

B2 Entlastungstunnel Starnberg

Immissionen der Luftschadstoffe Tunnellüftung

Juni 2002



HAERTER AG • BERATENDE INGENIEURE

Stockerstrasse 12

CH - 8002 Zurich

Schweiz

Tel. +41 (0)1 289 39 00

Fax +41 (0)1 289 39 99

info.zh@hbi.ch, www.hbi.ch

Strassenbauamt München

89-201-08
Juni 2002

B2 Entlastungstunnel Starnberg
Immissionen der Luftschadstoffe
Tunnellüftung

Erstellt: Dr. Ingo Riess
Peter Martos
Ennio Pasqualotto
Geprüft: Rolf Mengelt

Inhaltsverzeichnis

Begriffe und Abkürzungen	1
1 Einleitung	2
2 Grundlagen	4
2.1 Geometrie	4
2.2 Bezugsjahr	7
2.3 Verkehr	7
2.4 Beurteilungskriterien Immissionen	8
2.5 Vorbelastungen	10
2.6 Schadstoffemissionen der Motorfahrzeuge	12
2.7 Ausbreitungsmeteorologie	18
2.8 Grenzwerte der Luftqualität im Tunnel	18
2.9 Strahlventilatoren	18
2.10 Lüftungskonzepte	19
2.11 Fluchtwege	21
3 Gauss-Ausbreitungsrechnung mit HIWAY-2	22
3.1 Methodik der Immissionsberechnung	22
3.2 Genauigkeit der Immissionsberechnung	23
3.3 Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung	24
4 Numerische Ausbreitungsrechnung mit MISKAM	27
4.1 Methodik der Immissionsberechnung	27
4.2 Genauigkeit der Immissionsberechnung	28
4.3 Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung	28
5 Vergleich der Ergebnisse MISKAM – HIWAY	31
6 Schadstoffimmissionen durch Kaminabluft	33
6.1 Einleitung	33
6.2 Methodik der Immissionsberechnung	33
6.3 Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung	34
7 Lüftung im Normalbetrieb	36
7.1 Verkehrsfälle	36
7.2 Frischluftbedarf	36
7.3 Empfehlung	39
8 Verminderung der Portalabluft	40
8.1 Verkehr	40
8.2 Randbedingungen der Auslegung	40
8.3 Abluftmenge	40

	Seite	
9	Lüftung im Brandfall	42
9.1	Dimensionierungsbrand	42
9.2	Abluftmenge	43
9.3	Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit	43
10	Bauliche Randbedingungen	45
10.1	Abluftkanal	45
10.2	Anordnung der Strahlventilatoren	48
10.3	Lüftungszentrale	49
10.4	Leistungsbedarf der Abluftventilatoren	51
10.5	Nachrüstung	52
11	Kostenschätzung	53
11.1	Investitionskosten	53
11.2	Betriebskosten	54
12	Zusammenfassung und Empfehlung	55
12.1	Durchgehende Längslüftung	55
12.2	Mittenabsaugung	55
12.3	Empfehlung	56
13	Literatur	57
Anhang		I
A:	Verkehrsdaten	II
B:	Winddaten	VI
C:	Modellierung	IX
C:	Modellierung	X
D:	Belastungskarten der Schadstoffimmissionen	XV
E:	Belastungskarten der Schadstoffimmissionen der Portalzonen	XXVI
F:	Zusatzbelastung aus Kaminabluf	XXIX
G:	Berechnung des Frischluftbedarfs	XXXIII
H:	Layout der Lüftungszentrale	XXXVI

