zelle auf der Wandoberfläche. Der Wind tritt in das Gebiet durch eine Eintrittsrandbedingung (inlet) mit konstanter Windstärke in Betrag und Richtung über die gesamte Eintrittsfläche (Zylinderhalbschale) ein. Es wurde also kein atmosphärische Geschwindigkeitsprofil definiert. Die Haftbedingung am Boden bewirkt jedoch, dass sich allmählich ein solches Profil einstellt. Der Rauch tritt über eine Eintrittsbedingung am Kamin mit konstanter Austrittsgeschwindigkeit in Betrag und Richtung über die gesamte Eintrittsfläche (kreisrunde Fläche an der Kaminspitze) in das Gebiet ein. Der Volumenstrom des Luft-Rauch-Gemischs aus dem Kamin wurde für alle Simulationen gleich auf 165 m³s⁻¹ festgelegt. Das entspricht 3x dem Tunnelquerschnitt gemäss der Richtlinie ASTRA 13001 2008. Die Strömung verlässt das Gebiet über die beiden Portale und die Austrittsbedingung (Zylinderhalbschale), wie in Abbildung 44 dargestellt. Der obere Dekkel des Berechnungsgebiets ist als eine Öffnung (opening) modelliert. Der hydrostatische Druck im Gebiet wird im Programm aufgrund der Höhen und der Erdbeschleunigung berechnet.

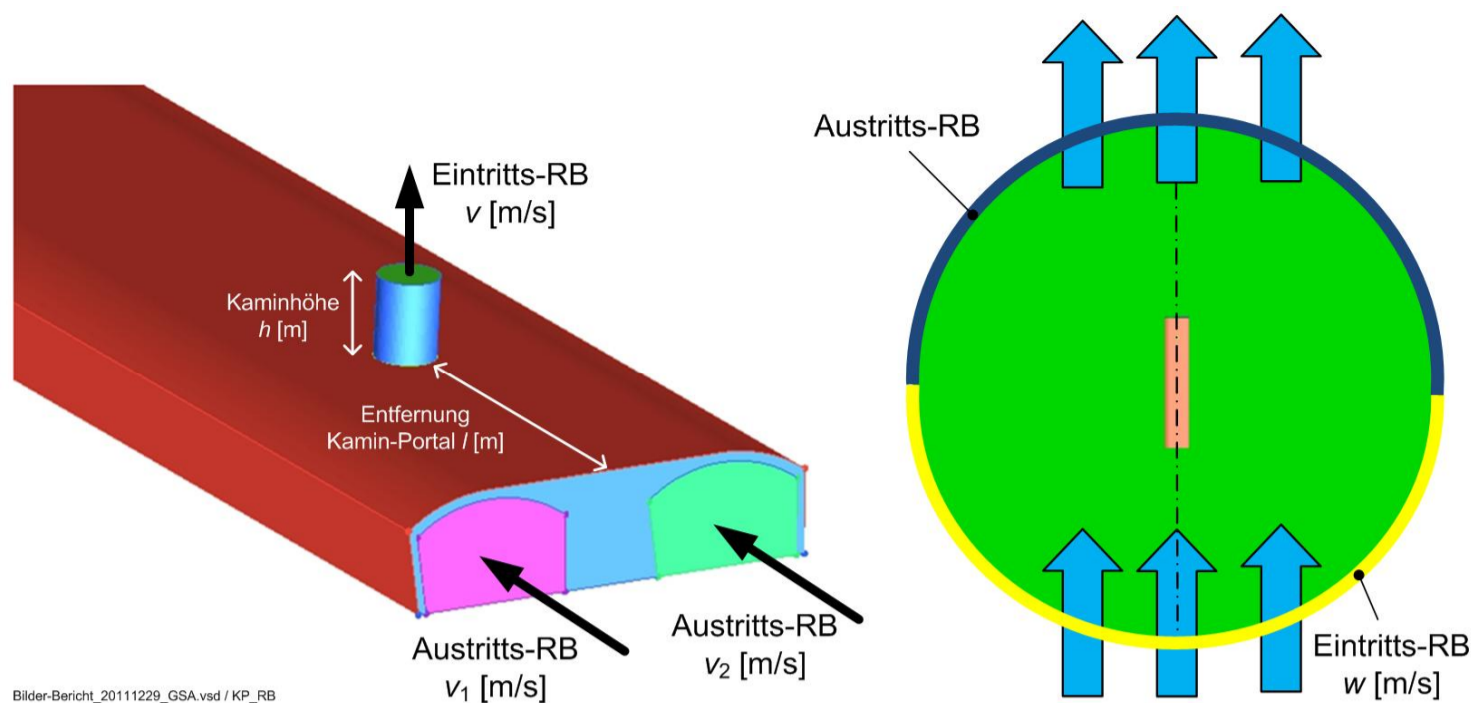


Abbildung 44: Bildliche Darstellung der verschiedenen Randbedingungen

Eine zusätzliche Transportgleichung wird für eine nicht reaktive, skalare Grösse, die den aus dem Kamin austretenden Rauch darstellt, gelöst. Die spezifische Massenkonzentration dieser zusätzlichen Variablen wurde ebenfalls für alle Simulationen gleich gesetzt und derart eingestellt, dass sich ein effektiver Rauchstrom von $80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ aus dem Kamin einstellt. Diese Zahl beruht auf einer Empfehlung der PIARC (1999). Der Transport einer skalaren Variablen ist sowohl ein konvektiver als auch ein diffusiver Prozess und erfordert folglich die Definition eines kinematischen Diffusionskoeffizients. Diese Grösse beschreibt, wie schnell die skalare Grösse durch das umgebende Medium unter Ausschluss der Konvektion diffundieren würde. In der vorliegenden Studie wird diese Grösse für die Diffusion von Rauch in Luft auf $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ festgelegt, gemäss den Richtlinien aus dem ANSYS-CFX-Handbuch.

Annahmen

Für die dargestellten Ergebnisse wurden ferner die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Strömung ist isotherm.
- Die Dichte des Rauchs ist gleich der Dichte der Luft.
- Der Boden wird mit einer Haftbedingung beaufschlagt, d.h., dass die Strömungsgeschwindigkeit an der Wandoberfläche gleich null ist.

Da der Rand des Gebiets ca. 300 m weit von der Tunnelgeometrie liegt, erlaubt dies die Entwicklung eines Geschwindigkeitsprofils des Winds.

6.2.4 Das Turbulenzmodell

Es gelten die allgemeinen Beschreibungen von Kapitel 5.2.5, ausgenommen das Turbulenzmodell, das nachfolgend beschrieben wird.

In der vorliegenden Studie zur Rezirkulation von Kamin zu Portal wurde das weitverbreitete k - ϵ -Turbulenzmodell verwendet. Dieses Modell berücksichtigt die Varianz der Geschwindigkeitsfluktuationen und die Dissipationsrate dieser Geschwindigkeitsfluktuationen, indem zwei zusätzliche Transportgleichungen gelöst werden, eine für die turbulente kinetische Energie k und eine für die turbulente Dissipationsrate ϵ . Dieses Modell ist für industrielle und freie Strömungen in zahlreichen Studien validiert worden (vgl. z.B. Solazzo et al. 2007, Huser et al. 1997 und Hargreaves & Wright 2007).

6.2.5 Die numerischen Parameter

Für eine CFD-Berechnung werden zahlreiche Eingaben benötigt. Einige dieser Parameter beeinflussen die Strömungsphysik direkt, während andere rein numerisch sind und dazu gebraucht werden, eine konvergierte Lösung zu erreichen und numerische Diskrepanzen zu vermeiden. Einige der wichtigsten Eingabeparameter dieser Simulationen sind weiter unten beschrieben.

Der Solver

Der ANSYS-CFX-Solver v. 12.1 wird für die vorliegende Studie verwendet.

Die stationäre Simulation

In der vorliegenden Arbeit wird eine stationäre Strömung betrachtet; dies entspricht einem voll ausgebildeten konstant wehenden Wind, einer konstanten Brandleistung und einem konstanten Betrieb der Ereignislüftung und Rauchabsaugung aus dem Tunnel. Es gilt dazu die allgemeine Beschreibung aus Kapitel 5.2.6.

Die Zeitskalen

Es gilt dazu die allgemeine Beschreibung aus Kapitel 5.2.6.

Das Diskretisierungsschema

Das gleiche Diskretisierungsschema wie in der Portal-Portal-Studie wurde auch hier angewendet (vgl. Kapitel 5.2.6).

Das Konvergenzkriterium

In der vorliegenden Arbeit wird das Konvergenzkriterium wie folgt definiert: Die Konvergenz ist dann erreicht, wenn das Konzentrationsverhältnis c_2/c_1 über mindestens 150 Iterationen konstant bleibt und die Residuen unter 10^{-4} fallen. Diese Kriterien werden auf der Grundlage der verfügbaren Richtlinien COST 2007 und ERCOFTAC festgelegt. Es gilt dazu die allgemeine Beschreibung aus Kapitel 5.2.6.

Die verfügbare Rechenleistung

Es wurden 4 Prozessoren auf einem 2.6-GHz-Intel-Xeon-Cluster mit insgesamt 8 GB RAM parallel verwendet. Die Dauer einer Simulation bis zur Erreichung des Konvergenzkriteriums schwankte von Fall zu Fall zwischen minimal 2 Stunden und maximal 2 Tagen.

6.2.6 Die Simulationenmethodik

Die verschiedenen geometrischen Variationen und ihre Kombinationen wurden mit den Gitterparametern aus der Gitterunabhängigkeitsstudie unter Anwendung der ANSYS-ICEM-CFD-Software vernetzt. Diese Gitter wurden dann in die Software ANSYS CFX Pre importiert, wo die verschiedenen oben definierten numerischen Parameter und Randbedingungen definiert wurden. Jeder Fall wird bis zur Erreichung eines bestimmten Konvergenzgrads mit dem ANSYS-CFX-Solver gerechnet. Nachdem die Simulation beendet ist, werden die Ergebnisse mit dem ANSYS-CFX-Nachlaufrechnungswerkzeug analysiert. Die Rezirkulationsrate c_2/c_1 wird wie oben definiert erhalten. Die gesammelten Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten untersucht.

6.3 Die Auswertung

Das Ziel der Auswertung ist, die Abhängigkeiten der Rezirkulation von den Parameterwerten zu erkennen, Gesetzmässigkeiten zu formulieren und praktische Empfehlungen für die Kaminpositionierung und -gestaltung abzugeben. Es sind insgesamt 257 Simulationen durchgeführt worden. Diese grosse Datenmenge lässt drei Auswertungsmethoden zu:

- Die Einzelauswertung der Daten. Einzelne Werte werden herausgelesen und ausgewertet. Es ermöglicht, einige Tendenzen zu erkennen.

- Die statistische Auswertung der Daten mit Histogrammen der Parameterwerte. Diese Methode erlaubt es, den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Rezirkulation zu erkennen.
- Die Auswertung mit dimensionslosen Kennzahlen. Diese Kennzahl besteht aus den freien Parametern der Aufgabenstellung. Diese Methode, wenn überhaupt möglich, erlaubt es, die Rezirkulation in Abhängigkeit der Parameter im Verbund darzustellen. Sie ermöglicht es, Grenzwerte für diese Kennzahl festzulegen, in denen sich die Auslegung neuer Anlagen bewegen sollte, sowie bestehende Anlagen bezüglich ihres Rezirkulationsverhaltens zu beurteilen.

Die folgenden Kapitel beschreiben diese Auswertungen.

6.3.1 Die allgemeinen Tendenzen

Die Parameterwerte der Studie sind die folgenden:

- der Abstand Kamin-Portal $l \in \{0, 20, 50, 100, 500\}$ m;
- die Kaminhöhe $h \in \{0, 5, 15, 30\}$ m;
- die Austrittsgeschwindigkeit der Luft aus dem Kamin $v \in \{10, 15, 20, 25\}$ m·s⁻¹;
- die Windstärke $w \in \{0.1, 1.0, 2.0, 5.0\}$ m·s⁻¹.

Für den Abstand Kamin-Portal $l = 500$ m wurde nur eine einzige Simulation durchgeführt, sodass sie aus der statistischen Auswertung fällt. Für alle anderen Parameterwerte wurden jeweils mindestens 64 Fälle berechnet, insgesamt 257 Fälle (inkl. dem Fall mit $l = 500$ m).

Die erhaltenen Werte der Rezirkulation streuen im Intervall $r \in [10^{-12}, 10^1]$ %. Dass solche tiefen Werte in der Wirklichkeit zu kaum mehr messbaren Konzentrationen führen können, wird für die Diskussion der Ergebnisse vorerst ausgelassen. Eine grobe Betrachtung der Daten zeigt bereits, dass die Rezirkulation tendenziell mit der Entfernung Kamin-Portal zunimmt, mit der Kaminhöhe abnimmt, mit der Austrittsgeschwindigkeit abnimmt und mit der Windstärke zunimmt. Die erste Tendenz, nämlich dass die Rezirkulation mit der Kamin-Portal-Entfernung zunimmt, widerspricht den allgemeinen Erwartungen. Die anderen Beobachtungen scheinen intuitiv nachvollziehbar.

6.3.2 Die Einzelauswertung

Um die im letzten Kapitel beschriebene Tendenz der Daten bezüglich der Zunahme der Rezirkulation mit der Entfernung vom Portal genauer zu untersuchen, wurde der 257-te und letzte Rechenfall bei $l = 500$ m durchgeführt, mit den mittleren Werten $h = 15$ m, $v = 15$ m·s⁻¹, $w = 1$ m·s⁻¹ der weiteren Parameter. Die Ergebnisse sind in Abbildung 45 dargestellt: Die Rezirkulation steigt in den ersten 50 Metern ab dem Portal stark an, gipfelt in den verfügbaren Daten bei 100 m und sinkt bis 500 m auf ein vergleichbares Niveau wie bei 50 m ab. Das gedachte Maximum dieser Verteilung muss irgendwo zwischen 100 und 500 m liegen. Die stärkste Zunahme der Rezirkulation liegt zwischen 20 m und 50 m.

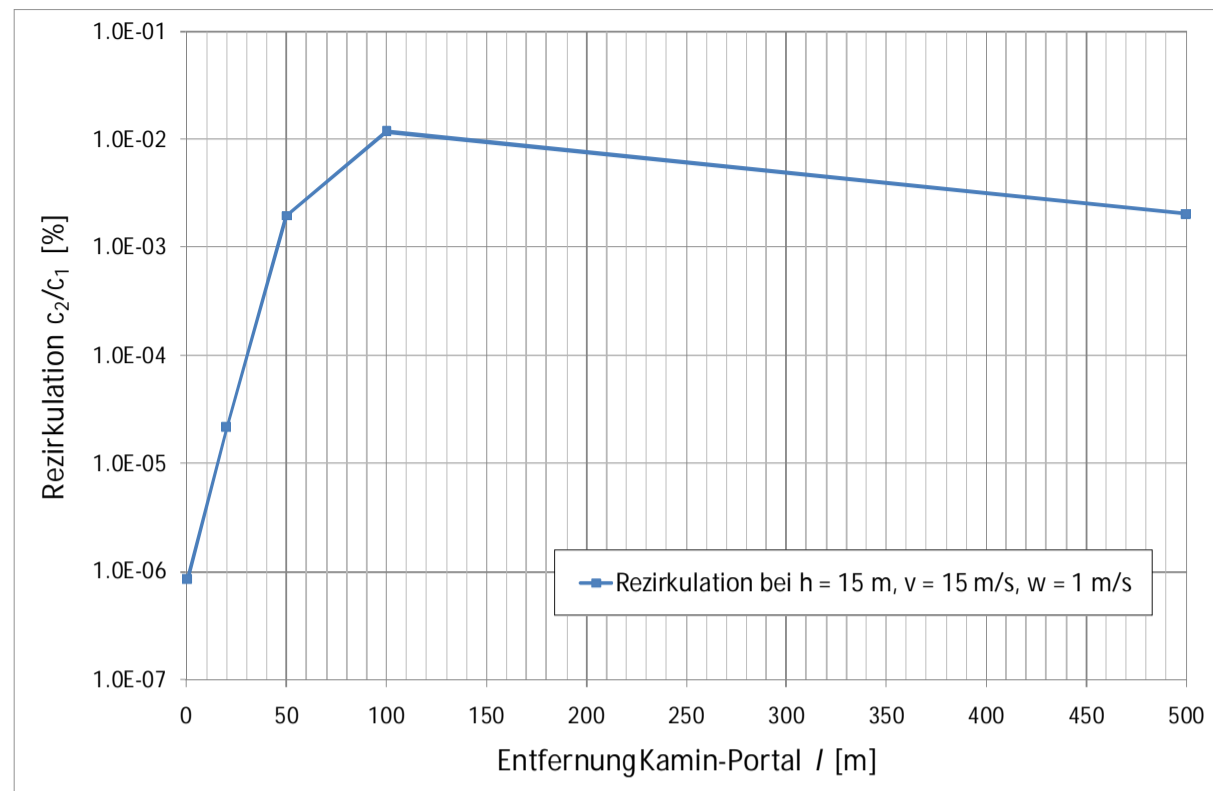


Abbildung 45: Rezirkulation in Abhängigkeit der Kamin-Portal-Entfernung bei gleichbleibenden Werten $h = 15 \text{ m}$, $v = 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $w = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Dazu drängen sich folgende Bemerkungen auf:

- Diese Werte sind Simulationswerte. Die niedrigsten zwei gerechneten Werte liegen in der Realität wahrscheinlich an der Grenze der Messbarkeit.
- Die Simulationen bilden eine neutrale Atmosphäre auf einer Ebene nach. Es sind also keine topographischen Effekte nachgebildet, die mittlere Windstärke weht stets in der Waagrechten.
- Die Ausbildung einer Rauchfahne aus einem Kamin in neutraler Atmosphäre mit Wind ist aus der Gauss'schen Dispersionsmodellierung z.B. nach Turner 1994 bekannt. Nach einer Steigphase flacht die Fahne immer mehr ab, bis sie auf einer bestimmten Höhe verharrt und vom Wind davongetragen wird. Gleichzeitig weitet sich die Fahne infolge turbulenter Diffusion in der Atmosphäre unter gleichzeitiger Abnahme der Konzentration in ihrer Kernzone immer mehr aus. Schliesslich wird die Fahne so weit aufgeweitet sein, dass sie den Boden berührt. Dieses Modell kann die Interaktion der Fahne mit einer massiven Ansaugung, wie sie durch die Tunnelportale erfolgen kann, nicht beschreiben. Es ist aber hilfreich, um einige in der Auswertung beobachtete Phänomene zumindest qualitativ zu beschreiben (vgl. dazu die Beschreibung in Kapitel 2.4.6).

Folgende Interpretation der Ergebnisse ist möglich: Bei niedrigen Kamin-Portal-Entfernungen (0 und 20 m) ist die Interaktion zwischen der Rauchfahne aus dem Kamin und den Portalen wegen dem noch starken Impuls des austretenden Strahls aus dem Kamin verschwindend. Wie oben beschrieben, flacht die Fahne mit steigender Entfernung von der Quelle ab und weitet sich zugleich auf, bis sie den Boden berührt. Dieses Phänomen wird bei den berechneten Punkten bei 100 m und 500 m Entfernung vermutet, wodurch auch der nur schwache Abfall der Rezirkulation trotz des massiven Entfernungsanstiegs erklärt wird: Zwischen 100 m und 500 m findet nur noch Verdünnung einer am Boden schleichenden Rauchfahne statt. Die Abbildung 46 veranschaulicht diese Tatsache.