Begriffe und Abkürzungen

Advektion	Längsverfrachtung
Ausbreitungsklasse	Mass für die Luftturbulenz aufgrund der Temperaturschichtung der Atmosphäre, Einflussgrösse für die Verdünnung der Schadstoffe
Ausbreitungsklassenstatistik	Statistik über Windgeschwindigkeit und Stabilität über ein Jahr
BayLfU	Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
BImSchG	Bundes-Immissionsschutz-Gesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutz-Verordnung
DTV	Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen
Emission	Freigesetzte Menge eines Schadstoffes pro Zeiteinheit, bei Fahrzeugen auch pro Wegstrecke
Emissionsperimeter	Fläche, in der die Schadstoffausbreitung berechnet wurde
Episodenwert	Schadstoffkonzentration aufgrund einer einzelnen Ausbreitungssituation (Windgeschwindigkeit, -richtung und Ausbreitungsklasse)
Gauss-Modell	Berechnungsverfahren, bei dem, von einer Anfangskonzentration und von Ausbreitungsbedingungen ausgehend, die Konzentration an einem Immissionspunkt berechnet wird. Das Modell beruht auf physikalischen Zusammenhängen und auf Faktoren, die durch Messungen bestimmt wurden (halbempirisch).
Immission	Konzentration eines Schadstoffes an einem Beobachtungspunkt
Immissionsperimeter inerte Schadstoff	Untersuchungsgebiet, in dem die Immissionen dargestellt sind reagiert bei der Ausbreitung chemisch nicht
JMW	Jahresmittelwert, arithmetisches Mittel der Stundenmittelwerte
karthesische Koord.	rechtwinkliges Koordinatensystem (ohne Anpassung der Koordinaten an die Geometrie)
k-Modell	Turbulenzmodell mit einer freien Variable
k- ϵ -Modell	Turbulenzmodell mit zwei freien Variablen
mikroskalig	Beschränkt auf ein kleines Gebiet
Navier-Stokes-Gl.	Gleichungssystem zur Beschreibung von Strömungsvorgängen
Orographie	Geländeform
PM10	Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser unter 10 μm , lungengängiger Feinstaub
Selbstlüftung	Luftförderung durch den Tunnel, die durch die Kolbenwirkung des Verkehrs angetrieben wird
Turbulenzmodell	Mathematisches Modell zur Beschreibung von kleinräumigen Strömungsvorgängen, die im Rechengitter nicht aufgelöst werden können
Vorbelastung	Immissionen aus Quellen, die in der Berechnung nicht explizit berücksichtigt werden (Heizungen, Industrie etc.)

1 Einleitung

Im Lüftungs- und Immissionsgutachten zum Entlastungstunnel Starnberg [1] wurde 1996 als Lüftungssystem für den Verkehrsraum eine Halbquer-/Querlüftung vorgeschlagen. Das Lüftungssystem sollte im Normalbetrieb als Halbquerlüftung mit freier Portalabluft betrieben werden, da die Schadstoffbelastung in der Umgebung der Tunnelportale unkritisch erschien. Seit der Erstellung des Lüftungsgutachtens haben sich in den Grundlagen der Tunnellüftung einige Änderungen ergeben, die wesentlichen Einfluss auf die Wahl des Lüftungskonzepts haben. Dies sind insbesondere:

- Verminderte Emissionen der Einzelfahrzeuge.
- Erhöhte Anforderungen an die Sicherheit im Brandfall.
Dies betrifft die Wahl des Lüftungskonzepts und die Grösse des Auslegungsbrandes.
- Neue europäische und nationale Richtlinien für die Luftqualität in der Umgebung des Tunnels.

In einer Voruntersuchung [2] wurde überprüft, ob das Konzept der Halbquer-/Querlüftung den neuen Anforderungen genügt. Die Studie führte zu den folgenden wesentlichen Empfehlungen:

- Der Tunnel Starnberg soll mit einer lokalen Rauchabsaugung über einzeln steuerbare Klappen ausgestattet werden.
- Der Frischluftbedarf ist neu zu berechnen. Aus verminderten Anforderungen an die Lüftung im Normalbetrieb ergibt sich eine grössere Flexibilität bei der Wahl des Lüftungssystems.

Die Frage, ob durch die Verminderung der Fahrzeugemissionen das freie Ausblasen der Abluft aus den Portalen zulässig ist, konnte in [2] nicht abschliessend beantwortet werden.

Ein erstes Ziel dieser Untersuchung ist daher das Abklären der Notwendigkeit von Massnahmen zur Verminderung der Portalemissionen für den Tunnel Starnberg. Mit Ausbreitungsrechnungen wird die Schadstoffbelastung prognostiziert. Für die Beurteilung des Planungsgebiets wird zunächst eine Ausbreitungsrechnung mit einem Gauss-Modell durchgeführt. Dieses Berechnungsverfahren entspricht weitgehend dem Verfahren, das in [1] angewandt wurde. Für die unmittelbare Umgebung der Tunnelportale wird zusätzlich eine detailliertere Analyse mit einer numerischen Strömungsberechnung und anschliessenden Ausbreitungsrechnung durchgeführt. Bei dieser Methode wird der Einfluss der umliegenden Bebauung berücksichtigt.

Anschliessend wird die Tunnellüftung unter den neuen Randbedingungen betrachtet. Hierbei werden die folgenden zwei Lüftungssysteme untersucht:

- Durchgehende Längslüftung mit lokaler Rauchabsaugung (Empfehlung Vorgutachten)
- Mittenabsaugung zur Minimierung von Portalabluft, eventuell als Variante mit Möglichkeit der Nachrüstung.

2 Grundlagen

2.1 Geometrie

2.1.1 Portalsituation

Am Nordportal unterfährt der Tunnel die Leutstettnerstrasse und mündet in einen 100 m langen Einschnitt aus, der sich von anfänglich 7 m Höhe stetig verjüngt. Am Ende der Rampe liegt die Bahnüberführung. In der näheren Umgebung zum Portal finden sich mehrgeschossige Wohnbauten und Schulhausgebäude.

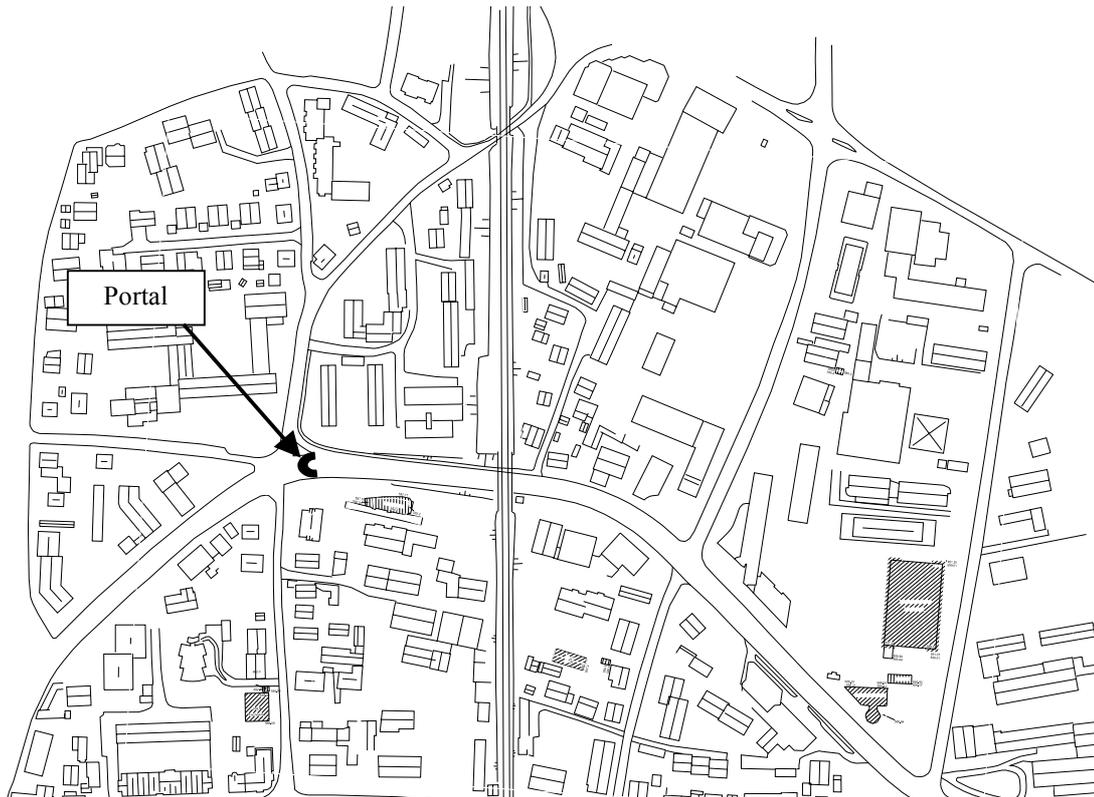


Abbildung 2.1: Situation Nordportal

Das Südportal mündet in das leicht abfallende Terrain des den Starnberger See begleitenden Hügelzuges. Die Portalausfahrt liegt in einem 100 m langen Einschnitt mit anfänglich 6 m Tiefe. Er ist südseitig flankiert von der Weilheimerstrasse. Südseitig zur Portalumgebung besteht eine lockere Wohnbebauung. Nördlich der Strasse ist das Terrain noch unbebaut. Um das Portal liegen Gebiete mit hohem Laubwaldbestand.