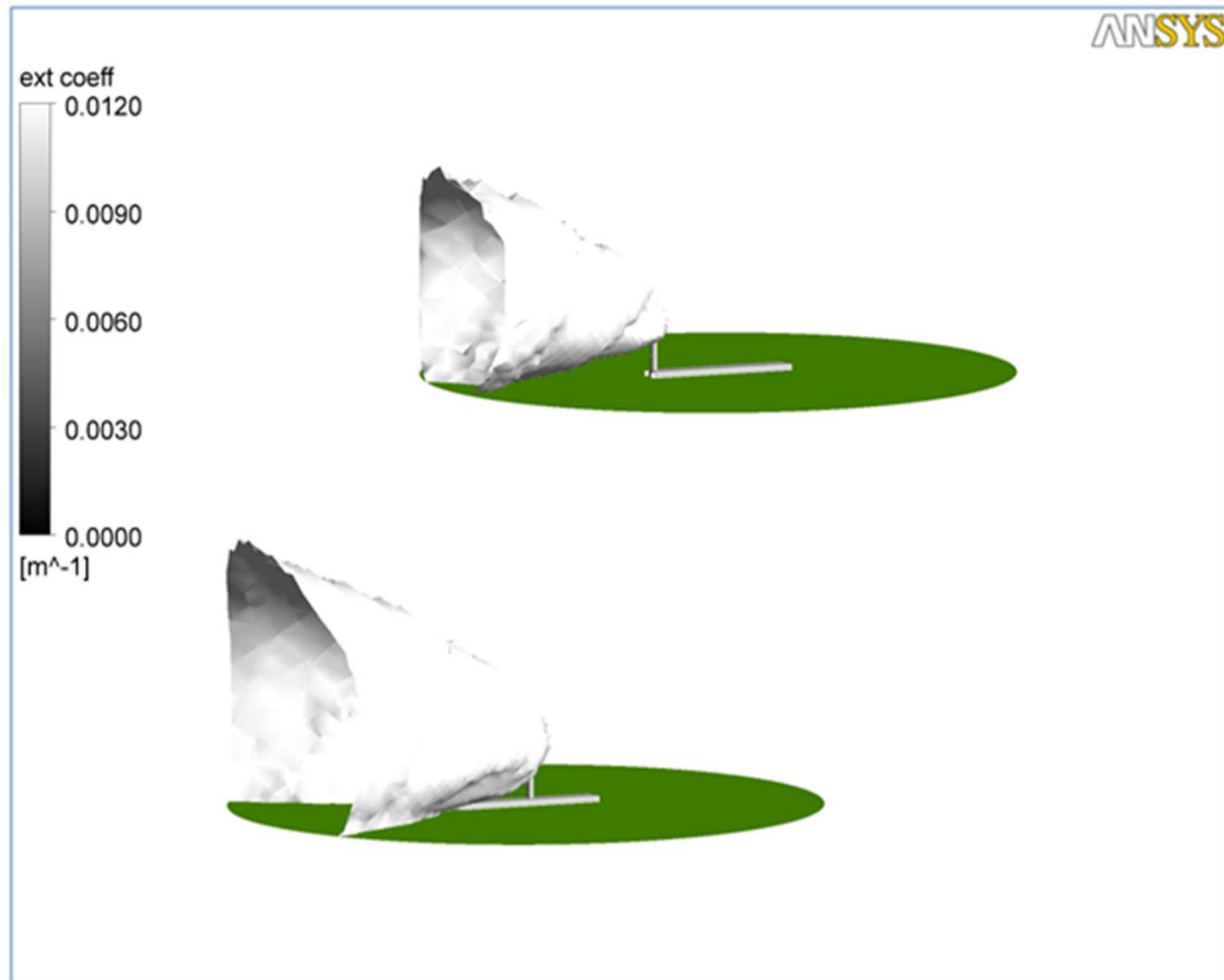


Abbildung 46: Rauchfahne bei zwei verschiedenen Entfernungen Kamin-Portal. Die Rauchfahnen werden als Isofläche der Extinktion dargestellt. Beide dargestellten Fälle sind mit $h = 15 \text{ m}$, $v = 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und $w = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ gerechnet. Die Entfernung beträgt beim oberen Bild $l = 0 \text{ m}$ und beim unteren $l = 75 \text{ m}$.

Diese Erklärungen legen den Schluss nahe, dass der Kamin so nahe am Portal, die Kaminhöhe so hoch und die Ausstosseschwindigkeit so gross gewählt werden sollten, dass die Rauchfahne nicht mit den Portalen interagieren kann.

6.3.3 Die Histogramme der Parameterwerte

In der Abbildung 47 sind die Histogramme der vier Parameter in vier Balkendiagrammen gezeigt. Jedes Balkendiagramm enthält vier Histogramme für jeden Wert des jeweiligen Parameters, ausgenommen $l = 500 \text{ m}$. Die Abszisse der Balkendiagramme besteht aus 13 Intervallen der Rezirkulationswerte. Jedes Intervall ist eine Grössenordnung weit; das erste reicht von 10^{-12} bis 10^{-11} , das zweite von 10^{-11} bis 10^{-10} usw., bis zum 13. Intervall von 1 bis 10. Die Einheit der Abszisse ist in Prozent. Die Achse ist mit den Potenzen beschriftet. Die Balken in einem Intervall zeigen die Anzahl Rezirkulationswerte in diesem Intervall für den jeweiligen Parameterwert an.

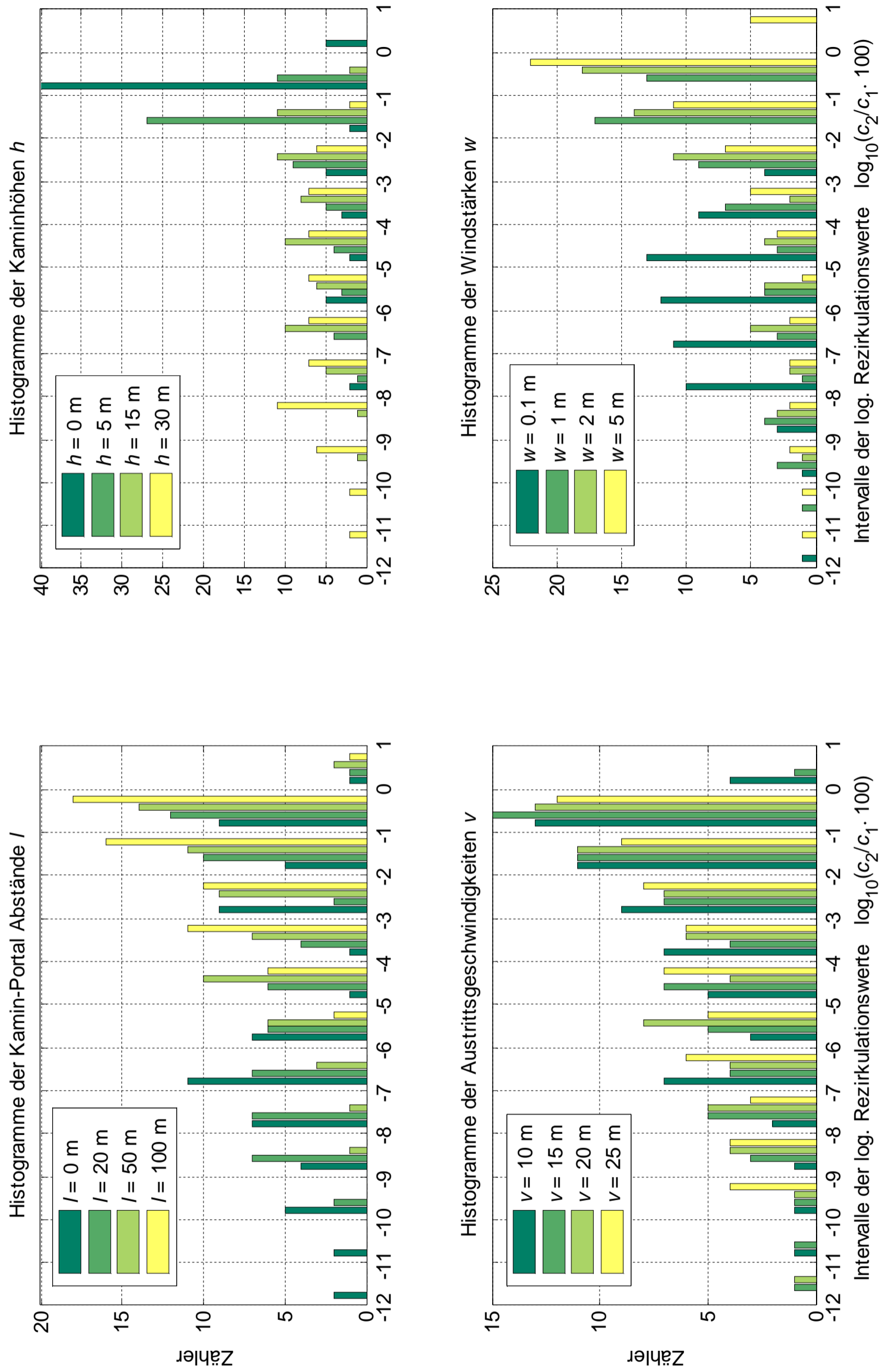


Abbildung 47: Kamin-Portal-Rezirkulation: Histogramme der Verteilung der Rezirkulation in Abhängigkeit der Parameterwerte der Studie, nämlich Entfernung Kamin-Portal, Kaminhöhe, Austrittsgeschwindigkeit aus dem Kamin und Windstärke

Die vier Balkendiagramme werden im Folgenden einzeln besprochen:

Die Histogramme der Kamin-Portal-Abstände l

Die Histogramme zeigen, dass die Verteilungen mit steigendem Kamin-Portal-Abstand schmaler werden und höhere Werte der Rezirkulation annehmen. Während sich die Rezirkulationswerte, die dem Abstand $l = 0$ m zugeordnet sind, über den gesamten Wertebereich erstrecken, so erstrecken sich die Rezirkulationswerte, die dem Abstand $l = 100$ m zugeordnet sind, nur über den Wertebereich $[10^{-6}, 10^1]$ %. Diese Tendenz wird auch in den Mittelwerten der Verteilungen sichtbar, wie sie in Tabelle 25 festgehalten sind: Die Mittelwerte der den Abständen zugeordneten Werte in Tabelle 25 steigen mit steigenden Abständen an. Die relativen Abstände der Mittelwerte bestätigen die bereits gemachte Beobachtung zu Abbildung 45, dass der stärkste Zuwachs der Rezirkulation zwischen 20 m und 50 m stattfindet. Zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Mittelwert liegt ein Faktor ca. 2.

Abstand Kamin-Portal l	$l = 0$ m	$l = 20$ m	$l = 50$ m	$l = 100$ m
Mittelwert der Rezirkulation \bar{r}	0.0795 %	0.0813 %	0.1441 %	0.1466 %
Standardabweichung	0.2578 %	0.2014 %	0.4460 %	0.2998 %
rel. Zuwachs der Rezirkulation	-	2.2 %	44.0 %	1.7 %

Tabelle 25: Mittelwerte und Standardabweichungen der den Kamin-Portal-Abständen zugeordneten Rezirkulationswerte

Dies legt den vorläufigen Schluss nahe, dass der Kamin möglichst näher als 20 m am Portal stehen sollte.

Die Histogramme der Kaminhöhen h

Die Histogramme zeigen eine deutliche Aufteilung der Verteilungen in sich überlappende Zonen: Die Verteilung der Höhe 0 m erstreckt sich über den hohen Wertebereich $[10^{-8}, 10^1]$ % mit einer massiven Häufung im Intervall $[10^{-1}, 10^0]$ %, die regelmässigeren Verteilung der Höhe 30 m über den niedrigeren Wertebereich $[10^{-12}, 10^{-1}]$ %. Die Verteilungen der niedrigen Höhen 0 m und 5 m besitzen starke Häufungen in bestimmten Intervallen, die Verteilungen der grossen Höhen 15 m und 30 m verlaufen ziemlich glatt.

Kaminhöhe h	$h = 0$ m	$h = 5$ m	$h = 15$ m	$h = 30$ m
Mittelwert der Rezirkulation \bar{r}	0.3513 %	0.0859 %	0.0132 %	0.0011 %
Standardabweichung	0.5338 %	0.1799 %	0.0397 %	0.0039 %
rel. Zuwachs der Rezirkulation	-	-309 %	-551 %	-1100 %

Tabelle 26: Mittelwerte der den Kaminhöhen zugeordneten Rezirkulationswerte

Die Mittelwerte der Verteilungen gemäss Tabelle 26 bestätigen die Tendenz der Histogramme: Mit steigender Kaminhöhe sinkt die Rezirkulation massiv ab, am stärksten zwischen den Höhen 15 m und 30 m. Zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Mittelwert liegt ein Faktor ca. 300. Dies legt den Schluss nahe, dass die Kamine möglichst höher als 15 m über Portaloberkante sein sollten.

Die Histogramme der Austrittsgeschwindigkeiten v

Die Histogramme zeigen wenig Unterschiede voneinander. Tendenziell liegen die Verteilungen der niedrigen Austrittsgeschwindigkeiten bei höheren Rezirkulationswerten als die Verteilungen der höheren Austrittsgeschwindigkeiten.

Austrittsgeschwindigkeit v	$v = 10$ m/s	$v = 15$ m/s	$v = 20$ m/s	$v = 25$ m/s
Mittelwert der Rezirkulation \bar{r}	0.2171 %	0.1060 %	0.0706 %	0.0563 %
Standardabweichung	0.5408 %	0.2381 %	0.1391 %	0.1216 %
rel. Zuwachs der Rezirkulation	-	-105 %	-50 %	-25 %

Tabelle 27: Mittelwerte der den Austrittsgeschw. zugeordneten Rezirkulationswerte

Die Mittelwerte der Verteilungen gemäss Tabelle 27 bestätigen diese nur leichte Verschiebung zwischen den Verteilungen: Während zwischen dem niedrigsten und höchsten Mittelwert der Histogramme der Kaminhöhen ein Faktor 300 liegt (vgl. Tabelle 26), liegt zwischen den Mittelwerten der Histogramme der Austrittsgeschwindigkeiten nur ein Faktor ca. 4.

Histogramme der Windstärken w

Die Verteilung zur verschwindenden Windstärke $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ hebt sich deutlich von den anderen ab: Ihr Wertebereich liegt im Intervall niedriger Rezirkulationen zw. $[10^{-12}, 10^{-2}] \%$ mit einer deutlichen Häufung im Intervall $[10^{-8}, 10^{-3}] \%$. Die Verteilung zur maximalen Windstärke $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ deckt den gesamten Wertebereich ab, wobei es allein die höchsten Rezirkulationswerte zwischen 1 und 10 besetzt. Die Verteilungen mit nicht verschwindender Windstärke weisen eine deutliche Häufung bei hohen Werten der Rezirkulation im Intervall $[10^{-3}, 10^0] \%$ auf.

Windgeschwindigkeit w	$w = 0.1 \text{ m/s}$	$w = 1.0 \text{ m/s}$	$w = 2.0 \text{ m/s}$	$w = 5.0 \text{ m/s}$
Mittelwert der Rezirkulation \bar{r}	0.0003 %	0.0558 %	0.0842 %	0.3105 %
Standardabweichung	0.0009 %	0.0977 %	0.1223 %	0.5647 %
rel. Zuwachs der Rezirkulation	-	99 %	34 %	73 %

Tabelle 28: Mittelwerte der den Windstärken zugeordneten Rezirkulationswerte

Die Mittelwerte der Verteilungen in Tabelle 28 bestätigen diese Beobachtung: Bei verschwindendem Wind verschwindet auch die Rezirkulation, sodass der relative Zuwachs der Rezirkulation bei einsetzendem Wind fast 100 % beträgt. Danach wächst der Mittelwert der Rezirkulation mit steigender Windstärke an, ganz besonders zwischen $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ und $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tendenziell wird also die Rezirkulation mit steigender Windstärke grösser. Dies ist eine Folge der Abhängigkeit von Windstärke und Turbulenzgrad der Luft.

6.3.4 Die Auswertung mit dimensionsloser Kennzahl

Kennzahl

Eine zweckmässige Darstellung der Ergebnisse besteht darin, die Rezirkulation gegen eine Kennzahl darzustellen. Diese Kennzahl wird mit den Regeln der Dimensionsanalyse ermittelt. Das Ziel ist, eine möglichst enge und lineare Darstellung der Daten zu ermitteln. Diese Kennzahl soll die variierten Parameter der Studie l , h , v und w enthalten. Eine mögliche dimensionslose Kennzahl ist:

$$\Pi = \frac{h^2}{l \cdot d} \cdot \left(1 - e^{-\frac{l}{d}}\right)^2 \cdot \left(\frac{v}{w}\right)^{0.3} \quad [-] \quad \text{Gleichung 31}$$

Der darin erscheinende Kamindurchmesser d ist kein freier Parameter, sondern wird über die Austrittsgeschwindigkeit mit der Beziehung

$$\dot{V}_l = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot v \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \text{Gleichung 32}$$

bestimmt, wobei $\dot{V}_l = 165 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ist. Sie wurde empirisch ermittelt. Sie verknüpft geometrische Verhältnisse und das Impulsverhältnis der Strömungen miteinander. Der Faktor $(1 - \exp(-l/d))$ ist nicht verstanden worden. Er hat eine bündelnde Wirkung auf die Daten, sodass er hier eingeführt wurde. Der Exponent 0.3 des Geschwindigkeitsverhältnisses ist analog zum Exponenten in der Formel für die Freistrahllachse in STUVA (1978) (vgl. Kapitel 2.4.6). Damit können die vorhandenen Daten in weiten Bereichen für Windstärken grösser gleich $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in engen Zusammenhang gebracht werden. Für Schwachwind ist diese Zahl jedoch nicht geeignet.

Datenauswertung

Die Auswertung der Simulationen mit dieser Kennzahl stellt die Datenpunkte, exklusive der Datenpunkte bei Windstärke $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, in der Abbildung 48 doppellogarithmisch dar. Bei $w = 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ folgen die Daten einer anderen Gesetzmässigkeit, die nicht ermittelt werden konnte. Es ist die konzentrationsbezogene Rezirkulation $r = c_2 / c_1$ [%] gegen die dimensionslose Kennzahl aufgetragen. Zur Berechnung von Π wurden zu den in Abbildung 48a dokumentierten Werten der Kaminabstände l bzw. die Kaminhöhe h jeweils der halbe Kamindurchmesser bzw. der halbe Tunneldurchmesser hinzuaddiert. Damit wurden 0-Werte verhindert, die eine Deutung der Ergebnisse verunmöglicht hätten.

Die berechneten Rezirkulationen decken den Bereich von 3 % bis $3\text{e-}12$ % ab. Die mit der Kennzahl dargestellten Daten zeigen eine gute Bündelung bei niedriger Rezirkulation und eine steigende Streuung bei höheren Rezirkulationswerten. Das legt die Vermutung nahe, dass verschiedene Kennzahlen oder Gesetzmässigkeiten für verschiedene Wertebereiche der Rezirkulation oder der Parameter eine bessere Bündelung der Daten ermöglichen würden. Diese Kennzahl bzw. Gesetzmässigkeit wurde aber nicht gefunden. Ferner weisen die Daten einige Ausreisser aus.

Nichtsdestotrotz lassen sich bereits mit dieser Darstellung aussagekräftige Schlüsse aus den Daten ziehen. Form und Farbe der Datenpunkte im rechten Graphen der Abbildung 48 geben Aufschluss über die Kaminhöhe h (Farbe) und die Entfernung vom Portal l (Symbol) des jeweiligen Datenpunkts. Daraus wird die starke Abhängigkeit der Rezirkulation von der Kaminhöhe sofort ersichtlich: Für Kaminhöhe $h = 0 \text{ m}$ gilt immer $r > 0.1$ %, für $h = 5 \text{ m}$ gilt $r \geq 0.001$ %, für $h = 15 \text{ m}$ gilt $r \geq 6 \cdot 10^{-8}$ % und für $h = 30 \text{ m}$ gilt $r > 10^{-12}$ %. Ferner wird ersichtlich, dass die Daten mit steigender Kaminhöhe stärker mit der Entfernung l des Kamins vom Portal streuen: Bei $h = 0 \text{ m}$ streuen die Daten mit veränderlicher Entfernung über 2 Grössenordnungen (10^{-1} bis 10^1); bei $h = 5 \text{ m}$ über 3 Grössenordnungen; bei $h = 15 \text{ m}$ über 8 Grössenordnungen und bei $h = 30 \text{ m}$ über 11 Grössenordnungen. Weiter wird aus den Daten ersichtlich, dass bei grossen Kaminhöhen ($h = 15 \text{ m}$ und 30 m) die niedrigsten Rezirkulationswerte bei Kaminlagen unmittelbar am Portal erreicht werden ($l = 0 \text{ m}$ und 20 m). Dieser Zusammenhang gilt nicht mehr bei niedrigen Kaminen; je niedriger der Kamin, desto stärker vermischen sich die Daten der Kaminentfernung. Das deutet darauf hin, dass bei niedrigen Kaminhöhen die Wirkung der Windstärke und Austrittsgeschwindigkeit zunehmen. (Je niedriger und entfernter das Kamin ist, desto eher erreicht die Abgasfahne den Boden vor Erreichen des Portals.)