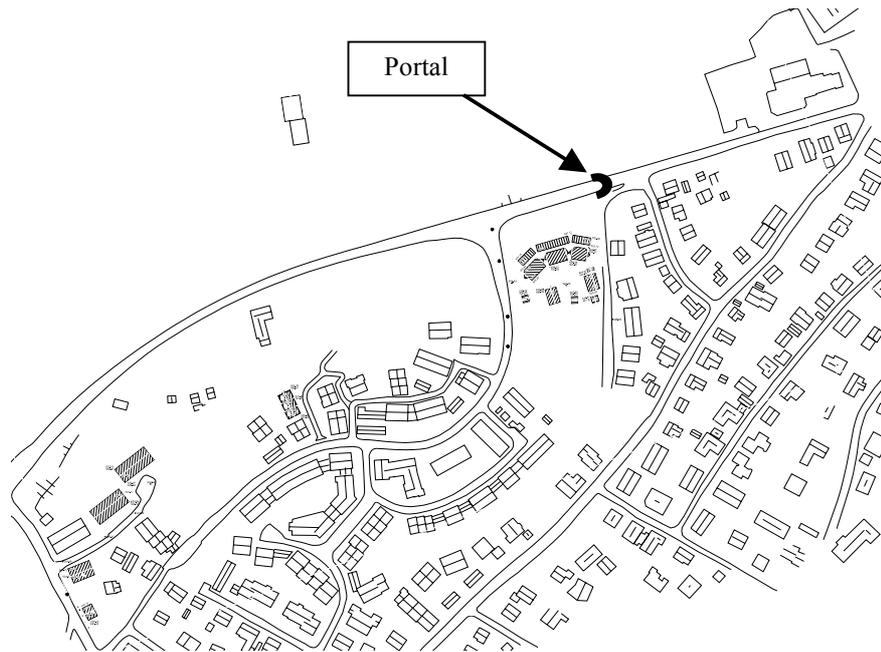


Abbildung 2.2: Situation Südportal

2.1.2 Tunnelgeometrie

Tunnel Starnberg		
Länge	1910 m	
Tunnelquerschnitt	46 m ²	
Hydraulischer Durchmesser	6.40 m	
Steigung von Süd nach Nord	-3.5 %	über 1460 m
	3.5 %	über 450 m
Anzahl Fahrstreifen	2	
Mittlere Höhe über Meer	590 m	
Querschnitt Abluftkanal	11 m ²	
hydraulischer Durchmesser Kanal	2.4 m	

Tabelle 2.1: Geometrische Daten

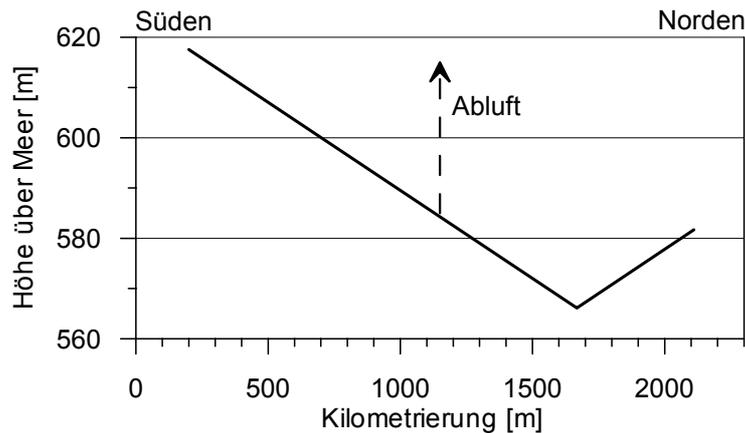


Abbildung 2.3: Längenprofil

Die Lage eines eventuellen Abluftschachtes ist im Längenprofil durch eine gestrichelte Linie angedeutet.

Die Tunnelstrecke verläuft unter einem Hügelrücken. Seine ostseitige Flanke fällt stetig ab zum Starnberger See, im mittleren Bereich liegen die Bauten des Ortskerns und süseitig dazu liegen hochwertige Wohnzonen. Die Westseite des Hügelzugs fällt zu einem Tal hinab, dessen Gegenhand wieder stark ansteigt. Die ansteigende Hanglage ist wiederum eine bevorzugte Wohnlage. Im mittleren Bereich des Tunnels steht auf der Hügelkuppe das Schloss Starnberg, südseitig gefolgt von einer Parkanlage.

Unter Berücksichtigung der Bebauungssituation wäre es denkbar, einen Kamin im Bereich Schlossgarten (Tunnelmitte) oder in der Nähe des Südportals zu plazieren.

Die Untersuchung der Tunnellüftung in [2] hat für die bevorzugten Lüftungssysteme ergeben, dass ein Kamin am Südportal für die Brandabluft genutzt werden sollte. Ein Betrieb des südlichen Kamins zur Verminderung von Portalabluft ist durch den hohen Energieverbrauch sehr ungünstig. Falls die Tunnellüftung eingesetzt werden sollte, um das Ausströmen von Portalabluft zu vermindern, empfehlen wir die Anordnung des Kamins im Bereich der Tunnelmitte.