Die gleiche graphische Behandlung wie mit geometrischen Daten kann mit den Geschwindigkeitsparametern gemacht werden: Form und Farbe der Datenpunkte im linken Graphen der Abbildung 48 geben Aufschluss über die Windstärke w (Form) und die Ausblasgeschwindigkeit v (Farbe) des jeweiligen Datenpunkts. Es sind keine deutlichen Gruppierungen erkennbar wie bei den geometrischen Daten, was darauf hinweist, dass die Geometrie dieses physikalische Problem dominiert. Daher muss die Wirkung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Geometrie gewertet werden. Der Vergleich der beiden Plots zeigt dann, dass bei niedrigen Kaminhöhen (hohe Rezirkulation) die Rezirkulation bei hohen Windstärken deutlich höher ist als bei niedrigen (die Werte für $w = 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sind nicht dargestellt, bestätigen dies aber auch).

Diese Beobachtungen decken sich mit der Diskussion der Histogramme in Kapitel 6.3.3.

Anwendung

Die oben ermittelte Kennzahl kann einerseits zur Beurteilung der Güte der Rauchabsaugung eines bestehenden Tunnels herangezogen werden, und andererseits zur Festlegung der geometrischen Abmessungen des Kamins bei der Planung einer Rauchabsaugung dienen.

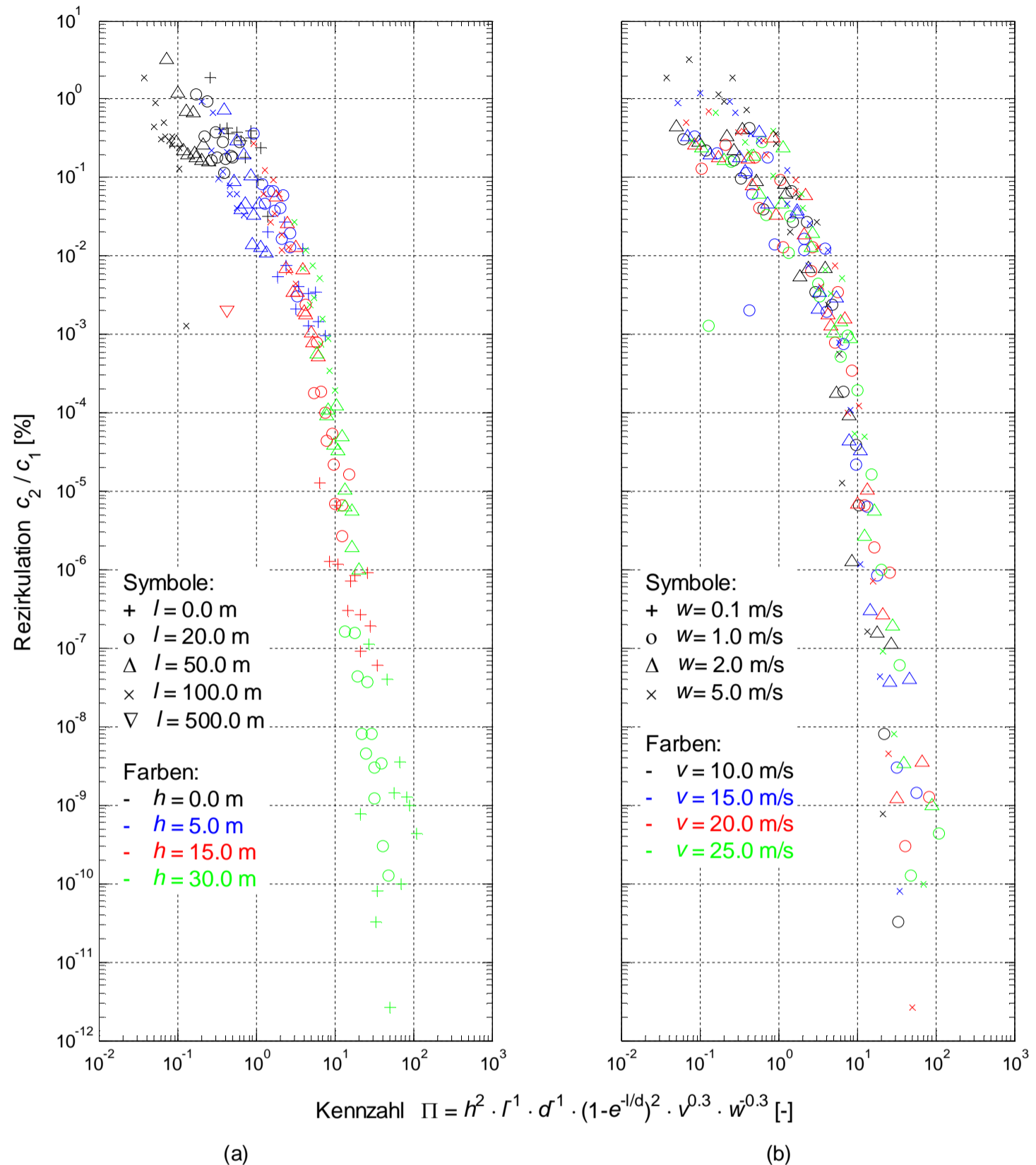


Abbildung 48: Rezirkulationswerte der Kamin-Portal-Simulationen, aufgezeichnet gegen die Kennzahl Π . Datenuntermenge für $l \geq 0$ m, $h \geq 0$ m, $v \geq 10.0$ m·s⁻¹, $w \neq 0.1$ m·s⁻¹. In der Graphik (a) ist jeder Datenpunkt durch Form und Farbe seines Symbols eindeutig einem geometrischen Wertepaar (l, h) zugeordnet. In der Graphik (b) ist jeder Datenpunkt durch Form und Farbe seines Symbols eindeutig einem Geschwindigkeitspaar (w, v) zugeordnet.

6.3.5 Das Gefahrenpotential

Die Abschätzung des Gefahrenpotentials der Ergebnisse der Kamin-Portal-Rezirkulation kann anhand des Schaubildes in Abbildung 16 erfolgen. Das Schaubild kann in der umgekehrten Richtung durchlaufen werden, wie beispielhaft in Abbildung 17 dargestellt: Die maximale Rezirkulation in den Ergebnissen der Kamin-Portal-Simulationen bei realistischen Kaminhöhen beträgt 1% bei $h = 5$ m. Gemäss dem Schaubild in Abbildung 16 ist eine solche Rezirkulation bei Sichtweite 25 m und reflektierenden Schildern erst ab einem Brand von 60 MW kritisch. Dieser Wert liegt deutlich über dem Normbrand nach ASTRA 13001 (2008) von 30 MW. Die Kamin-Portal-Rezirkulation ist also unter neutralen atmosphärischen Bedingungen nicht kritisch. Diese Aussage gilt nicht für instabile Atmosphäre und Inversionslagen. Diese Fälle wurden hier nicht untersucht.

6.3.6 Anwendungsbeispiel Aeschertunnel

Im Folgenden werden die soeben ermittelten Erkenntnisse auf das Abluftsystem der Zentrale Täntenholz am Südportal des Aeschertunnels angewendet. Diese ist so gestaltet, dass die Verbindungslinie von der Kaminmündung zu den Portalen Chur und Basel in die Richtung des dominanten Westwindes (Süd-West) zeigt. Das entspricht also genau den hier studierten Windverhältnissen. Die Portalsituation ist in Abbildung 49 gezeigt.

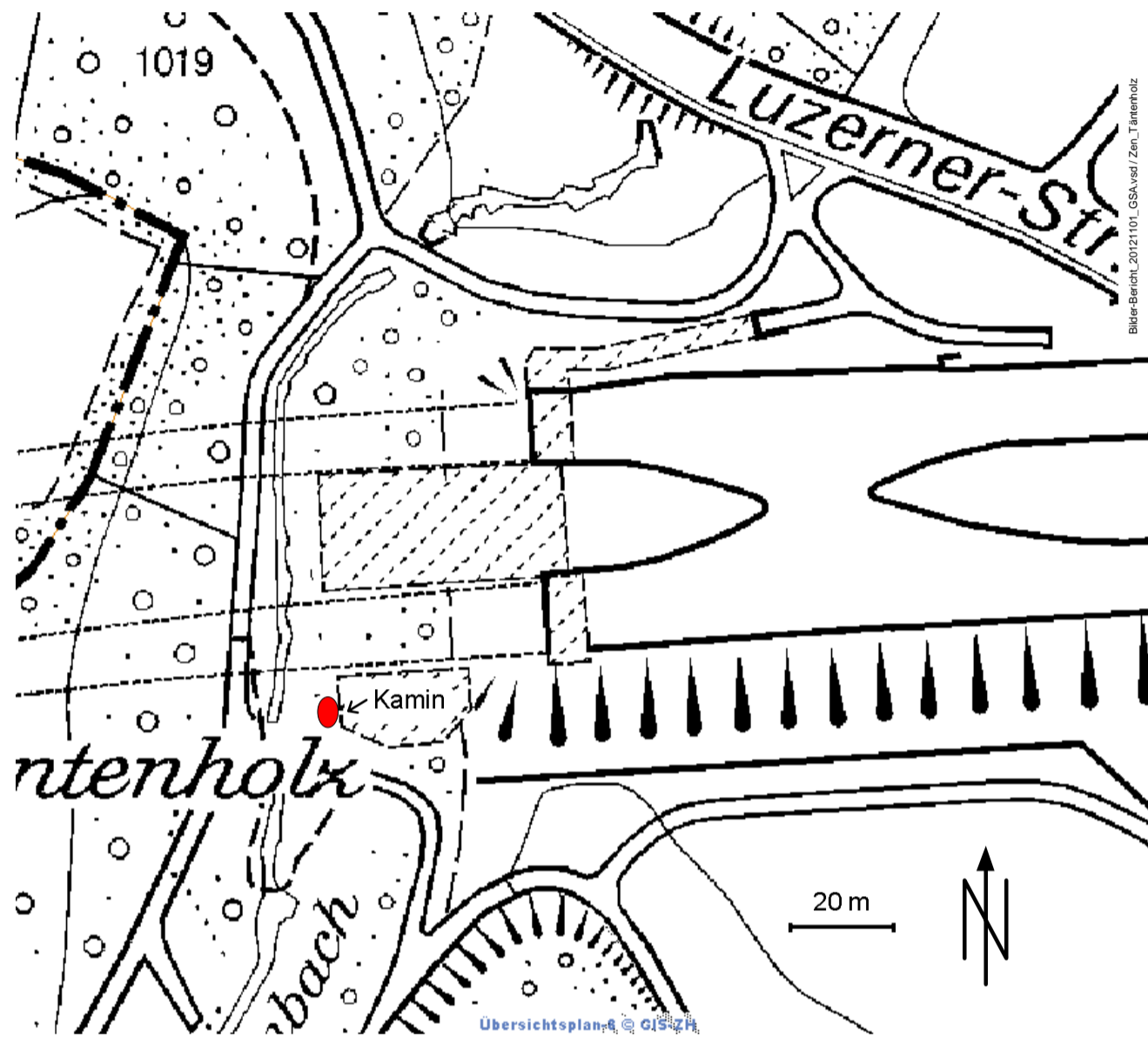


Abbildung 49: Portalsituation Zentrale Täntenholz, Aeschertunnel. Lage des Portals approximativ (Quelle: GIS-ZH 2012, Reproduktionsbewilligung Amt für Raumentwicklung ZH 2012.029)

Die relevanten geometrischen Parameter und Kennzahlen der Abluft sind in Tabelle 29 zusammengetragen. Diese ergeben bei der mittleren Windgeschwindigkeit $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ an der Kaminmündung und voller Absaugleistung eine Kennzahl $\Pi = 2.2$ für die Röhre Basel und 3.3 für die Röhre Luzern.

Entfernung Kamin-Portal	- Röhre Basel:	69.7 m
	- Röhre Luzern:	46.7 m
Höhendifferenz zwischen Kaminmündung und Tunnelfirst		15.6 m
Höhe des Tunnelfirsts über der Fahrbahn		5.4 m
Berücksichtigte Kaminhöhe		18.3 m
Querschnittsfläche der Kaminmündung		14.7 m^2
Hydraulischer Durchmesser der Kaminmündung		4.1 m
Nennwert des Abluftvolumenstroms		$240.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$
Berücksichtigte Windgeschwindigkeit		$2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Dimensionslose Kennzahl Π	- Röhre Basel:	2.2
	- Röhre Luzern:	3.3

Tabelle 29: Anwendungsbeispiel Aeschertunnel: relevante geometrische Parameter und Kennzahlen der Abluft

Diese Kennzahlen sind in Abbildung 50 zusammen mit dem damit abgesteckten Wertintervall der Rezirkulation in den Graph gemäss Abbildung 48 eingetragen: Es werden nach dieser Studie bei neutraler Atmosphäre Rezirkulationswerte zwischen $10^{-1}\%$ und $10^{-3}\%$ prognostiziert. Diese liegen an der unteren Grenze der Messbarkeit und sind gemäss der Abschätzung des Gefahrenpotentials in Kapitel 3.3 auch unbedenklich. Rezirkulation wäre also keine Bedrohung, wenn nicht auch andere atmosphärische Bedingungen herrschen könnten, wie in Kapitel 2.4.6 diskutiert: Die Strömungsbilder „looping“, „fumigation“ und „trapping“ gemäss Abbildung 13 können nicht ausgeschlossen werden. In diesem Fall kann nur eine Erhöhung des Kamins oder der Austrittsgeschwindigkeit helfen: Werden das Kamin um 15 m und die Austrittsgeschwindigkeit auf 20 ms^{-1} erhöht, so steigt die Kennzahl $\Pi = 7.6$ für die Röhre Basel und 11.1 für die Röhre Luzern. Dann fallen die Rezirkulationsprognosen kleiner oder gleich $2 \cdot 10^{-3}\%$ aus.

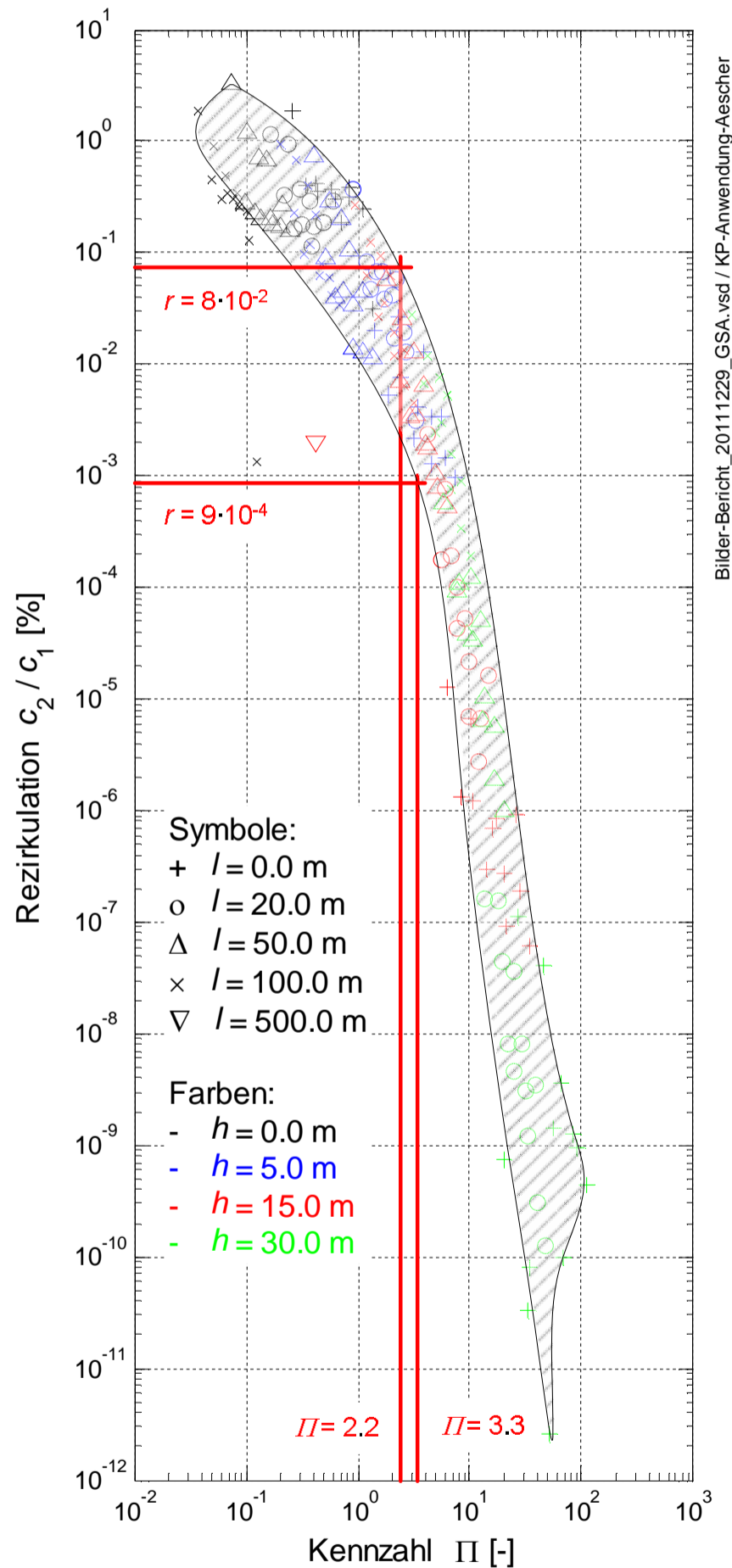


Abbildung 50: Prognose der Rezirkulationswerte am Portal Süd des Aeschertunnels bei Südwestwind, neutraler Atmosphäre und $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Windstärke an der Kaminmündung

6.4 Die Synthese

6.4.1 Abgrenzung der Ergebnisse

Die Parameterstudie Kamin-Portal-Rezirkulation beruht auf den folgenden Annahmen:

- Die Atmosphäre ist neutral.
- Die Strömung ist isotherm.
- Die topographischen Effekte werden vernachlässigt, indem der Tunnel auf der „grünen Wiese“ modelliert wurde.
- Der Wind weht vom Kamin zum Portal.

Die folgenden Effekte werden also nicht in der Studie betrachtet:

- instabile Atmosphäre;
- Inversionslage;
- topographische Effekte wie Hangwinde und Ablösungsblasen des Windes hinter einem Hügel.

6.4.2 Beobachtungen und Empfehlungen

Unter diesen getroffenen Vereinfachungen liefert die Parameterstudie die folgenden Erkenntnisse:

- Der Kamin soll möglichst näher als 20 m am Portal liegen. Nur so wird der Impuls des aus dem Kamin austretenden Rauchs optimal ausgenutzt, um den Rauch aus der Einflusszone der Ansaugung am Tunnelportal zu bringen. Die Rezirkulation nimmt zwischen 20 und 50 m Entfernung markant zu. Entfernungen grösser als 100 m reduzieren die Rezirkulation kaum.
- Liegt der Kamin nicht direkt am Portal, so sollte die Verbindungsgerade Kamin-Portal nicht mit einer Hauptwindrichtung oder einer Hangwindrichtung übereinstimmen.
- Auf jeden Fall hat die Lokalisierung des Kamins auf der Grundlage und in Kenntnis der Windrose am Standort des Portals zu erfolgen.
- Der Kamin soll möglichst höher als 15 m über Portaloberkante sein.
- Die Austrittsgeschwindigkeit des Rauchs am Kamin soll möglichst grösser als $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sein. Daraus folgen betriebliche Anforderungen an die Lüftung unter Teillastbetrieb.
- Mit steigender Windstärke nimmt die Rezirkulation tendenziell zu.
- Es wird eine dimensionslose Kennzahl vorgeschlagen, mit der die Güte einer bestehenden Kamin-Portal-Konfiguration aufgrund der vorliegenden Studie abgeschätzt werden kann. Diese kann auch als Hilfe bei der Auslegung verwendet werden.
- Die ermittelten Rezirkulationswerte sind im Licht von Kapitel 3.2 erst ab einem 60-MW-Brand kritisch. Im Gegensatz zur Portal-Portal-Rezirkulation ist die Kamin-Portal-Rezirkulation bei neutraler Atmosphäre in der Regel unkritisch.

Diese Aussagen gelten nur für theoretisch-konstante Windrichtungen. Bei grösser werdenden Abständen ist diese Annahme wegen der Windfluktuation real immer weniger korrekt. Diese hat aber eine entschärfende Wirkung auf diesen Typ der Rezirkulation, sodass die Annahme einer theoretisch-konstanten Windrichtung konservativ ist.

6.4.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Studie zur Kaminlage und -höhe widersprechen deutlich den in Kapitel 2.5.3 vorgestellten derzeit verfügbaren Richtlinien und Empfehlungen. Diese Studie führt dazu, die dort empfohlene Entfernung vom Portal von mindestens 50 m durch einen Höchstabstand von 20 m zu ersetzen. Diese Bemerkungen gelten natürlich unter Ausschluss der hier nicht berücksichtigten topographischen und meteorologischen Effekte.

Bedingt durch Modellierung der Topographie als Ebene um einen Tunnel „auf der grünen Wiese“ ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse am ehesten für Tunnel mit niedriger Überdeckung gelten, wie zum Beispiel den Aeschertunnel. Auf Tunnel mit grosser Überdeckung, wie zum Beispiel dem Seelisbergtunnel, sind die Ergebnisse nicht übertragbar:

Durch die steile Hanglage der Lüftungszentralen ändern sich die Strömungsbedingungen grundlegend: Der genannte Tunnel ist bekannt für die starken Hangwinde an seinen Portalen.

Die Tunnelluft ist, ausser an heissen Tagen im Frühling und im Sommer, normalerweise wärmer als die Umgebungsluft (PIARC 1995). Zudem ist der Rauch mehr oder minder warm, in Abhängigkeit des Weges, den die Brandgase im Abluftkanal zurücklegen. Von diesem Standpunkt ist die vorliegende isotherme Vorgehensweise ein konservativer Ansatz, da in Wirklichkeit die wärmeren Rauchgase den Auftrieb der Rauchfahne unterstützen werden. In einer stabilen und neutralen Atmosphäre ist daher zu erwarten, dass die anisothermen Rezirkulationsprognosen über das ganze Parameterband besser ausfallen würden als die hier vorgestellten. Inversionslagen, instabile Atmosphäre, Hangwinde und Windablösung im Lee eines Hügels können die Situation deutlich verschlechtern. Daher bleibt eine gründliche Untersuchung der Windverhältnisse am gewünschten Portalstandort nach wie vor unerlässlich.

Im Vergleich zur Portal-Portal-Rezirkulation ist die Kamin-Portal-Rezirkulation in der Regel unkritisch. Dieser Befund kann aus folgendem Grund verallgemeinert werden: Der Rauchausstoss aus einem senkrechten Kamin führt tendenziell zu einer stärkeren Durchmischung bzw. Verdünnung des Rauchs als der Rauchausstoss aus einem waagrecht Portal auf dem Boden. Aus dieser Tatsache kann gefolgert werden, dass unabhängig von der atmosphärischen Stabilität und der Austrittsgeschwindigkeit des Rauchs die Rezirkulation im Kamin-Portal-Fall tendenziell niedriger sein wird als im Portal-Portal-Fall. Dafür ist bei der Kamin-Portal-Rezirkulation in der Regel eine längere Einwirkungs-dauer auf die Portale zu erwarten: Während die Rezirkulation von Portal zu Portal innert Minuten durch die Betriebslüftung unterbunden werden kann, wird diese Rezirkulation bei der Kamin-Portal-Rezirkulation in der Regel wegen der Lüftungsstrategie in der Ereignisröhre (zwischen 0 und $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Einströmung in die Ereignisröhre) während Stunden aufrechterhalten. Diese Tatsache sollte in den Ereignisszenarien berücksichtigt werden, da sie die Selbstrettung, die Fremdrettung und die Brandbekämpfung beeinträchtigen kann.

7 Schluss

7.1 Gefahrenpotential

In Kapitel 3 wurde eine Methode entwickelt, um die Gefährdung der Nutzer der Gegenröhre durch die Rauchrezirkulation abzuschätzen. Sie beruht auf:

- der Theorie der Wannenbrände (vgl. Kapitel 2.2.4);
- den Ergebnissen von Brandversuchen mit verschiedenen reinen Brennstoffen und Fahrzeugen, insbesondere den Entstehungsanteilen verschiedener gasförmiger und fester Brandprodukte (vgl. Kapitel 0);
- der Theorie der Extinktion von Licht in Rauch (vgl. Kapitel 0);
- der empirischen Zusammenhänge zwischen der Sichtweite, der Sichttrübung und des Verhaltens von Personen in verrauchter Umgebung (vgl. Kapitel 0).

Diese Methode ist sowohl auf die Kamin-Portal- wie auch auf die Portal-Portal-Rezirkulation anwendbar. Sie vereint alle drei Teilaspekte der Rezirkulation – Emission, Transmission und Immission – in einem Schaubild, indem eine Abhängigkeit einer als kritisch definierten Rezirkulation von der Brandleistung in der Ereignisröhre und der Sichtweite aufgezeigt wird.

Diese Methode setzt die Analogie von Wannenbränden und Fahrzeugbränden voraus. Ferner geht sie davon aus, dass zwischen Brandleistung und Raucherzeugung ein eindeutiger Zusammenhang besteht. Dieser ist aber nicht immer gegeben: Einerseits streuen in der Wirklichkeit die Beziehungen zwischen der Brandleistung und der Raucherzeugung über eine grosse Bandbreite. Ferner ist die erzeugte Rauchmenge bei zum Beispiel Schwelbränden und Turboladerbränden nicht im gleichen Verhältnis zur Energiefreisetzungsrate oder der Wärmequelle wie bei den hier betrachteten offenen Bränden: Sie ist deutlich niedriger. Diese Methode erfasst also diese Fälle in ihrer hier präsentierten Form nicht, könnte aber in einer vertieften Untersuchung auf diese erweitert werden. Dies setzt aber das Vorliegen von Daten voraus.

Eine weitere Erweiterung dieser Methode ist ihre Anwendung auf die Abschätzung der Toxizität von rezirkulierenden Rauchgasen. Dabei ist die Theorie und Empirie der Extinktion durch eine gründliche Theorie und Empirie der Toxizität einzelner Stoffe und deren Verbund auf den Menschen notwendig. Auch hier tritt in der Wirklichkeit eine grosse Bandbreite zu Tage, wodurch die Schaffung eines einheitlichen Modells erschwert wird. Die Methode kann also bei jetzigem Erkenntnisstand nur als grobe Abschätzung des Phänomens dienen.

Dass unter gewissen Umständen eine kritische Rezirkulation eintreten kann, scheint unbestritten. Die Frage nach der Eintrittshäufigkeit, dem Schadensausmass und letztlich dem resultierenden Risiko für den Tunnelbenutzer ist weit schwieriger zu beantworten.

Grundsätzliche Überlegungen zur Rezirkulation zeigen, dass eine kritische Rezirkulation nur bei einer ungünstigen Verkettung von Bedingungen eintreten und daher eine eher geringe Eintrittshäufigkeit erwartet werden kann, die mindestens auf eine Grössenordnung kleiner geschätzt wird als die Eintrittshäufigkeit eines Brandereignisses.

Primär führt die Rezirkulation zu einer eingeschränkten Sichtweite in der Gegenröhre und entsprechend zu einem möglichen Verlust der Orientierung der Tunnelbenutzer. Eine direkte Gefährdung mit Todesfolge, die von der Rezirkulation ausgeht, wird als sehr gering beurteilt, weil die häufigsten Todesursachen wie hohe Temperatur, Wärmestrahlung und Rauchvergiftung in der Gegenröhre nicht vorhanden oder deutlich reduziert sind.

Aufgrund der eher geringen Eintrittswahrscheinlichkeit und insbesondere wegen dem sehr geringen Schadensausmass wird das resultierende Risiko ebenfalls einen sehr geringen Wert annehmen. Für kostenintensive bauliche Massnahmen (z.B. eine Rauchtrennwand), die einzig der Verhinderung der Rezirkulation dienen, resultiert meist ein

schlechtes Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis.

7.2 Portal-Portal-Rezirkulation

7.2.1 Numerisches Experiment und Abgrenzung

In Kapitel 5 wurde die Rezirkulation von Portal zu Portal mittels einer Parameterstudie numerisch untersucht. Die veränderlichen Parameter waren:

- der Portalversatz;
- die Trennwandlänge;
- die Windstärke;
- die Windrichtung

für eine neutrale Atmosphäre und isotherme Bedingungen, mit einem logarithmischen Windprofil und Referenzgeschwindigkeit auf 10 m Höhe, in einem ebenen, offenen Gelände mit vereinzelt Bäumen und Gestrüpp. Die Ergebnisse gelten für Rauch- und Schadstoffrezirkulation in den gegebenen geometrischen und atmosphärischen Grenzen. Die Ergebnisse gelten also nicht für Tunnel in einem Einschnitt oder einer Strassenschlucht. Sie gelten auch nicht für Portalströmungen wärmer als die Umgebung. Für Portalsituationen längs zum Tal, also bei einem Winkel zwischen Tal- und Tunnelachse kleiner 90°, gelten die Ergebnisse nur als Richtgrösse. Dies sind wesentliche Einschränkungen, die die Aussagekraft der Ergebnisse beschneiden, aber das im Rahmen des Projektes Machbare darstellen.

7.2.2 Beobachtungen

Die beobachteten Rezirkulationswerte liegen zwischen 0 und 55 %. Die treibende Kraft für die Rezirkulation ist die Windstärke vor der Windrichtung: Bei Wind mit Querkomponente ist die Rezirkulation umso stärker, als die Windstärke steigt. Bei Schwachwind zeigen die Trennwände keine Wirkung, unabhängig vom Portalversatz; erst bei starkem Wind und nur bei Portalversatz null ist eine Wirkung beobachtbar; dann erweist sich eine Trennwand von mindestens 30 m als optimale Länge. Ist der Wind gegen das Portal gerichtet, so ist die Rezirkulation bei Schwachwind stets höher als bei den Windrichtungen mit Querkomponenten; bei Portalversatz null steigt die Rezirkulation bei Starkwind an, jedoch viel schwächer als bei den andern Windrichtungen; in Fällen mit Portalversatz grösser null sinkt die Rezirkulation bei Starkwind ab.

Der Auftrieb hat zum heutigen Kenntnisstand bei grossen Temperaturdifferenzen ($\Delta\theta > 20^\circ$) einen positiven, mindernden Einfluss auf die Rezirkulation. Eine Aussage für kleinere Temperaturdifferenzen ist bei heutigem Kenntnisstand nicht möglich.

7.2.3 Beurteilung bestehender Bauwerke

Die Beurteilung bestehender Bauwerke wurde mit der hier entwickelten Methode zur Schätzung des Gefahrenpotentials und der CFD-Rechnungen für den Tunnel Habsburg, Nordportal, in Pöyry 2012 vorgenommen und dokumentiert. Das Ergebnis ist, dass Rezirkulation nach den hier definierten Kriterien und Methoden durchaus kritisch sein kann. Daher wurden dort auch statistische Betrachtungen über die Möglichkeit eines Brandes unter den betrachteten Windverhältnissen herangezogen.

7.2.4 Empfehlung für zukünftige Bauwerke

Die ermittelten Rezirkulationswerte liegen nach der Schätzung des Gefahrenpotentials nach Kapitel 3.3 durchaus im kritischen Bereich. Daher ist eine Beurteilung der Situation an den jeweiligen realen Portalen mit numerischen oder experimentellen Methoden notwendig, insofern das Gefahrenpotential der Rezirkulation nicht mit anderen Massnahmen oder Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen unterbunden werden kann.

Die Untersuchung bestätigt die Richtlinie ASTRA 13001 (2008), welche eine Trennwand von 30 m Länge mit Höhe des Fahrraums empfiehlt.

7.3 Kamin-Portal-Rezirkulation

7.3.1 Numerisches Experiment und Abgrenzung

In Kapitel 6 wird die Kamin-Portal-Rezirkulation mittels einer Parameterstudie numerisch untersucht. Die veränderlichen Parameter sind:

- der Abstand Kamin-Portal;
- die Kaminhöhe;
- die Austrittsgeschwindigkeit der Luft aus dem Kamin;
- die Windstärke.

Diese Parameter wurden für eine neutrale und isotherme Atmosphäre, mit einer Windrichtung von Kamin zu Portal, unter Vernachlässigung der topographischen Effekte und für einen Tunnel auf der „grünen Wiese“ modelliert.

Die folgenden Effekte werden also nicht in der Studie betrachtet:

- instabile Atmosphäre;
- Inversionslagen;
- topographische Effekte wie Hangwinde und Ablösungsblasen des Windes hinter einem Hügel.

Die Ergebnisse lassen sich also am besten auf Tunnel durch niedrige Hügel wie den Aeschertunnel anwenden.

7.3.2 Beobachtungen

Die Ergebnisse der Studie zur Kaminlage und -höhe widersprechen deutlich den in Kapitel 2.5.3 vorgestellten derzeit verfügbaren Richtlinien und Empfehlungen. Diese Studie führt dazu, die dort empfohlen Entfernung vom Portal von mindestens 50 m durch einen Höchstabstand von 20 m zu ersetzen. Diese Bemerkungen gelten natürlich unter Ausschluss der hier nicht berücksichtigten topographischen und meteorologischen Effekte.

Bedingt durch Modellierung der Topographie als Ebene um einen Tunnel „auf der grünen Wiese“ ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse am ehesten für Tunnel mit niedriger Überdeckung gelten, wie zum Beispiel den Aeschertunnel. Auf Tunnel mit grosser Überdeckung, wie zum Beispiel dem Seelisbergtunnel, sind die Ergebnisse nicht übertragbar: Durch die steile Hanglage der Lüftungszentralen ändern sich die Strömungsbedingungen grundlegend: Der genannte Tunnel ist bekannt für die starken Hangwinde an seinen Portalen.

Die Tunnelluft ist, ausser an heissen Tagen im Frühling und im Sommer, normalerweise wärmer als die Umgebungsluft (PIARC 1995). Zudem ist der Rauch mehr oder minder warm, in Abhängigkeit des Weges, den die Brandgase im Abluftkanal zurücklegen. Von diesem Standpunkt ist die vorliegende isotherme Vorgehensweise ein konservativer Ansatz, da in Wirklichkeit die wärmeren Rauchgase den Auftrieb der Rauchfahne unterstützen werden. In einer stabilen und neutralen Atmosphäre ist daher zu erwarten, dass die anisothermen Rezirkulationsprognosen über das ganze Parameterband besser ausfallen würden als die hier vorgestellten. Inversionslagen, instabile Atmosphäre, Hangwinde und Windablösung im Lee eines Hügels können die Situation deutlich verschlechtern. Daher bleibt eine gründliche Untersuchung der Windverhältnisse am gewünschten Portalstandort nach wie vor unerlässlich.

7.3.3 Beurteilung bestehender Bauwerke

Die Ergebnisse der Kamin-Portal-Studie sind auf Tunnel mit niedriger Überdeckung und Ausblasgeschwindigkeit grösser gleich $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ am Kamin anwendbar.

Die Anwendung der Erkenntnisse auf das Westportal des Aeschertunnels (Zentrale Tantenholz) zeigt, dass die Rezirkulation bei den ungünstigen, aber dominanten Windverhältnissen und neutraler Atmosphäre keine Bedrohung darstellt. Da aber andere, die Rezirkulation begünstigende atmosphärische Bedingungen herrschen könnten, wie in Kapi-

tel 2.4.6 diskutiert, kann Rezirkulation nicht vollständig ausgeschlossen werden.

7.3.4 Empfehlung für zukünftige Bauwerke

Unter den getroffenen Vereinfachungen liefert die Parameterstudie die folgenden Erkenntnisse:

- Der Kamin soll möglichst näher als 20 m am Portal liegen. Nur so wird der Impuls des aus dem Kamin austretenden Rauchs optimal ausgenutzt, um den Rauch aus der Einflusszone der Ansaugung am Tunnelportal zu bringen. Die Rezirkulation nimmt zwischen 20 und 50 m Entfernung markant zu. Entfernungen grösser als 100 m reduzieren die Rezirkulation kaum.
- Liegt der Kamin nicht direkt am Portal, so sollte die Verbindungsgerade Kamin-Portal nicht mit einer Hauptwindrichtung oder einer Hangwindrichtung übereinstimmen.
- Auf jeden Fall hat die Lokalisierung des Kamins auf der Grundlage und in Kenntnis der Windrose am Standort des Portals zu erfolgen.
- Der Kamin soll möglichst höher als 15 m über Portaloberkante sein.
- Die Austrittsgeschwindigkeit des Rauchs am Kamin soll möglichst grösser als $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ sein, auch unter Teillastbetrieb.
- Mit steigender Windstärke nimmt die Rezirkulation tendenziell zu.
- Es wird eine dimensionslose Kennzahl vorgeschlagen, mit der die Güte einer bestehenden Kamin-Portal-Konfiguration aufgrund der vorliegenden Studie abgeschätzt werden kann. Diese kann auch als Hilfe bei der Auslegung verwendet werden.
- Die ermittelten Rezirkulationswerte sind im Licht von Kapitel 3.2 erst ab einem 60-MW-Brand kritisch. Im Gegensatz zur Portal-Portal-Rezirkulation ist die Kamin-Portal-Rezirkulation bei neutraler Atmosphäre in der Regel unkritisch.

7.4 Diskussion der Vereinfachungen und Annahmen

Die in dieser Arbeit getroffenen Annahmen und Vereinfachungen werden in der Tabelle 30 verallgemeinert und bezüglich ihrer Auswirkung auf die Ergebnisse diskutiert.

Annahme / Vereinfachung	Betrifft	Auswirkung auf die Ergebnisse
Wannenbrände als Darstellung der Fahrzeugbrände	Gefahrenpotential	Ein SOLIT2-Bericht kommt zum Schluss, dass die real gefährlichen Ereignisse als Spillbrände und weniger als theorienahe Poolbrände anzusehen sind. Damit werden die Aussagen im Bericht mit Bezug Brandleistung und Sichttrübung infrage gestellt. Bei heutigem Kenntnisstand ist diese Theorie aber die einzige Möglichkeit, einen quantitativen Zusammenhang zwischen Brandleistung und Rezirkulation herzustellen.
Windkalmen werden vernachlässigt	K-P- & P-P-Rez.	Bei Windkalmen ist der Wind umlaufend; Luftmassen werden langsam hin- und hergeschoben. Wenn bei der Kamin-Portal-Rezirkulation Rauch zu Boden fällt, kann der Rauch in der Luft vor dem Portal angereichert werden. Das Gleiche kann bei der Portal-Portal-Rezirkulation auftreten. Die Rezirkulation kann evtl. viel grösser ausfallen als in den Ergebnissen ermittelt.
Die Strömung ist isotherm. Insbesondere hat der austretende Rauch die gleiche Temperatur wie die Umgebung	P-P-Rez.	Wenn die Tunnelluft wärmer ist als die Umgebung – sei es, dass das Bauwerk wärmer ist oder dass der Rauch noch durch den Brand warm ist –, so wird der Rauchstrahl in der kälteren Umgebung aufsteigen, dies umso stärker, wie der Rauchstrahl wärmer als die Umgebung ist. In der Regel wird dies zu einer Verringerung der Rezirkulation führen. Ist der Rauchstrahl hingegen kälter als die Umgebung, so wird er am Boden haften; die Rezirkulation hängt dann kaum vom Temperaturunterschied ab. Der Grenzfall ist der isotherme Rauchstrahl, der hier als der konservative Fall betrachtet werden kann.
	K-P-Rez.	An heissen Tagen im Frühling und im Sommer kann die austretende Luft kälter bzw. schwerer als die Umgebung sein. Dadurch kann der Rauch auf den Boden fallen. Die Rezirkulation steigt umso stärker an, als die Austrittsgeschwindigkeit aus dem Kamin sinkt.