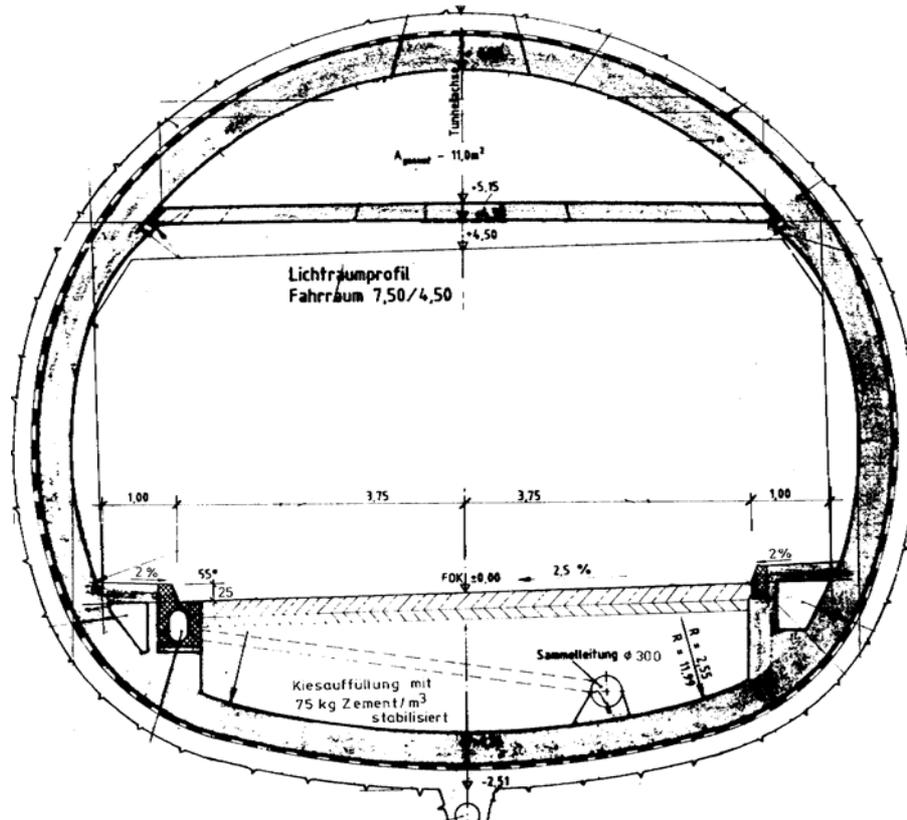


Abbildung 2.4: Normalprofil

2.2 Bezugsjahr

Die Berechnungen beziehen sich auf das Jahr 2010. In diesem Jahr ist die Freigabe des Tunnels für den Verkehr geplant.

2.3 Verkehr

Die Verkehrsprognose, die den Ausbreitungsrechnungen zugrunde gelegt wird, entspricht den Daten des bestehenden Immissionsgutachtens [1]. Zusätzlich zu der Verkehrsbelastung des Tunnels selbst wurden für die Berechnung der Schadstoffausbreitung der Oberflächenverkehr berücksichtigt. Die detaillierten Daten sind im Anhang A zu diesem Bericht dargestellt.

Das Verkehrsaufkommen im Tunnel Starnberg im Jahr 2010 wird wie folgt angenommen:

- Verkehr durch den Tunnel 17'600 Fahrzeuge/24h (DTV)
- Massgebliche Verkehrsdichte 1'400 Fahrzeuge/h über 4 Stunden täglich
(für Tunnellüftung) 1'000 Fahrzeuge/h über 10 Stunden täglich
- Gegenverkehr
- Schwerverkehrsanteil 5%
- Signalisierte Fahrgeschwindigkeit 60 km/h

Die Steigerung des Verkehrsaufkommens in den ersten fünf Jahren nach Tunneleröffnung wird als gering angenommen. Das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen steigt bis 2015 auf

- Verkehr durch den Tunnel 17'700 Fahrzeuge/24h (DTV) je Tunnelröhre

In Ferienzeiten kann die Verkehrsbelastung deutlich über den durchschnittlichen Werten liegen. Zeitweise kann die Verkehrsbelastung die Schluckfähigkeit des Tunnels erreichen. Allerdings ist in diesen Zeiten mit einem entsprechend geringeren Lastwagenanteil zu rechnen.

Ausgehend vom täglichen Verkehrsaufkommen wird ein Tagesgang angenommen. Zwischen 7 und 19 Uhr fahren etwa 77% des Verkehrs durch den Tunnel. Detaillierte Zählungen zum Tagesgang liegen uns nicht vor.

Im Tagesmittel gehen wir von einer symmetrischen Aufteilung des Verkehrs aus. Im Stundenmittel kann die Richtungaufteilung im Verhältnis von 1:1 bis 1:2 variieren. Daraus ergibt sich eine etwa symmetrische Aufteilung der Schadstoffe des Tunnels auf beide Portale.