Annahme / Vereinfachung	Betrifft	Auswirkung auf die Ergebnisse
Die Variabilität der Windrichtung und Stärke wird vernachlässigt.	P-P-Rez.	Diese Variabilität hängt auch vom Gelände ab. Da die Zeit in den Simulationen nicht berücksichtigt wurde, sind die Ergebnisse der Simulation als Höchstwerte der Rezirkulation in Bezug auf die Variabilität der Windrichtung zu betrachten. Die Sensitivität der Ergebnisse auf diese Variabilität bei der Portal-Portal-Rezirkulation kann aus den Ergebnissen von Baumann (1979) abgeschätzt werden.
	K-P-Rez.	Diese Variabilität hängt auch vom Gelände ab. Sie wirkt sich besonders auf die Kamin-Portal-Rezirkulation aus: Da die angenommene Konstanz der Windrichtung hinfällig ist, muss mit steigender Entfernung des Kamins vom Portal mit einer zeitvariablen, schwallweisen Rezirkulation gerechnet werden. Da die Zeit aber in den Simulationen nicht berücksichtigt wurde, sind die Ergebnisse der Simulation als Höchstwerte der Rezirkulation in Bezug auf die Variabilität der Windrichtung zu betrachten. Die Sensitivität der Ergebnisse auf diese Variabilität wurde nicht erforscht.
Ebene Tunnelumgebung, einfache Topographie, Hang normal zur Tunnelachse, keine Einschnitte	P-P-Rez.	Die Rezirkulation an Tunnelportalen in Einschnitten und auf der Ebene wurde von Maarsingh & Swart (1991) experimentell untersucht. Die Ergebnisse in der Ebene sind vergleichbar mit den Ergebnissen in dieser Studie und denjenigen von Haerter & Baumann. Die Ergebnisse in Einschnitten sind quantitativ vergleichbar mit den Ergebnissen in der Ebene, weisen aber Besonderheiten bzgl. Windrichtung und Trennwandgestaltung auf.
Ebene Tunnelumgebung, keine Topographie, keine Einschnitte	K-P-Rez.	Hangwinde und Ablösungsblasen im Lee der Hügel werden nicht berücksichtigt. Die Auswirkung auf die Rezirkulation kann nicht allgemein abgeschätzt werden. Sie muss von Fall zu Fall bestimmt werden. <ul style="list-style-type: none"> - Hangwinde können den Abluftstrahl erfassen und zum Portal treiben. Dieser Fall ist nachteilig. Sie können aber auch vom Abluftstrahl durchstossen werden. In diesem Fall können sie das Portal vor dem Abluftstrahl abschirmen; das ist vorteilhaft. - Wird der Rauchstrahl in der Ablösungsblase freigesetzt, so findet eine uniforme Durchmischung statt. Dies ist im Vergleich zu den ermittelten Ergebnissen nicht unbedingt nachteilig. - Durchstösst der Rauchstrahl die Ablösungsblase, so wirkt die Blase abschirmend auf die Portale, was vorteilhaft ist.
Neutrale Atmosphäre, keine Temperaturschichtung, keine Inversion	P-P-Rez.	Die Auswirkung dieser Vereinfachung auf die Portal-Portal-Rezirkulation wird als schwach eingestuft, da der Rauchstrahl aus dem Portal parallel zu einer solchen Schichtung wäre bzw. die Rezirkulation sich innerhalb einer solchen Schichtung abspielen würde.
	K-P-Rez.	Die Auswirkung dieser Vereinfachung auf die Kamin-Portal-Rezirkulation wird als stark eingestuft, da der Rauchstrahl aus dem Kamin normal zur Schichtung verläuft. Durchstösst die Rauchfahne die Inversion, so schirmt diese die Portale vor dem Rauch ab; die Rezirkulation nimmt ab. Bleibt die Rauchfahne hingegen unterhalb der Inversion gefangen, so fällt der Rauch schneller zu Boden; die Rezirkulation steigt an. Fällt die Temperatur vertikal stark ab (instabile Atmosphäre), so nimmt die Rezirkulation ebenfalls zu.

Tabelle 30: Diskussion der Auswirkungen der Annahmen und der Vereinfachungen auf die Gültigkeit der Ergebnisse

Trotz der oben erläuterten Verschlechterungen der Kamin-Portal-Rezirkulation unter Berücksichtigung der realen Portalbedingungen liegt sie tendenziell tiefer als die Portal-Portal-Rezirkulation. Diese Aussage entspricht den Ergebnissen dieser Studie und kann aus folgendem Grund verallgemeinert werden: Der Rauchausstoss aus einem senkrechten Kamin führt tendenziell zu stärkerer Durchmischung bzw. Verdünnung des Rauchs als der Rauchausstoss aus einem waagrechten Portal auf dem Boden. Aus dieser Tatsache kann gefolgert werden, dass unabhängig von der atmosphärischen Stabilität und der Austrittsgeschwindigkeit des Rauchs die Rezirkulation im Kamin-Portal-Fall tendenziell

niedriger sein wird als im Portal-Portal-Fall.

7.5 Ausblick

Dieser Ausblick behandelt einerseits mögliche Vertiefungen oder Erweiterungen in der Untersuchung der Phänomene der Rezirkulation und andererseits die mögliche Umsetzung der bereits erarbeiteten Erkenntnisse in die Regelwerke (z.B. Richtlinien, Technische Merkblätter).

Mögliche Vertiefungen und Erweiterungen der Forschung

Einige Themen werden im vorliegenden Forschungsbericht nur knapp behandelt. Eine Vertiefung wäre notwendig:

- Es werden nur heisse Rauchquellen mit dem Ansatz für Wannenbrände behandelt. Die **Charakterisierung von kalten Rauchquellen** wird in diesem Forschungsprojekt nicht vorgenommen. Dieses Thema sollte vertieft werden, um die Schaubilder für das Gefahrenpotential zu erweitern.
- Der **Effekt des Auftriebs** warmen bzw. des Abtriebs kalten Rauchs wird in dieser Arbeit nur gestreift. Es wurde jedoch in einer parallel laufenden Arbeit erkannt, welches Gewicht dieser Parameter auf die Rezirkulation hat. Die Auswirkung des thermischen Auf- und Abtriebs sollte daher weiter untersucht werden.
- Die CFD-Simulationen wurden mit den verfügbaren Versuchsergebnissen validiert. Der nächste Schritt wäre nun die Verifizierung mittels **Messungen** an realen Objekten.

Mögliche Umsetzung in den Regelwerken

Es gilt zu prüfen, ob die erarbeiteten Ergebnisse oder Teile davon in den Regelwerken aufgenommen werden sollen. Insbesondere betrifft diese Empfehlung folgende Ergebnisse:

- **Gefahrenpotential:** Als Ergebnis des Forschungsprojekts besteht nun eine Methode, das Gefahrenpotential der Rezirkulation in Abhängigkeit der Brandleistung und der zulässigen Sichttrübung festzulegen. Entsprechende Schaubilder sind vorhanden und können mit geänderten Parametern leicht erzeugt werden. Diese Methode sollte nun in Fachkreisen diskutiert und, falls anerkannt, in ein Regelwerk aufgenommen werden.
- **Portal-Portal-Rezirkulation:** Das Forschungsprojekt bestätigt das bestehende Regelwerk und erbringt zu diesem Thema neue Erkenntnisse, die in ein Regelwerk aufgenommen werden sollten.
- **Kamin-Portal-Rezirkulation:** Das Forschungsprojekt liefert konkrete Empfehlungen zu Position und Höhe des Kamins sowie Winkel und Mündungsgeschwindigkeit der Abluft. Diese gelten unter gewissen Annahmen, die weiter diskutiert werden müssen. Jedenfalls stehen diese Ergebnisse im Widerspruch zur Richtlinie ASTRA 13001. Nach der Vernehmlassung sollten die Empfehlungen in dieser Form oder abgeändert aufgenommen werden.

Anhänge

I	Simulationsergebnisse	116
I.1	Portal-Portal Rezirkulation.....	116
I.2	Kamin-Portal-Rezirkulation.....	122

I Simulationsergebnisse

I.1 Portal-Portal Rezirkulation

I.1.1 Feste Parameter der Simulationsmodelle

Die festen Parameter der Berechnungen sind in Tabelle 31 dokumentiert.

Grösse	Einheit	Wert
Referenztemperatur	°C	25.0
Referenzdichte	kg·m ⁻³	1.184
Querschnittsfläche	m ²	70.2
Hydraulische Durchmesser	m	8.83
Dicke der Trennwand	m	0.2
Röhrenabstand	m	7.1
Geschwindigkeit aus der austretenden Röhre	m·s ⁻¹	6.0
Geschwindigkeit in die eintretenden Röhre	m·s ⁻¹	8.0

Tabelle 31: Feste Parameter der Portal-Portal-Simulationen

I.1.2 Simulationsfälle und Ergebnisse

Die Simulationsfälle sind in der Tabelle 32 dokumentiert. Erklärungen zu den Begriffen in der Spalte „Konvergenzgeschichte“ folgen auf der Tabelle.

Fall	Name	l_p [m]	l_w [m]	α [°]	w [m/s]	c_2 / c_1 [-]	Konvergenz-Geschichte
1	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_0_Vw_0.1	-100	0	0	0.1	0.0000	konvergiert
2	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_0_Vw_0.1	-50	0	0	0.1	0.0000	konvergiert
3	Lp_0_Lw_0_Alpha_0_Vw_0.1	0	0	0	0.1	0.0020	konvergiert
4	Lp_0_Lw_10_Alpha_0_Vw_0.1	0	10	0	0.1	0.0022	gemittelt
5	Lp_0_Lw_20_Alpha_0_Vw_0.1	0	20	0	0.1	0.0010	konvergiert
6	Lp_0_Lw_30_Alpha_0_Vw_0.1	0	30	0	0.1	0.0009	konvergiert
7	Lp_0_Lw_50_Alpha_0_Vw_0.1	0	50	0	0.1	0.0014	konvergiert
8	Lp_15_Lw_0_Alpha_0_Vw_0.1	15	0	0	0.1	0.0109	konvergiert
9	Lp_15_Lw_10_Alpha_0_Vw_0.1	15	10	0	0.1	0.0062	konvergiert
10	Lp_15_Lw_20_Alpha_0_Vw_0.1	15	20	0	0.1	0.0048	konvergiert
11	Lp_15_Lw_30_Alpha_0_Vw_0.1	15	30	0	0.1	0.0057	konvergiert
12	Lp_30_Lw_0_Alpha_0_Vw_0.1	30	0	0	0.1	0.0213	konvergiert
13	Lp_30_Lw_10_Alpha_0_Vw_0.1	30	10	0	0.1	0.0119	konvergiert
14	Lp_30_Lw_20_Alpha_0_Vw_0.1	30	20	0	0.1	0.0109	konvergiert
15	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_0_Vw_1	-100	0	0	1	0.0000	konvergiert
16	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_0_Vw_1	-50	0	0	1	0.0000	konvergiert
17	Lp_0_Lw_0_Alpha_0_Vw_1	0	0	0	1	0.0125	konvergiert
18	Lp_0_Lw_10_Alpha_0_Vw_1	0	10	0	1	0.0275	konvergiert
19	Lp_0_Lw_20_Alpha_0_Vw_1	0	20	0	1	0.0257	konvergiert
20	Lp_0_Lw_30_Alpha_0_Vw_1	0	30	0	1	0.0282	konvergiert
21	Lp_0_Lw_50_Alpha_0_Vw_1	0	50	0	1	0.0377	konvergiert
22	Lp_15_Lw_0_Alpha_0_Vw_1	15	0	0	1	0.0128	konvergiert
23	Lp_15_Lw_10_Alpha_0_Vw_1	15	10	0	1	0.0221	konvergiert

Fall	Name	l_p [m]	l_w [m]	α [°]	w [m/s]	c_2 / c_1 [-]	Konvergenz- Geschichte
24	Lp_15_Lw_20_Alpha_0_Vw_1	15	20	0	1	0.0424	konvergiert
25	Lp_15_Lw_30_Alpha_0_Vw_1	15	30	0	1	0.0429	konvergiert
26	Lp_30_Lw_0_Alpha_0_Vw_1	30	0	0	1	0.0577	konvergiert
27	Lp_30_Lw_10_Alpha_0_Vw_1	30	10	0	1	0.0489	konvergiert
28	Lp_30_Lw_20_Alpha_0_Vw_1	30	20	0	1	0.0673	konvergiert
29	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_0_Vw_2	-100	0	0	2	0.0000	konvergiert
30	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_0_Vw_2	-50	0	0	2	0.0040	konvergiert
31	Lp_0_Lw_0_Alpha_0_Vw_2	0	0	0	2	0.1585	konvergiert
32	Lp_0_Lw_10_Alpha_0_Vw_2	0	10	0	2	0.1848	gemittelt
33	Lp_0_Lw_20_Alpha_0_Vw_2	0	20	0	2	0.1877	konvergiert
34	Lp_0_Lw_30_Alpha_0_Vw_2	0	30	0	2	0.1860	konvergiert
35	Lp_0_Lw_50_Alpha_0_Vw_2	0	50	0	2	0.1811	konvergiert
36	Lp_15_Lw_0_Alpha_0_Vw_2	15	0	0	2	0.1522	konvergiert
37	Lp_15_Lw_10_Alpha_0_Vw_2	15	10	0	2	0.1250	gemittelt
38	Lp_15_Lw_20_Alpha_0_Vw_2	15	20	0	2	0.1617	gemittelt
39	Lp_15_Lw_30_Alpha_0_Vw_2	15	30	0	2	0.1550	gemittelt
40	Lp_30_Lw_0_Alpha_0_Vw_2	30	0	0	2	0.1334	gemittelt
41	Lp_30_Lw_10_Alpha_0_Vw_2	30	10	0	2	0.1500	gemittelt
42	Lp_30_Lw_20_Alpha_0_Vw_2	30	20	0	2	0.1450	gemittelt
43	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_0_Vw_5	-100	0	0	5	0.0013	konvergiert
44	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_0_Vw_5	-50	0	0	5	0.0295	konvergiert
45	Lp_0_Lw_0_Alpha_0_Vw_5	0	0	0	5	0.5210	konvergiert
46	Lp_0_Lw_10_Alpha_0_Vw_5	0	10	0	5	0.4583	konvergiert
47	Lp_0_Lw_20_Alpha_0_Vw_5	0	20	0	5	0.3132	konvergiert
48	Lp_0_Lw_30_Alpha_0_Vw_5	0	30	0	5	0.2632	konvergiert
49	Lp_0_Lw_50_Alpha_0_Vw_5	0	50	0	5	0.2643	konvergiert
50	Lp_15_Lw_0_Alpha_0_Vw_5	15	0	0	5	0.3541	konvergiert
51	Lp_15_Lw_10_Alpha_0_Vw_5	15	10	0	5	0.3253	konvergiert
52	Lp_15_Lw_20_Alpha_0_Vw_5	15	20	0	5	0.2359	konvergiert
53	Lp_15_Lw_30_Alpha_0_Vw_5	15	30	0	5	0.2550	gemittelt
54	Lp_30_Lw_0_Alpha_0_Vw_5	30	0	0	5	0.1727	gemittelt
55	Lp_30_Lw_10_Alpha_0_Vw_5	30	10	0	5	0.1506	konvergiert
56	Lp_30_Lw_20_Alpha_0_Vw_5	30	20	0	5	0.1500	gemittelt
57	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_30_Vw_0.1	-100	0	30	0.1	0.0027	konvergiert
58	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_30_Vw_0.1	-50	0	30	0.1	0.0013	konvergiert
59	Lp_0_Lw_0_Alpha_30_Vw_0.1	0	0	30	0.1	0.0024	konvergiert
60	Lp_0_Lw_10_Alpha_30_Vw_0.1	0	10	30	0.1	0.0021	konvergiert
61	Lp_0_Lw_20_Alpha_30_Vw_0.1	0	20	30	0.1	0.0018	konvergiert
62	Lp_0_Lw_30_Alpha_30_Vw_0.1	0	30	30	0.1	0.0013	konvergiert
63	Lp_0_Lw_50_Alpha_30_Vw_0.1	0	50	30	0.1	0.0017	konvergiert
64	Lp_15_Lw_0_Alpha_30_Vw_0.1	15	0	30	0.1	0.0020	konvergiert
65	Lp_15_Lw_10_Alpha_30_Vw_0.1	15	10	30	0.1	0.0066	konvergiert
66	Lp_15_Lw_20_Alpha_30_Vw_0.1	15	20	30	0.1	0.0067	konvergiert

Fall	Name	l_p [m]	l_w [m]	α [°]	w [m/s]	c_2 / c_1 [-]	Konvergenz- Geschichte
67	Lp_15_Lw_30_Alpha_30_Vw_0.1	15	30	30	0.1	0.0065	konvergiert
68	Lp_30_Lw_0_Alpha_30_Vw_0.1	30	0	30	0.1	0.0222	konvergiert
69	Lp_30_Lw_10_Alpha_30_Vw_0.1	30	10	30	0.1	0.0132	konvergiert
70	Lp_30_Lw_20_Alpha_30_Vw_0.1	30	20	30	0.1	0.0121	konvergiert
71	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_30_Vw_1	-100	0	30	1	0.0000	konvergiert
72	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_30_Vw_1	-50	0	30	1	0.0004	konvergiert
73	Lp_0_Lw_0_Alpha_30_Vw_1	0	0	30	1	0.0670	konvergiert
74	Lp_0_Lw_10_Alpha_30_Vw_1	0	10	30	1	0.0800	konvergiert
75	Lp_0_Lw_20_Alpha_30_Vw_1	0	20	30	1	0.0766	konvergiert
76	Lp_0_Lw_30_Alpha_30_Vw_1	0	30	30	1	0.0720	konvergiert
77	Lp_0_Lw_50_Alpha_30_Vw_1	0	50	30	1	0.0750	konvergiert
78	Lp_15_Lw_0_Alpha_30_Vw_1	15	0	30	1	0.0093	konvergiert
79	Lp_15_Lw_10_Alpha_30_Vw_1	15	10	30	1	0.0167	konvergiert
80	Lp_15_Lw_20_Alpha_30_Vw_1	15	20	30	1	0.0536	konvergiert
81	Lp_15_Lw_30_Alpha_30_Vw_1	15	30	30	1	0.0602	konvergiert
82	Lp_30_Lw_0_Alpha_30_Vw_1	30	0	30	1	0.0400	konvergiert
83	Lp_30_Lw_10_Alpha_30_Vw_1	30	10	30	1	0.0363	konvergiert
84	Lp_30_Lw_20_Alpha_30_Vw_1	30	20	30	1	0.0568	konvergiert
85	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_30_Vw_2	-100	0	30	2	0.0019	konvergiert
86	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_30_Vw_2	-50	0	30	2	0.0217	konvergiert
87	Lp_0_Lw_0_Alpha_30_Vw_2	0	0	30	2	0.1900	konvergiert
88	Lp_0_Lw_10_Alpha_30_Vw_2	0	10	30	2	0.1800	gemittelt
89	Lp_0_Lw_20_Alpha_30_Vw_2	0	20	30	2	0.1780	gemittelt
90	Lp_0_Lw_30_Alpha_30_Vw_2	0	30	30	2	0.17	gemittelt
91	Lp_0_Lw_50_Alpha_30_Vw_2	0	50	30	2	0.174	gemittelt
92	Lp_15_Lw_0_Alpha_30_Vw_2	15	0	30	2	0.1400	gemittelt
93	Lp_15_Lw_10_Alpha_30_Vw_2	15	10	30	2	0.1400	gemittelt
94	Lp_15_Lw_20_Alpha_30_Vw_2	15	20	30	2	0.1700	konvergiert
95	Lp_15_Lw_30_Alpha_30_Vw_2	15	30	30	2	0.1580	konvergiert
96	Lp_30_Lw_0_Alpha_30_Vw_2	30	0	30	2	0.1300	konvergiert
97	Lp_30_Lw_10_Alpha_30_Vw_2	30	10	30	2	0.1250	konvergiert
98	Lp_30_Lw_20_Alpha_30_Vw_2	30	20	30	2	0.1880	konvergiert
99	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_30_Vw_5	-100	0	30	5	0.0092	konvergiert
100	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_30_Vw_5	-50	0	30	5	0.0553	konvergiert
101	Lp_0_Lw_0_Alpha_30_Vw_5	0	0	30	5	0.5300	konvergiert
102	Lp_0_Lw_10_Alpha_30_Vw_5	0	10	30	5	0.4800	konvergiert
103	Lp_0_Lw_20_Alpha_30_Vw_5	0	20	30	5	0.3800	gemittelt
104	Lp_0_Lw_30_Alpha_30_Vw_5	0	30	30	5	0.2850	konvergiert
105	Lp_0_Lw_50_Alpha_30_Vw_5	0	50	30	5	0.2500	gemittelt
106	Lp_15_Lw_0_Alpha_30_Vw_5	15	0	30	5	0.3700	konvergiert
107	Lp_15_Lw_10_Alpha_30_Vw_5	15	10	30	5	0.4000	konvergiert
108	Lp_15_Lw_20_Alpha_30_Vw_5	15	20	30	5	0.4040	konvergiert
109	Lp_15_Lw_30_Alpha_30_Vw_5	15	30	30	5	0.3450	konvergiert

Fall	Name	l_p [m]	l_w [m]	α [°]	w [m/s]	c_2 / c_1 [-]	Konvergenz- Geschichte
110	Lp_30_Lw_0_Alpha_30_Vw_5	30	0	30	5	0.4000	konvergiert
111	Lp_30_Lw_10_Alpha_30_Vw_5	30	10	30	5	0.4400	konvergiert
112	Lp_30_Lw_20_Alpha_30_Vw_5	30	20	30	5	0.4600	konvergiert
113	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_60_Vw_0.1	-100	0	60	0.1	0.0000	konvergiert
114	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_60_Vw_0.1	-50	0	60	0.1	0.0000	konvergiert
115	Lp_0_Lw_0_Alpha_60_Vw_0.1	0	0	60	0.1	0.0374	konvergiert
116	Lp_0_Lw_10_Alpha_60_Vw_0.1	0	10	60	0.1	0.0436	konvergiert
117	Lp_0_Lw_20_Alpha_60_Vw_0.1	0	20	60	0.1	0.0440	konvergiert
118	Lp_0_Lw_30_Alpha_60_Vw_0.1	0	30	60	0.1	0.0434	konvergiert
119	Lp_0_Lw_50_Alpha_60_Vw_0.1	0	50	60	0.1	0.0440	konvergiert
120	Lp_15_Lw_0_Alpha_60_Vw_0.1	15	0	60	0.1	0.0400	konvergiert
121	Lp_15_Lw_10_Alpha_60_Vw_0.1	15	10	60	0.1	0.0370	konvergiert
122	Lp_15_Lw_20_Alpha_60_Vw_0.1	15	20	60	0.1	0.0446	konvergiert
123	Lp_15_Lw_30_Alpha_60_Vw_0.1	15	30	60	0.1	0.0470	konvergiert
124	Lp_30_Lw_0_Alpha_60_Vw_0.1	30	0	60	0.1	0.0500	konvergiert
125	Lp_30_Lw_10_Alpha_60_Vw_0.1	30	10	60	0.1	0.0530	konvergiert
126	Lp_30_Lw_20_Alpha_60_Vw_0.1	30	20	60	0.1	0.0111	konvergiert
127	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_60_Vw_1	-100	0	60	1	0.0000	konvergiert
128	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_60_Vw_1	-50	0	60	1	0.0000	konvergiert
129	Lp_0_Lw_0_Alpha_60_Vw_1	0	0	60	1	0.0706	konvergiert
130	Lp_0_Lw_10_Alpha_60_Vw_1	0	10	60	1	0.0741	konvergiert
131	Lp_0_Lw_20_Alpha_60_Vw_1	0	20	60	1	0.0710	konvergiert
132	Lp_0_Lw_30_Alpha_60_Vw_1	0	30	60	1	0.0645	konvergiert
133	Lp_0_Lw_50_Alpha_60_Vw_1	0	50	60	1	0.0630	konvergiert
134	Lp_15_Lw_0_Alpha_60_Vw_1	15	0	60	1	0.0083	konvergiert
135	Lp_15_Lw_10_Alpha_60_Vw_1	15	10	60	1	0.0676	konvergiert
136	Lp_15_Lw_20_Alpha_60_Vw_1	15	20	60	1	0.0690	konvergiert
137	Lp_15_Lw_30_Alpha_60_Vw_1	15	30	60	1	0.0674	konvergiert
138	Lp_30_Lw_0_Alpha_60_Vw_1	30	0	60	1	0.0265	konvergiert
139	Lp_30_Lw_10_Alpha_60_Vw_1	30	10	60	1	0.0300	konvergiert
140	Lp_30_Lw_20_Alpha_60_Vw_1	30	20	60	1	0.0501	konvergiert
141	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_60_Vw_2	-100	0	60	2	0.0000	konvergiert
142	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_60_Vw_2	-50	0	60	2	0.0104	konvergiert
143	Lp_0_Lw_0_Alpha_60_Vw_2	0	0	60	2	0.1602	konvergiert
144	Lp_0_Lw_10_Alpha_60_Vw_2	0	10	60	2	0.1400	konvergiert
145	Lp_0_Lw_20_Alpha_60_Vw_2	0	20	60	2	0.1320	konvergiert
146	Lp_0_Lw_30_Alpha_60_Vw_2	0	30	60	2	0.1244	konvergiert
147	Lp_0_Lw_50_Alpha_60_Vw_2	0	50	60	2	0.0950	konvergiert
148	Lp_15_Lw_0_Alpha_60_Vw_2	15	0	60	2	0.1460	konvergiert
149	Lp_15_Lw_10_Alpha_60_Vw_2	15	10	60	2	0.1530	konvergiert
150	Lp_15_Lw_20_Alpha_60_Vw_2	15	20	60	2	0.1570	konvergiert
151	Lp_15_Lw_30_Alpha_60_Vw_2	15	30	60	2	0.1491	konvergiert
152	Lp_30_Lw_0_Alpha_60_Vw_2	30	0	60	2	0.1543	konvergiert

Fall	Name	l_p [m]	l_w [m]	α [°]	w [m/s]	c_2 / c_1 [-]	Konvergenz- Geschichte
153	Lp_30_Lw_10_Alpha_60_Vw_2	30	10	60	2	0.1240	konvergiert
154	Lp_30_Lw_20_Alpha_60_Vw_2	30	20	60	2	0.1340	konvergiert
155	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_60_Vw_5	-100	0	60	5	0.0038	konvergiert
156	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_60_Vw_5	-50	0	60	5	0.0260	konvergiert
157	Lp_0_Lw_0_Alpha_60_Vw_5	0	0	60	5	0.4650	konvergiert
158	Lp_0_Lw_10_Alpha_60_Vw_5	0	10	60	5	0.4113	konvergiert
159	Lp_0_Lw_20_Alpha_60_Vw_5	0	20	60	5	0.3430	konvergiert
160	Lp_0_Lw_30_Alpha_60_Vw_5	0	30	60	5	0.3360	konvergiert
161	Lp_0_Lw_50_Alpha_60_Vw_5	0	50	60	5	0.3010	konvergiert
162	Lp_15_Lw_0_Alpha_60_Vw_5	15	0	60	5	0.4300	konvergiert
163	Lp_15_Lw_10_Alpha_60_Vw_5	15	10	60	5	0.4400	konvergiert
164	Lp_15_Lw_20_Alpha_60_Vw_5	15	20	60	5	0.3950	konvergiert
165	Lp_15_Lw_30_Alpha_60_Vw_5	15	30	60	5	0.3646	konvergiert
166	Lp_30_Lw_0_Alpha_60_Vw_5	30	0	60	5	0.3614	konvergiert
167	Lp_30_Lw_10_Alpha_60_Vw_5	30	10	60	5	0.3200	konvergiert
168	Lp_30_Lw_20_Alpha_60_Vw_5	30	20	60	5	0.1700	konvergiert
169	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_90_Vw_0.1	-100	0	90	0.1	0.0620	konvergiert
170	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_90_Vw_0.1	-50	0	90	0.1	0.0650	konvergiert
171	Lp_0_Lw_0_Alpha_90_Vw_0.1	0	0	90	0.1	0.0811	konvergiert
172	Lp_0_Lw_10_Alpha_90_Vw_0.1	0	10	90	0.1	0.0850	konvergiert
173	Lp_0_Lw_20_Alpha_90_Vw_0.1	0	20	90	0.1	0.0854	konvergiert
174	Lp_0_Lw_30_Alpha_90_Vw_0.1	0	30	90	0.1	0.0900	konvergiert
175	Lp_0_Lw_50_Alpha_90_Vw_0.1	0	50	90	0.1	-	nicht konvergiert
176	Lp_15_Lw_0_Alpha_90_Vw_0.1	15	0	90	0.1	0.0859	konvergiert
177	Lp_15_Lw_10_Alpha_90_Vw_0.1	15	10	90	0.1	0.0930	konvergiert
178	Lp_15_Lw_20_Alpha_90_Vw_0.1	15	20	90	0.1	0.0900	konvergiert
179	Lp_15_Lw_30_Alpha_90_Vw_0.1	15	30	90	0.1	0.0910	konvergiert
180	Lp_30_Lw_0_Alpha_90_Vw_0.1	30	0	90	0.1	0.1035	konvergiert
181	Lp_30_Lw_10_Alpha_90_Vw_0.1	30	10	90	0.1	0.1050	konvergiert
182	Lp_30_Lw_20_Alpha_90_Vw_0.1	30	20	90	0.1	0.1000	konvergiert
183	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_90_Vw_1	-100	0	90	1	0.0750	konvergiert
184	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_90_Vw_1	-50	0	90	1	0.0900	konvergiert
185	Lp_0_Lw_0_Alpha_90_Vw_1	0	0	90	1	0.0589	konvergiert
186	Lp_0_Lw_10_Alpha_90_Vw_1	0	10	90	1	0.0950	konvergiert
187	Lp_0_Lw_20_Alpha_90_Vw_1	0	20	90	1	0.1000	konvergiert
188	Lp_0_Lw_30_Alpha_90_Vw_1	0	30	90	1	0.0970	konvergiert
189	Lp_0_Lw_50_Alpha_90_Vw_1	0	50	90	1	-	nicht konvergiert
190	Lp_15_Lw_0_Alpha_90_Vw_1	15	0	90	1	0.1200	konvergiert
191	Lp_15_Lw_10_Alpha_90_Vw_1	15	10	90	1	0.1000	konvergiert
192	Lp_15_Lw_20_Alpha_90_Vw_1	15	20	90	1	0.1025	konvergiert
193	Lp_15_Lw_30_Alpha_90_Vw_1	15	30	90	1	0.1100	konvergiert
194	Lp_30_Lw_0_Alpha_90_Vw_1	30	0	90	1	0.1250	konvergiert
195	Lp_30_Lw_10_Alpha_90_Vw_1	30	10	90	1	0.1000	konvergiert

Fall	Name	l_p [m]	l_w [m]	α [°]	w [m/s]	c_2 / c_1 [-]	Konvergenz- Geschichte
196	Lp_30_Lw_20_Alpha_90_Vw_1	30	20	90	1	0.0950	konvergiert
197	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_90_Vw_2	-100	0	90	2	0.0975	konvergiert
198	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_90_Vw_2	-50	0	90	2	0.0132	konvergiert
199	Lp_0_Lw_0_Alpha_90_Vw_2	0	0	90	2	0.0796	konvergiert
200	Lp_0_Lw_10_Alpha_90_Vw_2	0	10	90	2	0.0805	konvergiert
201	Lp_0_Lw_20_Alpha_90_Vw_2	0	20	90	2	0.0750	konvergiert
202	Lp_0_Lw_30_Alpha_90_Vw_2	0	30	90	2	0.0850	konvergiert
203	Lp_0_Lw_50_Alpha_90_Vw_2	0	50	90	2	-	nicht konvergiert
204	Lp_15_Lw_0_Alpha_90_Vw_2	15	0	90	2	0.1050	konvergiert
205	Lp_15_Lw_10_Alpha_90_Vw_2	15	10	90	2	0.0800	konvergiert
206	Lp_15_Lw_20_Alpha_90_Vw_2	15	20	90	2	0.0805	konvergiert
207	Lp_15_Lw_30_Alpha_90_Vw_2	15	30	90	2	0.0786	konvergiert
208	Lp_30_Lw_0_Alpha_90_Vw_2	30	0	90	2	0.0150	konvergiert
209	Lp_30_Lw_10_Alpha_90_Vw_2	30	10	90	2	0.0100	konvergiert
210	Lp_30_Lw_20_Alpha_90_Vw_2	30	20	90	2	0.0180	konvergiert
211	Lp_Neg_100_Lw_0_Alpha_90_Vw_5	-100	0	90	5	0.0690	konvergiert
212	Lp_Neg_50_Lw_0_Alpha_90_Vw_5	-50	0	90	5	0.2000	konvergiert
213	Lp_0_Lw_0_Alpha_90_Vw_5	0	0	90	5	0.2190	konvergiert
214	Lp_0_Lw_10_Alpha_90_Vw_5	0	10	90	5	0.2160	konvergiert
215	Lp_0_Lw_20_Alpha_90_Vw_5	0	20	90	5	0.2000	konvergiert
216	Lp_0_Lw_30_Alpha_90_Vw_5	0	30	90	5	0.1600	konvergiert
217	Lp_0_Lw_50_Alpha_90_Vw_5	0	50	90	5	-	nicht konvergiert
218	Lp_15_Lw_0_Alpha_90_Vw_5	15	0	90	5	0.0070	konvergiert
219	Lp_15_Lw_10_Alpha_90_Vw_5	15	10	90	5	0.0009	konvergiert
220	Lp_15_Lw_20_Alpha_90_Vw_5	15	20	90	5	0.0400	konvergiert
221	Lp_15_Lw_30_Alpha_90_Vw_5	15	30	90	5	-	nicht konvergiert
222	Lp_30_Lw_0_Alpha_90_Vw_5	30	0	90	5	0.0040	konvergiert
223	Lp_30_Lw_10_Alpha_90_Vw_5	30	10	90	5	0.0000	konvergiert
224	Lp_30_Lw_20_Alpha_90_Vw_5	30	20	90	5	0.0000	konvergiert
225	Lp_Neg100_Lw_0_Alpha_120_Vw_0.1	-100	0	120	0.1	0.0455	konvergiert
226	Lp_Neg50_Lw_0_Alpha_120_Vw_0.1	-50	0	120	0.1	0.0470	konvergiert
227	Lp_0_Lw_0_Alpha_120_Vw_0.1	0	0	120	0.1	0.0561	konvergiert
228	Lp_0_Lw_10_Alpha_120_Vw_0.1	0	10	120	0.1	0.0643	konvergiert
229	Lp_0_Lw_20_Alpha_120_Vw_0.1	0	20	120	0.1	0.0670	konvergiert
230	Lp_0_Lw_30_Alpha_120_Vw_0.1	0	30	120	0.1	0.0728	konvergiert
231	Lp_0_Lw_50_Alpha_120_Vw_0.1	0	50	120	0.1	0.0753	konvergiert
232	Lp_15_Lw_0_Alpha_120_Vw_0.1	15	0	120	0.1	0.0895	konvergiert
233	Lp_15_Lw_10_Alpha_120_Vw_0.1	15	10	120	0.1	0.0709	konvergiert
234	Lp_15_Lw_20_Alpha_120_Vw_0.1	15	20	120	0.1	0.0760	konvergiert
235	Lp_15_Lw_30_Alpha_120_Vw_0.1	15	30	120	0.1	0.0935	konvergiert
236	Lp_30_Lw_0_Alpha_120_Vw_0.1	30	0	120	0.1	0.1260	konvergiert
237	Lp_30_Lw_10_Alpha_120_Vw_0.1	30	10	120	0.1	0.0945	konvergiert

Fall	Name	l_p [m]	l_w [m]	α [°]	w [m/s]	c_2 / c_1 [-]	Konvergenz- Geschichte
238	Lp_30_Lw_20_Alpha_120_Vw_0.1	30	20	120	0.1	0.0910	konvergiert

Tabelle 32: Rechenfälle und Ergebnisse der Portal-Portal-Rezirkulation

Die Konvergenzkriterien sind in Kapitel 5.2.6 erläutert. Im Fall einer quasiperiodischen Schwingung der Lösung wurde das Konzentrationsverhältnis als der Mittelwert über eine Periode bestimmt (vgl. Abbildung 51). Dieses Vorgehen ist in Tabelle 32 mit „gemittelt“ bezeichnet.

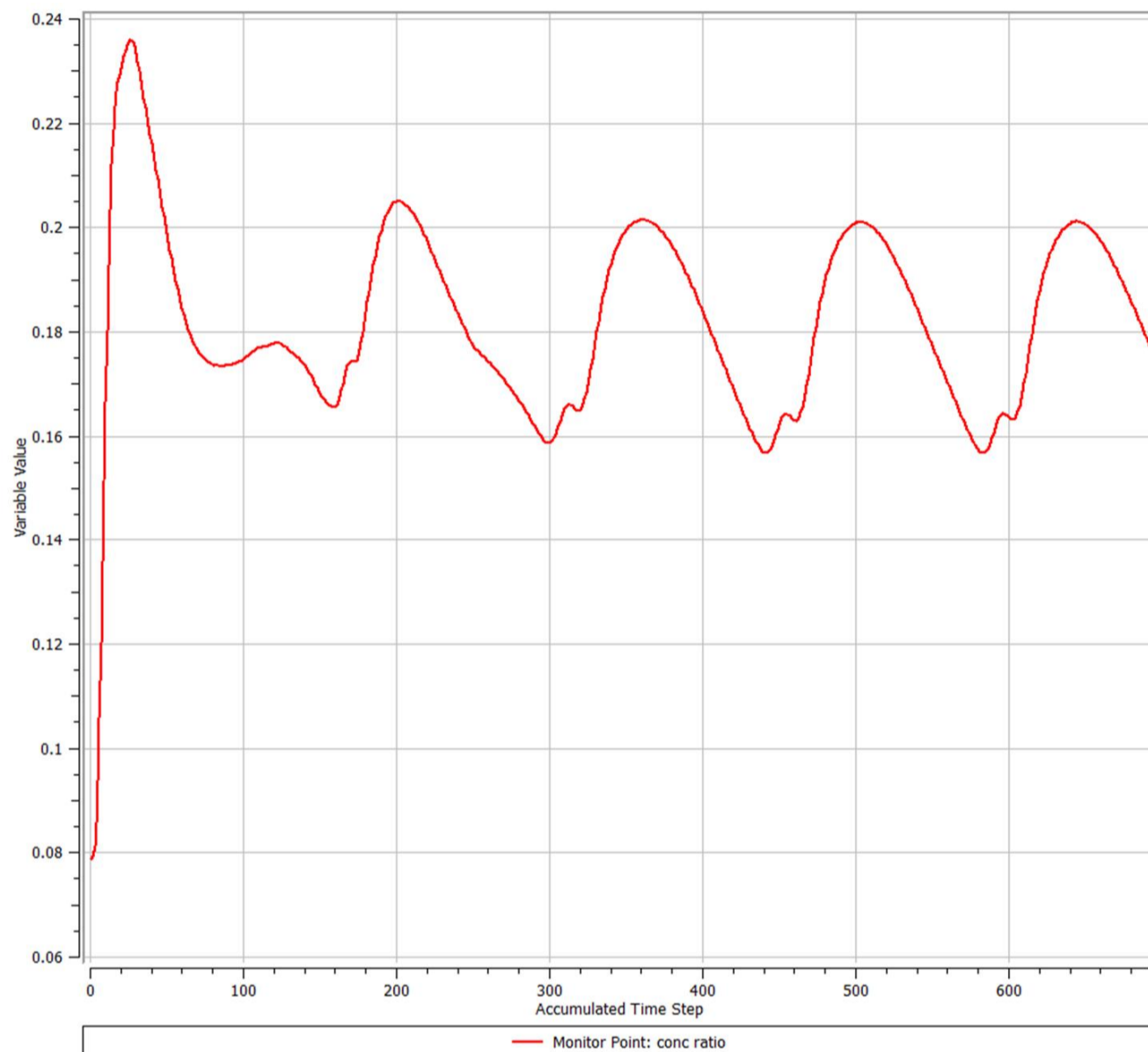


Abbildung 51: Konvergenzgeschichte des Konzentrationsverhältnisses der Berechnung Lp_0_Lw_10_Alpha_30_Vw_2 (Fall 88). Der Mittelwert des Konzentrationsverhältnisses der letzten Periode vor Rechnungsabbruch beträgt ungefähr 0.18

I.2 Kamin-Portal-Rezirkulation

I.2.1 Feste Parameter der Rechenmodelle

Die festen Parameter der Berechnungen sind in Tabelle 33 dokumentiert.