2.4 Beurteilungskriterien Immissionen

2.4.1 Gesetzliche Grundlagen, Beurteilungswerte

Bei der Beurteilung von Strassenbauvorhaben werden die Verordnungen 22 und 23 zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (22. und 23. BImSchV) herangezogen. Die in bezug auf Motorfahrzeuge ausschlaggebenden Schadstoffkomponenten sind Stickstoffdioxid NO₂, sowie die als krebserregend eingestufteten Stoffe Russ und Benzol C₆H₆. Werte zur Beurteilung von Stickstoffdioxid-Immissionen sind zudem in der Richtlinie 1999/30/EG des Rates der Europäischen Gemeinschaft über Luftqualitätsnormen festgelegt.

Die 23. BImSchV definiert „Prüfwerte“, nach deren Überschreitung „Massnahmen nach Massgabe verkehrsrechtlicher Vorschriften zu prüfen sind. Dabei sind die Verkehrsbedürfnisse und die städtebaulichen Belange gebührend zu berücksichtigen“. Die Prüfwerte lauten:

160 µgNO ₂ /m ³	98%-Wert aller 1h-Werte von NO ₂ , (98-Perzentil)
8 µgRuss/m ³	als arithmetischer Jahresmittelwert
10 µgC ₆ H ₆ /m ³	als arithmetischer Jahresmittelwert

Bei einer Immissionsprognose besteht die Schwierigkeit, dass die Belastungswerte durch eine Berechnung mit prognostizierten Jahres- und Tagesgängen des Verkehrs, Fahrzeugemissionen und Wetterdaten ermittelt werden. Naturgemäss ist die Prognose eines 98-Perzentils mit einiger Unsicherheit behaftet. Geht man von Jahresmittelwerten aus, so gleichen sich die Unsicherheiten weitgehend aus. Dadurch wird die Prognose eines Jahresmittelwertes genauer als die Prognose der Spitzenbelastung.

Die EG-Rat-Richtlinie enthält Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Ziel der Richtlinie ist die Festlegung von Grenzwerten und Alarmschwellen im Hinblick auf die Vermeidung, Verhütung oder Verringerung schädlicher Auswirkungen auf die

menschliche Gesundheit und die Umwelt insgesamt. Für die Immissionsprognose relevant sind

40 $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$	als arithmetischer Jahresmittelwert Stickstoffdioxid (ab 2010)
40 $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	als arithmetischer Jahresmittelwert (ab 2005)
20 $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$	als arithmetischer Jahresmittelwert (ab 2010)
5 $\mu\text{gC}_6\text{H}_6/\text{m}^3$	als arithmetischer Jahresmittelwert
10 mgCO/m^3	als höchster Achtstundenmittelwert
0.5 $\mu\text{gPb}/\text{m}^3$	als arithmetischer Jahresmittelwert Blei (ab 2005)

Die europäischen Grenzwerte werden in einer Überarbeitung der 22. BImSchV in deutsches Recht übergeführt. Die Neufassung der 22. BImSchV ist derzeit noch nicht abgeschlossen. Uns liegt ein Entwurf der Verordnung vom 23. Juni 2001 vor. Die Überarbeitung entspricht weitgehend wörtlich der EU-Richtlinie. Der Grenzwert für den Jahresmittelwert von Feinstaub $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der ab 2010 eingehalten werden sollte, ist in diesem Entwurf jedoch nicht enthalten.

Im Merkblatt über Luftverunreinigungen an Strassen MLuS-92 [3] sind verkehrsspezifische Grenz- und Leitwerte aus EU-Richtlinien, der Norm VDI-2310 und der TA-Luft für eine Reihe von Schadstoffen zusammengestellt.

140 $\mu\text{gSO}_2/\text{m}^3$	Jahresmittelwert Schwefeldioxid nach TA-Luft
100 $\mu\text{gSO}_2/\text{m}^3$	Jahresmittelwert Schwefeldioxid nach VDI-2310
80 $\mu\text{gSO}_2/\text{m}^3$	Median der Tagesmittelwerte Schwefeldioxid bei einem zugeordneten Wert für Schwebstaub $>150 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2 $\mu\text{gPb}/\text{m}^3$	Jahresmittelwert Blei nach VDI-2310

Die SO_2 -Konzentrationen liegen in Deutschland 1996 erheblich unter denen von 1990. Nahezu flächendeckend werden Werte unter $25 \mu\text{gSO}_2/\text{m}^3$ gemessen. Höhere Werte wurden nur noch in den industriellen Regionen von Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen registriert [4]. Da zudem der Strassenverkehr nur einen Anteil von 7 bis 8% an den Schwefeldioxidemissionen in Deutschland hat, kann auf Prognosen für SO_2 verzichtet werden.