Grösse	Einheit	Wert
Referenztemperatur	°C	20.0
Referenzdichte	kg·m ⁻³	1.206
Volumenstrom am Kaminaustritt (3x Tunnelquerschnitt)	m ³ s ⁻¹	165
Querschnittsfläche der Tunnelröhren	m ²	55
Hydraulische Durchmesser der Tunnelröhren	m	7.52
Dicke der Trennwand	m	0.2

Grösse	Einheit	Wert
Geschwindigkeit in die Ereignisröhre	m·s ⁻¹	1.5
Geschwindigkeit in die Gegenröhre	m·s ⁻¹	0.5
Massen- und Volumenstromverhältnis zwischen der Gegenröhre und dem Kamin	-	0.33

Tabelle 33: Feste Parameter der Kamin-Portal-Simulationen

I.2.2 Simulationsfälle und Ergebnisse

Die Simulationsfälle sind in der Tabelle 34 dokumentiert.

Fall	l [m]	v [m·s ⁻¹]	h [m]	w [m·s ⁻¹]	c ₂ / c ₁ [%]
1	0	10	0	0.1	2.13E-03
2	0	15	0	0.1	3.12E-06
3	0	20	0	0.1	9.43E-08
4	0	25	0	0.1	1.10E-06
5	20	10	0	0.1	8.06E-06
6	20	15	0	0.1	2.72E-06
7	20	20	0	0.1	3.10E-05
8	20	25	0	0.1	2.23E-08
9	50	10	0	0.1	5.27E-03
10	50	15	0	0.1	4.95E-03
11	50	20	0	0.1	6.36E-06
12	50	25	0	0.1	1.19E-05
13	100	10	0	0.1	1.65E-03
14	100	15	0	0.1	1.85E-04
15	100	20	0	0.1	4.67E-04
16	100	25	0	0.1	5.67E-04
17	0	10	5	0.1	2.10E-07
18	0	15	5	0.1	7.67E-08
19	0	20	5	0.1	1.17E-06
20	0	25	5	0.1	8.62E-07
21	20	10	5	0.1	2.94E-05
22	20	15	5	0.1	4.21E-07
23	20	20	5	0.1	4.91E-07
24	20	25	5	0.1	1.06E-06
25	50	10	5	0.1	2.53E-04
26	50	15	5	0.1	2.83E-05
27	50	20	5	0.1	5.08E-06
28	50	25	5	0.1	1.60E-05
29	100	10	5	0.1	8.36E-04
30	100	15	5	0.1	6.42E-05
31	100	20	5	0.1	2.05E-04
32	100	25	5	0.1	2.11E-04
33	0	10	15	0.1	3.22E-08
34	0	15	15	0.1	1.19E-10
35	0	20	15	0.1	1.13E-08
36	0	25	15	0.1	2.01E-09
37	20	10	15	0.1	7.25E-07
38	20	15	15	0.1	1.54E-07

Fall	l [m]	v [m·s ⁻¹]	h [m]	w [m·s ⁻¹]	c ₂ / c ₁ [%]
39	20	20	15	0.1	1.13E-08
40	20	25	15	0.1	3.52E-07
41	50	10	15	0.1	3.11E-04
42	50	15	15	0.1	2.63E-05
43	50	20	15	0.1	7.10E-05
44	50	25	15	0.1	7.91E-07
45	100	10	15	0.1	5.37E-04
46	100	15	15	0.1	6.93E-05
47	100	20	15	0.1	3.78E-05
48	100	25	15	0.1	7.37E-05
49	0	10	30	0.1	1.42E-07
50	0	15	30	0.1	4.38E-12
51	0	20	30	0.1	1.92E-06
52	0	25	30	0.1	1.59E-07
53	20	10	30	0.1	4.01E-08
54	20	15	30	0.1	1.95E-08
55	20	20	30	0.1	2.70E-08
56	20	25	30	0.1	1.61E-09
57	50	10	30	0.1	9.31E-07
58	50	15	30	0.1	7.43E-09
59	50	20	30	0.1	3.59E-08
60	50	25	30	0.1	2.56E-06
61	100	10	30	0.1	1.08E-05
62	100	15	30	0.1	5.89E-06
63	100	20	30	0.1	4.80E-06
64	100	25	30	0.1	1.74E-05
65	0	10	0	1	4.20E-01
66	0	15	0	1	1.83E-01
67	0	20	0	1	9.40E-02
68	0	25	0	1	3.18E-02
69	20	10	0	1	1.65E-01
70	20	15	0	1	1.13E-01
71	20	20	0	1	1.83E-01
72	20	25	0	1	2.90E-01
73	50	10	0	1	2.25E-01
74	50	15	0	1	2.05E-01
75	50	20	0	1	2.65E-01
76	50	25	0	1	1.60E-01
77	100	10	0	1	3.03E-01
78	100	15	0	1	3.37E-01
79	100	20	0	1	1.32E-01
80	100	25	0	1	1.31E-03
81	0	10	5	1	2.67E-02
82	0	15	5	1	1.27E-02
83	0	20	5	1	3.43E-03
84	0	25	5	1	9.82E-04

Fall	l [m]	v [m·s ⁻¹]	h [m]	w [m·s ⁻¹]	c ₂ / c ₁ [%]
85	20	10	5	1	6.66E-02
86	20	15	5	1	1.69E-02
87	20	20	5	1	1.28E-02
88	20	25	5	1	3.08E-03
89	50	10	5	1	4.00E-02
90	50	15	5	1	1.42E-02
91	50	20	5	1	1.31E-02
92	50	25	5	1	1.12E-02
93	100	10	5	1	9.63E-02
94	100	15	5	1	6.28E-02
95	100	20	5	1	4.16E-02
96	100	25	5	1	3.35E-02
97	0	10	15	1	6.68E-06
98	0	15	15	1	8.48E-07
99	0	20	15	1	9.38E-07
100	0	25	15	1	6.05E-08
101	20	10	15	1	1.89E-04
102	20	15	15	1	2.18E-05
103	20	20	15	1	6.74E-06
104	20	25	15	1	1.64E-05
105	50	10	15	1	3.40E-03
106	50	15	15	1	1.94E-03
107	50	20	15	1	7.96E-04
108	50	25	15	1	5.18E-04
109	100	10	15	1	2.70E-02
110	100	15	15	1	1.18E-02
111	100	20	15	1	6.37E-03
112	100	25	15	1	4.46E-03
113	0	10	30	1	3.29E-11
114	0	15	30	1	1.43E-09
115	0	20	30	1	1.28E-09
116	0	25	30	1	4.37E-10
117	20	10	30	1	8.01E-09
118	20	15	30	1	3.07E-09
119	20	20	30	1	3.06E-10
120	20	25	30	1	1.26E-10
121	50	10	30	1	3.83E-05
122	50	15	30	1	6.39E-06
123	50	20	30	1	1.92E-06
124	50	25	30	1	9.86E-07
125	100	10	30	1	2.43E-03
126	100	15	30	1	7.59E-04
127	100	20	30	1	3.44E-04
128	100	25	30	1	1.93E-04

Fall	l [m]	v [m·s ⁻¹]	h [m]	w [m·s ⁻¹]	c ₂ / c ₁ [%]
129	0	10	0	2	4.03E-01
130	0	15	0	2	3.75E-01
131	0	20	0	2	3.15E-01
132	0	25	0	2	2.45E-01
133	20	10	0	2	3.30E-01
134	20	15	0	2	1.80E-01
135	20	20	0	2	1.75E-01
136	20	25	0	2	1.87E-01
137	50	10	0	2	2.82E-01
138	50	15	0	2	2.00E-01
139	50	20	0	2	1.79E-01
140	50	25	0	2	1.70E-01
141	100	10	0	2	4.51E-01
142	100	15	0	2	3.37E-01
143	100	20	0	2	2.58E-01
144	100	25	0	2	2.40E-01
145	0	10	5	2	5.36E-03
146	0	15	5	2	2.13E-03
147	0	20	5	2	1.30E-03
148	0	25	5	2	1.48E-03
149	20	10	5	2	8.29E-02
150	20	15	5	2	3.79E-02
151	20	20	5	2	5.85E-02
152	20	25	5	2	1.96E-02
153	50	10	5	2	8.87E-02
154	50	15	5	2	4.56E-02
155	50	20	5	2	3.40E-02
156	50	25	5	2	4.55E-02
157	100	10	5	2	2.25E-01
158	100	15	5	2	1.18E-01
159	100	20	5	2	7.87E-02
160	100	25	5	2	6.10E-02
161	0	10	15	2	1.30E-06
162	0	15	15	2	3.00E-07
163	0	20	15	2	2.70E-07
164	0	25	15	2	1.91E-07
165	20	10	15	2	1.80E-04
166	20	15	15	2	4.33E-05
167	20	20	15	2	6.90E-06
168	20	25	15	2	2.73E-06
169	50	10	15	2	6.97E-03
170	50	15	15	2	3.52E-03
171	50	20	15	2	1.76E-03
172	50	25	15	2	1.05E-03

Fall	l [m]	v [m·s ⁻¹]	h [m]	w [m·s ⁻¹]	c ₂ / c ₁ [%]
173	100	10	15	2	6.22E-02
174	100	15	15	2	3.54E-02
175	100	20	15	2	1.90E-02
176	100	25	15	2	1.32E-02
177	0	10	30	2	1.13E-07
178	0	15	30	2	4.09E-08
179	0	20	30	2	3.60E-09
180	0	25	30	2	9.69E-10
181	20	10	30	2	1.54E-07
182	20	15	30	2	3.65E-08
183	20	20	30	2	1.22E-09
184	20	25	30	2	3.41E-09
185	50	10	30	2	9.15E-05
186	50	15	30	2	3.33E-05
187	50	20	30	2	1.06E-05
188	50	25	30	2	5.61E-06
189	100	10	30	2	6.84E-03
190	100	15	30	2	2.97E-03
191	100	20	30	2	1.57E-03
192	100	25	30	2	9.00E-04
193	0	10	0	5	1.88E+00
194	0	15	0	5	3.62E-01
195	0	20	0	5	2.99E-01
196	0	25	0	5	3.91E-01
197	20	10	0	5	1.17E+00
198	20	15	0	5	9.32E-01
199	20	20	0	5	3.72E-01
200	20	25	0	5	2.85E-01
201	50	10	0	5	3.24E+00
202	50	15	0	5	1.18E+00
203	50	20	0	5	6.94E-01
204	50	25	0	5	6.69E-01
205	100	10	0	5	1.86E+00
206	100	15	0	5	9.11E-01
207	100	20	0	5	4.96E-01
208	100	25	0	5	3.00E-01
209	0	10	5	5	2.01E-02
210	0	15	5	5	7.59E-03
211	0	20	5	5	4.14E-03
212	0	25	5	5	3.37E-03
213	20	10	5	5	3.63E-01
214	20	15	5	5	4.71E-02
215	20	20	5	5	6.71E-02
216	20	25	5	5	4.11E-02

Fall	l [m]	v [m·s ⁻¹]	h [m]	w [m·s ⁻¹]	c ₂ / c ₁ [%]
217	50	10	5	5	7.39E-01
218	50	15	5	5	2.94E-01
219	50	20	5	5	1.99E-01
220	50	25	5	5	1.04E-01
221	100	10	5	5	9.41E-01
222	100	15	5	5	6.88E-01
223	100	20	5	5	3.98E-01
224	100	25	5	5	2.16E-01
225	0	10	15	5	1.30E-05
226	0	15	15	5	1.20E-06
227	0	20	15	5	7.07E-07
228	0	25	15	5	9.30E-08
229	20	10	15	5	2.37E-03
230	20	15	15	5	7.72E-04
231	20	20	15	5	1.01E-04
232	20	25	15	5	5.32E-05
233	50	10	15	5	5.64E-02
234	50	15	15	5	2.60E-02
235	50	20	15	5	1.30E-02
236	50	25	15	5	6.58E-03
237	100	10	15	5	2.72E-01
238	100	15	15	5	1.23E-01
239	100	20	15	5	9.25E-02
240	100	25	15	5	6.22E-02
241	0	10	30	5	7.57E-10
242	0	15	30	5	8.02E-11
243	0	20	30	5	2.61E-12
244	0	25	30	5	1.00E-10
245	20	10	30	5	1.61E-07
246	20	15	30	5	4.43E-08
247	20	20	30	5	4.60E-09
248	20	25	30	5	7.98E-09
249	50	10	30	5	5.63E-04
250	50	15	30	5	1.07E-04
251	50	20	30	5	1.24E-04
252	50	25	30	5	5.04E-05
253	100	10	30	5	2.75E-02
254	100	15	30	5	1.19E-02
255	100	20	30	5	7.71E-03
256	100	25	30	5	5.23E-03
257	500	15	15	1	2.04E-03

Tabelle 34: Rechenfälle und Ergebnisse der Kamin-Portal Rezirkulation

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
CFD	Computational Fluid Dynamics
K-P	Kamin-Portal
P-P	Portal-Portal

Literaturverzeichnis

Ansys 2009	Ansys Inc. Ltd., www.ansys.com
Arya & Shipman 1981	Arya S.P., Shipman M.S.: An Experimental Investigation of Flow and Diffusion in the Disturbed Boundary Layer over a Ridge – 1. Mean Flow and Turbulence Structure, <i>Atmos. Envir.</i> 15 (1981), 1173–1184
Arya et al. 1987	Arya S.P., Capuano M.E., Fagen L.C.: Some Fluid Modelling Studies of Flow and Dispersion Over Two-Dimensional Low Hills, <i>Atmos. Envir.</i> 21 (1987), 753–764
ASTRA 13001 2008	ASTRA, Richtlinie Lüftung der Strassentunnel, Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung, ASTRA 13001, Ausgabe 2008 V2.01, Bundesamt für Strassen ASTRA, 3003 Bern
ASTRA 13002 2008	ASTRA, Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln, ASTRA 13002, Ausgabe 2008 V1.05. Bundesamt für Strassen ASTRA, 3003 Bern
ASTRA 89001 2009	ASTRA, Dokumentation, Risikokzept Naturgefahren Nationalstrassen, Methodik für eine risikobasierte Beurteilung, Prävention und Bewältigung von gravitativen Naturgefahren auf Nationalstrassen, ASTRA 89 001, Ausgabe 2009 V1.30. Bundesamt für Strassen ASTRA, 3003 Bern
Aynsley et al. 1977	Aynsley, R. M., Melbourne, W., Vickery, B.J.: <i>Architectural Aerodynamics</i> , Applied Science Publishers, 1977
Babrauskas 1995	Babrauskas V. (1995): Heat Release Rates, in: <i>The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering</i> , section 3, chapter 1, 3 rd edition, Society of Fire Protection Engineers, Copyright © 2002. Reproduced with permission from the National Fire Protection Association. This reprinted material is not the complete and official position of the NFPA on the referenced subject, which is represented only by the standard in its entirety.
Bardina et al. 1997a	Bardina J.E., Huang P.G. and Coakley T.J.: <i>Turbulence Modeling, Validation Testing and Development</i> , NASA Technical Memorandum 110446, 1997
Bardina et al. 1997b	Bardina, J.E., Huang, P.G. and Coakley, T.J.; <i>Turbulence Modeling Validation</i> , AIAA Paper 97–2121, 1997
Baumann 1979	H.O. Baumann: Air recirculation between tunnel portals, Paper E2, pp. 189–200, <i>Proceedings 3rd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels</i> , Sheffield, organised by BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford (March, 19 th –21 st , 1979)
COST 2007	Jörg Franke, Antti Hellsten, Heinke Schlünzen, Bertrand Carissimo: <i>Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment</i> , COST Action 732, Quality assurance and improvement of microscale meteorological models, 1 May 2007, COST Office 2007, www.cost.esf.org
Csanady 1973	Csanady G. T.: <i>Turbulent Diffusion in the Environment</i> , Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1973
Davenport 1960	Davenport A. G.: <i>Wind Loads on Structures</i> . Technical Paper no. 88 of the Division of Building Research, National Research Council, Ottawa, Canada, March 1960
ERCFTAC	Best practice guidelines for industrial computational fluid dynamics
Fujimara et al. 1988	Fujimara H., Mizuno A., Ohashi H., Ishidaka T., Nakahori I., Kimura S.: Practical test of emergency ventilation combined with bus firing at the Kann-Etsu tunnel, Paper F1, pp. 353–366, <i>Proceedings of the 6th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels</i> , Durham, UK, organised and sponsored by BHRA, The Fluid Engineering Center, Cranfield, Bedford MK43 0AJ, UK (27–29 September 1988)
GIS-ZH 2012	Geografisches Informationssystem des Kantons Zürich (GIS-ZH), http://www.gis.zh.ch/gb4/bluevari/gb.asp
Haerter & Steinemann 1977	A. Haerter, U. Steinemann: Immissionen durch Abluftstrahl aus Tunnelportal, Bericht Nr. 77-47-01 der Schindler-Haerter AG, Zürich, November 1977 (nicht veröffentlicht)
Haerter & Baumann 1978	Haerter A., Baumann H.: Strömungskurzschlüsse bei Tunneln neben- und nacheinander mit/ohne seitliche Begrenzung, Bericht Nr. 76-13-03a der Schindler-Haerter AG, Zürich, erstellt im Auftrag der Tiefbau- und Strassenverwaltung St. Gallen; Februar 1978 (nicht veröffentlicht)
Haerter 1979	Haerter A.: Tunnellüftungssysteme mit geringer Abluftimmission, <i>Schweizer Baublatt</i> , Nr. 39, 13. Mai 1980 Mit freundlicher Genehmigung der HBI Haerter AG und der DOCUMEDIA Schweiz GmbH