Die Beendigung des Absatzes von verbleitem Benzin hat zu einem starken Rückgang der Bleibelastung der Luft vor allem in den Innenstädten geführt. Der Jahresmittelwert der Bleibelastung an Autobahnen ist seither auf unter $0.5 \mu\text{gPb}/\text{m}^3$ zurückgegangen. Auf eine Ausbreitungsrechnung kann daher verzichtet werden.

Als lungengängiger Feinstaub PM_{10} gelten Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser unter $10 \mu\text{m}$. In der Schweiz ist im März 1998 ein Grenzwert für Feinstaub in Kraft getreten (JMW: $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Seit dieser Zeit werden kontinuierliche Messungen durchgeführt. Der Jahresmittelwert wurde 1997 nur an den Messstationen im Gebirge ($>1000 \text{müM}$) eingehalten. Unterschiede zwischen Stadt und Land sind bei der Belastung durch Feinstaub wenig ausgeprägt. Ein Drittel bis über die Hälfte der PM_{10} -Belastung entsteht aus sekundären Aerosolen, die erst abseits der Quellen aus Vorläuferschadstoffen gebildet werden, was zu einer homogenen räumlichen Verteilung führt. Zudem geschieht der Transport von PM_{10} über

sehr grosse Distanzen [5]. Eine chemische Analyse vom PM10-Immissionsmessungen ergab für verschiedene Messstandorte in der Schweiz einen Anteil des Strassenverkehrs von bis zu 50% an den Immissionen. 23 bis 37% liessen sich auf die Partikel im Abgas zurückführen. Der Rest bestand in aufgewirbelten und sekundären Partikeln [6]. Der Ferntransport des Schadstoffes PM10 sowie der Anteil an Abrieb und aufgewirbelten Partikeln erschwert die Prognose einer lokalen Belastung durch den Strassenverkehr.

2.4.2 Massgebliche Beurteilungswerte

Die Immissionswerte des Entwurfs der 22. BImSchV dienen dazu, die über ein Jahr tatsächlich an einer Stelle gemessenen Immissionen beurteilen zu können. Die Lage des Messortes wird in der 23. BImSchV wie folgt festgelegt: Daten sollen in Gebieten gewonnen werden, in denen die höchsten Konzentrationen auftreten, denen Personen über die Mittelungszeit des betreffenden Grenzwertes wahrscheinlich ausgesetzt sind. Die Messsonde muss in der Regel einige Meter von Gebäuden, Balkonen und anderen Hindernissen entfernt sein. Der Messeinlass darf nicht in nächster Nähe von Quellen plaziert werden. Messstationen für den Verkehr sollten mindestens 25 m vom Kreuzungen und 4 m von der Mitte der nächsten Fahrspur entfernt sein. NO₂-Messungen sollten höchstens 5 m vom Fahrbahnrand entfernt sein. Zur Messung von Partikeln sollten die Messpunkte so gelegen sein, dass die Messungen für die Luftqualität nahe der Baufluchtlinie repräsentativ sind.

Die angegebenen Grenzwerte gelten somit nicht für den Strassenbereich und nur bedingt für den Fussgängerbereich.

Stoff	Wert µg/m ³	Statistische Bedeutung	Rechtsgrundlage
Stickstoffdioxid	40	Jahresmittelwert	Entwurf der 22. BImSchV
Feinstaub PM10	40	Jahresmittelwert	Entwurf der 22. BImSchV

Tabelle 2.2: Prüfsubstanzen und deren Beurteilungswerte

2.4.3 Beurteilungszustände des Vorhabens

Die Berechnungen beziehen sich auf die Situation im Jahr 2010 mit fertiggestelltem Entlastungstunnel Starnberg.

2.5 Vorbelastungen

Die Beurteilungswerte beziehen sich auf Gesamtbelastungen, wie sie mit Messungen direkt erfasst werden. Die berechneten Immissionen gehen von einer bestimmten Emittentengruppe aus, im vorliegenden Fall von einem Teil des motorisierten Strassenverkehrs, und bestimmen dessen Zusatzbelastung. Die Gesamtbelastung jedes Schadstoffes ergibt sich anschliessend aus der Überlagerung der modellierten Zusatzbelastung mit der entsprechenden Vorbelastung, welche die Belastung aller anderen Quellen enthält. Die Bestimmung der Vorbelastung hat somit immer unter Berücksichtigung des modellierten Strassennetzes zu erfolgen. In der Prognose 1996 [1] wurde der Verkehr auf den untergeordneten Strassenzü-

gen nicht explizit berücksichtigt. Da die Emissionen dieser Strassen in der neuen Berechnung enthalten sind, wird die Hintergrundbelastung etwas nach unten korrigiert.