Hargreaves & Wright 2007	D.M.Hargreaves, N.G.Wright: On the use of the k-ε model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer, <i>Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics</i> 95 (2007), 355–369.
Herb 1964	Herb H.: Inversionen, ein Problem für die Luftreinhaltung, <i>Staub</i> 24 (1964), Nr. 5, S. 182–186.
Huser et al. 1997	Asmund Huser, Pål Jahre Nilsen, Helge Skåtun: Application of k-ε model to the stable ABL: Pollution in complex terrain, <i>Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics</i> 67 & 68 (1997), 425–436.
IG BSA Seelisberg 2010	Bundesamt für Strassen, IG BSA Seelisbergtunnel, 22.12.2010, N02 – Erhaltungsabschnitt Beckenried–Seedorf, Massnahmekonzept, Beurteilung der Anti-Rezirkulationsmassnahmen an den Portalen des Seelisbergtunnels, 080112-100-130-004 / Technischer Bericht
Ingason & Lönnemark 2004	Ingason H., Lönnemark A.: Recent Achievements Regarding Measuring of Time-Heat and Time-Temperature Development in Tunnels, <i>Safe & Reliable Tunnels, Innovative European Achievements, First International Symposium, Prague 2004</i>
Ingason 2006	Ingason, H.:“Design Fires in Tunnels, <i>Safe and Reliable Tunnels, Innovative European Achievements, Second International Symposium, Lausanne, Switzerland, 2006</i>
I.S.T. 2006	I.S.T. Integrierte Sicherheits-Technik GmbH, Kobra-3D, Referenzhandbuch, Version 5, 2006
Jin 1978	Jin T.: Visibility through Fire Smoke, <i>Jour, Fire and Flammability</i> , Vol. 9 (April 1978), pp. 135–155
Jin 2002	Jin, T.: Visibility and Human Behavior in Fire Smoke, in: <i>The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering</i> , section 2, chapter 4, 3 rd edition, Society of Fire Protection Engineers, Copyright © 2002. Reproduced with permission from the National Fire Protection Association. This reprinted material is not the complete and official position of the NFPA on the referenced subject, which is represented only by the standard in its entirety.
John 1983	John, R.: Ermittlung der erforderlichen Luftvolumenströme zur Verdünnung von Rauchgasen auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Mass. <i>Forschungsberichte Nr. 46 und 50, Forschungsstelle für Bandschutztechnik der technischen Hochschule Karlsruhe, Karlsruhe, 1982/83 11</i>
Karlsson & Quintiere 1999	Karlsson B., Quintiere J.G.: <i>Enclosure Fire Dynamics</i> , CRC Press, London (1999)
Klote & Milke 1993	Klote H. K., Milke J. A.: <i>Design of smoke management systems</i> , ASHRAE, 1993
Khurshudyan et al. 1981	Khurshudyan L.H., Snyder W.H., Nekrasov I.V.: Flow and Dispersion of pollutants over two-dimensional hills, EPA-600/4-81-067 (1981)
Lemelin et al. 1988	Lemelin D.R., Surry D., Davenport A.G.: Simple approximations for wind speed-up over hills; <i>J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn.</i> 28 (1988), 117–127
Lönnemark & Blomqvist 2006	Lönnemark A., Blomqvist P.: Emissions from an automobile fire, <i>Chemosphere</i> 62 (2006), 1043–1056.
Maarsingh & Swart 1991	Maarsingh R. A., Swart L.: Wind Tunnel Experiments on Wind Effects at Tunnel Portals, <i>Proceedings of the 7th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels</i> , Brighton, UK, 27–29 November 1991, pp. 545–561, Elsevier Science Publisher Ltd., England
Masters 2004	Masters G. M.: <i>Introduction to Environmental Engineering and Science</i> , 2 nd Edition, Pearson Education, Delhi India, 2004
Mayer 2006	Mayer, G.: Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation, <i>Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau</i> , Heft 47, 2006
Mulholland 2002	Mulholland G. W.: Smoke Production and Properties, in: <i>The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering</i> , section 2, chapter 1, 3 rd edition, Society of Fire Protection Engineers, Copyright © 2002. Reproduced with permission from the National Fire Protection Association. This reprinted material is not the complete and official position of the NFPA on the referenced subject, which is represented only by the standard in its entirety.
Pasquill 1961	Pasquill F.: The estimation of the dispersion of windborne material, <i>Meteorol. Mag.</i> , 90 (1963), 33–49, February 1961
Pasquill 1962	Pasquill F.: <i>Atmospheric Diffusion, The Dispersion of Windborne Material from Industrial and other Sources</i> , D. van Nostand Company Ltd., London, 1962
PIARC 05.02.B 1995	PIARC, <i>Road Tunnels: Emissions, Ventilation, Environement</i> , 05.02.B, La Défense, France, 1995

PIARC 05.05.B 1999	PIARC: Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 05.05.B, La Défense, France, 1999
Pöyry 2011	Buchmann R.: N03 Habsburgtunnel, Erhöhung Tunnelsicherheit, Dossier D-3.1: Lüftung (Aggregate), Massnahmekonzept, Pöyry Infra AG, 28.02.2011
Pöyry 2012	Buchmann R.: N03 Habsburgtunnel, Erhöhung Tunnelsicherheit, Beurteilung der Portal-Portal-Rezirkulation, Pöyry Infra AG, 21.02.2012
Richards & Hoxey 1993	Richards P.J. and Hoxey R.P. (1993): Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-epsilon turbulence model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 46 & 47, 145–153
Rickli & Pfeifer 1989	Rickli B., Pfeifer R.: Das Ausbreitungsklima der Innerschweiz, Band 2, Geographisches Institut der Universität Bern, April 1989
Ross & Larock 1997	Ross J.A., Larock B.E.: An algebraic stress finite element model of turbulent flow, Int. J. Num. Meth. Fluids 24 (1997), 693–714
SIA 197/2 2004	Projektierung Tunnel, Strassentunnel; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Postfach, CH-8039 Zürich
Solazzo et al. 2007	Solazzo E., Cai Xiaoming, Vardoulakis S.: Evaluation of the traffic producing turbulence within a modelled street canyon using computational fluid dynamics calculations, Proceedings of the 11 th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, UK, July 2–5 2007
Stangroom 2004	Stangroom P.: CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain, Thesis submitted to the University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy, January 2004
Steinauer et al. 2007	Steinauer B., Mayer G., Kündig P.: Bericht zum Forschungsprojekt FE 03.375/2004/FGB, Brandversuche in Straßentunneln, Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 57, 2007
Steinert 1994	Steinert C.: Energie- und Rauchfreisetzungsraten bei Tunnelbrandversuchen, Tunnel 5/94
StfV 1992	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): Handbuch III zur Störfallverordnung (StfV), Richtlinien für Verkehrswege, Bern, Dezember 1992
STUVA 1978	Blennemann F., Meyeroltmanns W.: Untersuchungen zu den Auswirkungen von mechanischen und natürlichen Tunnellüftungen auf die unmittelbare Umgebung von Strassentunneln (Vorstudie), STUVA-Forschungsbericht 9/78, September 1978
Tewarson 1995	Tewarson, A. (1995): Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, in: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, section 3, chapter 4, 3 rd edition, Society of Fire Protection Engineers, Copyright © 2002. Reproduced with permission from the National Fire Protection Association. This reprinted material is not the complete and official position of the NFPA on the referenced subject, which is represented only by the standard in its entirety.
Teunissen et al. 1987	Teunissen H. W., Shokr M. E., Bowen A. J., Wood C. J., Green D. W. R.: The Askervein Hill Project: Wind-tunnel simulations at three length scales. Boundary-Layer Meteorology, 40 (1-2), p.1-29, July 1987
Thangam & Hur 1991	Thangam S., Hur N.: A highly-resolved numerical study of turbulent separated flow past a backward-facing step, Int. Jour. Eng. Sci., Vol. 29, Issue 5 (1991), 607–615
Turner 1994	Turner Bruce D.: Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, An Introduction to Dispersion Modeling, 2 nd edition, CRC Press Inc., 1994
VDI 1988	Verein Deutscher Ingenieure: Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre – Ausbreitungsmodelle für Luftreinhaltepläne, VDI 3782 (1988)
VSWKI 2011	Richtlinie VSWKI BT101-04, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen – Teil 4: Ingenieurverfahren zur Bemessung von Entrauchungsanlagen – Grundlagen, Erstausgabe 2011-09, Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren, CH-3322 Schönbühl, www.swki.ch
Walker 1978	Walker J.: The Amateur Scientist – What Plumes of Smoke tell about the structure of the Atmosphere, Scientific American 238 (1978), Nr. 5, S. 162–171
Weng et al. 2000	Weng W., Taylor P.A., Walmsley J.L.: Guidelines for airflow over complex terrain: model developments; J. Wind Eng. and Ind. Aerodyn. 86 (2000), 169–186
Xia & Leung 2001	Xia J., Leung D.Y.C.: Numerical study on flow over buildings in street canyon, J. Env. Eng. 127 (2001), 369–376

Zulauf et al. 2009 Zulauf C., Locher P., Ernst Basler + Partner, Zürich, Steinauer B., Mayer G., Zimmermann U., Institut für Straßenwesen Aachen, RWTH Aachen, Baltzer W., Riepe W., BUNG-AG, beratende Ingenieure, Heidelberg, Kündig K., Kündig Ingenieurbüro, Zürich: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln, Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), 2009 (Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“, Heft B66, Mai 2009)

Projektabschluss

Formular 3 ARAMIS SBT als PDF (Das Formular einscannen, dann das PDF öffnen und dann mit dem Schnappschuss-Werkzeug (Fotoapparat) die Seiten markieren und dann hier einfügen).



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 28.08.2013

Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU 2008/007
 Projekttitel: Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunnel
 Enddatum: 01.07.2013

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

1. Es wurde eine analytische und graphische Methode entwickelt zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials durch Rauch in der Gegenröhre. Diese stellt einen funktionalen Zusammenhang her zwischen der Brandleistung, der Sichtweite in der Gegenröhre und der Rauchrezirkulation. Diese Methode wurde mit einer Wahrscheinlichkeitsbetrachtung ergänzt. Grundsätzliche Überlegungen zur Rezirkulation zeigen, dass eine kritische Rezirkulation nur bei einer ungünstigen Verkettung von Bedingungen eintreten und daher eine eher geringe Eintrittshäufigkeit erwartet werden kann, die mindestens auf eine Grössenordnung kleiner geschätzt wird als die Eintrittshäufigkeit eines Brandereignisses.

2. Die Rezirkulation von Portal zu Portal wurde mittels einer Parameterstudie numerisch untersucht. Die veränderlichen Parameter waren der Portalversatz, die Trennwandlänge, die Windstärke und die Windrichtung in einer neutralen Atmosphäre. Die Ergebnisse gelten für Rauch- und Schadstoffrezirkulation in den gegebenen geometrischen und atmosphärischen Grenzen. Die ermittelten Rezirkulationswerte lagen zwischen 0 und 55 %. Als treibende Kraft für die Rezirkulation wurde die Windstärke vor der Windrichtung identifiziert: Bei starkem Wind ist die Rezirkulation am höchsten bei Wind mit Querkomponente und steigt mit zunehmender Windstärke an. Eine Trennwand von mindestens 30 m erwies sich als optimal. Bei schwachem Wind, der gegen das Portal gerichtet ist, ist die Rezirkulation stets höher als bei den Windrichtungen mit Querkomponenten. Der Auftrieb hat bei heutigem Kenntnisstand bei grossen Temperaturdifferenzen einen positiven, reduzierenden Einfluss auf die Rezirkulation; eine Aussage für kleine Temperaturdifferenzen ist nicht möglich.

3. Die Rezirkulation von Kamin zu Portal wurde mittels einer Parameterstudie numerisch untersucht. Die veränderlichen Parameter waren der Abstand Kamin-Portal, die Kaminhöhe, die Austrittsgeschwindigkeit der Luft aus dem Kamin und die Windstärke. Diese Parameter wurden für eine neutrale und isotherme Atmosphäre mit einer Windrichtung von Kamin zu Portal und unter Vernachlässigung der topographischen Effekte modelliert. Die Effekte einer instabilen Atmosphäre, der Inversionslagen und der topographischen Effekte, wie Hangwinde und Ablösungsblasen des Windes hinter einem Hügel, wurden nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse lassen sich also am besten auf Tunnel durch niedrige Hügel anwenden. Die ermittelten Rezirkulationswerte lagen zwischen 0 und 3 %. Mit steigender Windstärke nimmt die Rezirkulation tendenziell zu; sie ist bei neutraler Atmosphäre in der Regel aber unkritisch. Der Kamin sollte möglichst näher als 20 m vom Portal entfernt sein und die Verbindungsgerade Kamin-Portal nicht mit einer Hauptwindrichtung oder einer Hangwindrichtung übereinstimmen. Die Lokalisierung des Kamins hat auf der Grundlage und in Kenntnis der Windrose am Standort des Portals zu erfolgen. Der Kamin soll möglichst höher als 15 m sein. Die Austrittsgeschwindigkeit des Rauchs am Kamin soll möglichst grösser als 15 m/s sein, auch unter Teilastbetrieb. Es wird eine dimensionslose Kennzahl vorgeschlagen, mit der die Güte einer bestehenden Kamin-Portal-Konfiguration aufgrund der vorliegenden Studie abgeschätzt werden kann. Diese kann auch als Hilfe bei der Auslegung verwendet werden.

Zielerreichung:

Die Projektziele der Forschungsarbeit wurden im Wesentlichen erfüllt. Erreicht wurden die folgenden Ziele:

- Beurteilung des Gefahrenpotentials durch Rezirkulation und Entwicklung einer einfachen Methode zur Bewertung von Strömungskurzschlüssen;
- Grundlagen zum besseren Verständnis der Problematik: Literaturrecherche und CFD-Parameterstudien der Fälle Portal-Portal und Kamin-Portal Rezirkulation;
- Entwicklung einer einfachen Methode zur Bewertung von Massnahmen für neue und bestehende Lüftungsanlagen (limitiert auf einfache Geometrien und atmosphärische Bedingungen);
- Formulierungen von Empfehlungen, Vorgaben und und Kompensationsmöglichkeiten;
- Publikation der Ergebnisse (WTC 2013), eine weitere Publikation ist für Graz 2014 geplant).

Nicht durchgeführt wurde die experimentelle Arbeit/Messung in einem bestehenden Tunnel.

Folgerungen und Empfehlungen:

Portal-Portal Rezirkulation: Die ermittelten Rezirkulationswerte liegen nach der Schätzung des Gefährdungspotentials im kritischen Bereich bei Bränden niedriger bis mittlerer Leistung. Daher ist eine Beurteilung der Situation an den jeweiligen realen Portalen mit experimentellen oder rechnerischen Mitteln notwendig, insofern das Gefährdungspotential der Rezirkulation nicht mit anderen Massnahmen oder Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen abgeschwächt werden kann. Die parametrische Studie bestätigt die Richtlinie ASTRA 13001 (2008), welche eine Trennwand von 30 m Länge mit der Höhe des Fahrraums empfiehlt.

Kamin-Portal Rezirkulation: Die Empfehlungen sind unter der Zusammenfassung der Projektergebnisse enthalten.

Mögliche Vertiefungen der Forschungsarbeit sind die Charakterisierung von kalten Rauchquellen, die Untersuchung der Effekte des Auftriebs und Messungen an realen Objekten.

Mögliche Umsetzung der Forschungsarbeit in Regelwerke (Richtlinien, Merkblätter, usw.) betreffen die Methode zur Abschätzung des Gefahrenpotentials der Rauchrezirkulation und die Erkenntnisse zur Kamin-Portal Rezirkulation.

Publikationen:

"How much flow recirculation is acceptable at tunnel portals?", Proceedings of the World Tunnel Congress, Geneva, Switzerland, May 31 - June 7, 2013

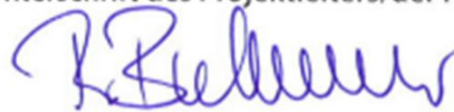
Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Buchmann

Vorname: Reto

Amt, Firma, Institut: Pöyry Infra AG, Hardturmstrasse 161, Postfach, CH-8037 Zürich, +41 76 356 22 90

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

- Die Projektziele wurden grossteils erreicht, indem Grundlagen zum besseren Verständnis der Problematik erarbeitet, Methoden zur Bewertung von Strömungskurzschlüssen und der diesbezüglichen Gegenmassnahmen entwickelt und Empfehlungen für einfache Modellfälle formuliert wurden.

- Die Variabilität der objektspezifischen Gegebenheiten erfordert jedoch in jedem Fall eine kritische Beurteilung der Gültigkeit der Annahmen, die den vorgeschlagenen Ansätzen zugrunde liegen. Im Besonderen sind die verwendeten Rechenmodelle nicht in der Lage, ungünstige Schwachwindlagen umfassend zu beschreiben. Die vorgeschlagenen Methoden beschränken sich im Weiteren auf einfache Geländeformen und neutral geschichtete Atmosphäre; der Fall mit kalter Abluft wird nicht betrachtet.

- Im Lauf der Arbeit musste festgestellt werden, dass die ursprünglich beabsichtigten Feldmessungen den Rahmen des Projektes sprengen würden. Der Verzicht auf diese Messungen erlaubte die weitergehende theoretische Untersuchung

Umsetzung:

Die Forschungsergebnisse wurden in einer Publikation am WTC 2013 veröffentlicht; eine weitere Publikation ist für 2014 geplant.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die Belastbarkeit der theoretischen Prognosen sollte durch Feldmessungen an bestehenden Anlagen überprüft werden. Ferner sollten komplexere geometrische und atmosphärische Situationen (Geländemorphologie, Kamin-/Portalgeometrie) in die theoretische Betrachtung aufgenommen werden. Von besonderem Interesse ist hierbei die Beurteilung von bestehenden Anlagen, die nicht nach den heutigen Erkenntnissen ausgelegt sind und nicht entsprechend betrieben werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Projektergebnisse haben keinen unmittelbaren Einfluss auf das bestehende Normenwerk. Hinsichtlich Kamin-Portal-Rezirkulation sollten Empfehlungen erarbeitet und in Richtlinien aufgenommen werden.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: *Anagnostou*

Vorname: *Georg*

Amt, Firma, Institut: *ETH Zürich, Institut für Geotechnik*

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

X 

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs <i>Activity oriented analysis of induced travel demand</i> <i>Analyse orientée aux activités du trafic induit</i>	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung <i>Approches innovantes de la gestion du stationnement</i> <i>Innovative approaches to parking management</i>	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? <i>Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars?</i> <i>L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?</i>	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel <i>Acoustical guidance in road tunnels</i> <i>Guidage acoustique dans les tunnels routiers</i>	2012
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining? <i>De nouvelles découvertes sur le comportement de mobilité par Data Mining?</i> <i>New findings on the mobility behavior through Data Mining?</i>	2011
1359	SVI 2004/003	Wissens- und technologientransfer im Verkehrsbereich <i>Know-how and technology transfer in the transport sector</i> <i>Transfert de savoir et de technologies dans le domaine des transports</i>	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten <i>Pronostics de trafic avec des données en temps réel</i> <i>Traffic forecast with real-time data</i>	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen <i>Principes de bases concernant la conception, la construction et la durabilité de voies de raccordement</i> <i>Basic Principles on the Design, Construction and Sustainability of Sidings</i>	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betongranulat aus Betongranulat	2011
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften <i>Potentiel du covoiturage</i> <i>Potential of Car Pooling</i>	2011
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schwiessnähte von KDB <i>Développement d'une méthode d'essais non-déstructif pour des soudures de membranes polymères d'étanchéité</i> <i>Development of a nondestructive test method for welded seams of polymeric sealing membranes</i>	2012

1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen <i>Signalisations dynamiques sur des routes principales</i> <i>Dynamic signalling at primary distributors</i>	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau <i>Expériences dans la construction de ponts en Suisse</i> <i>Experiences in Swiss Bridge Construction</i>	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen <i>Harmonisation of procedures and user interface in Tunnel-Process Control Systems</i> <i>Harmonisation des processus et des interfaces utilisateurs dans les systèmes de supervision de tunnels</i>	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität <i>Mode of action and potential of combined mobility</i> <i>Mode d'action et le potentiel de la mobilité combinée</i>	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr <i>Bénéfices liés à une réduction des temps de parcours du trafic voyageur</i> <i>Benefits of travel time savings in passenger traffic</i>	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel <i>Influence de l'écoulement souterrain sur le gonflement du Keuper gypseux dans le Tunnel du Chienberg</i> <i>Influence of groundwater flow on the swelling of the Gipskeuper formation in the Chienberg tunnel</i>	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich <i>Réflexions du trafic routier aux ouvrages d'art</i> <i>Noise reflections on structures in the street</i>	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen <i>Data storage in tunnel process control systems</i> <i>Enregistrement ds données de systèmes de supervision de tunnels</i>	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen <i>Exigences par rapport à la résistance à la carbonatation des bétons</i> <i>Requirements for the carbonation resistance of concrete mixes</i>	2012
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen <i>Résistance à la corrosion des aciers d'armature inoxydables</i>	2012