Für die den Schadstoff PM10 kann die Hintergrundbelastung nicht auf lokalen Messungen abgestützt werden. Im lufthygienischen Jahresbericht des LfU 2000 [9] sind Messungen für eine Reihe von Standorten angegeben. Die Messpunkte befinden sich jedoch überwiegend in der Nähe von stark befahrenen Strassen. Um von den Messungen, die eine Gesamtbelastung erfassen, auf eine Hintergrundbelastung zu schliessen, stehen nicht genügend Daten zu den einzelnen Messpunkten zur Verfügung.

Messstation	Jahresmittelwert 2000 für PM10
Burghausen, Marktler Strasse	24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ingolstadt, Oberhaunstadt	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Trostberg, Schwimmbadstrasse	22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Augsburg, Bourges-Platz	29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Kempten, Westendstrasse	21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Lindau, Holdereggenstrasse	26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Neu-Ulm, Gabelsbergerstrasse	33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabelle 2.3: PM10-Gesamtbelastung an einigen bayerischen Messstationen [9]

Im Kurzbericht Umweltdaten Deutschland ist die zeitliche Entwicklung der Schwebstaubkonzentrationen in Deutschland angegeben. Die Messdaten umfassen zwar ebenfalls Gesamtbelastungen, da das Ziel dieser Untersuchung eine flächige Beurteilung des Bundesgebiets darstellt, sind diese Daten eher mit einer Hintergrundbelastung zu vergleichen als die Konzentrationen an einem einzelnen Messpunkt, der vielleicht im Einflussbereich einer einzelnen Quelle liegt. Die Kurve in Abbildung 2.8 deutet an, dass „typische“ Staubbelastungen im Jahr 1998 in einem Bereich zwischen 12 und 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen. In den folgenden Jahren wird nicht mit einer deutlichen Abnahme der Staubbelastung gerechnet, da mögliche Massnahmen zur Verminderung der Emissionen in den 90er Jahren v.a. bei den Industriefeuerungen und bei Kraftwerken weitgehend ausgeschöpft wurden. Auch beim Verkehr sind die Möglichkeiten der Verminderung von PM10-Emissionen bis zum Jahr 2010 weitgehend ausgeschöpft, da die motorischen Emissionen gegenüber dem Reifen- und Strassenabrieb an Bedeutung verlieren.

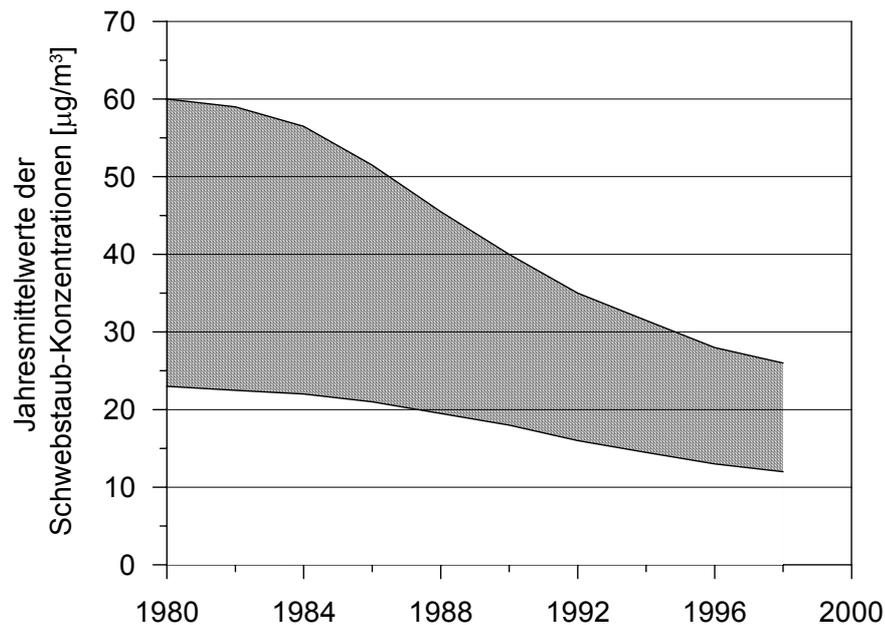


Abbildung 2.5: Jahresmittelwerte der Schwebstaub-Konzentration in Deutschland [8]

Als Vorbelastung für das Untersuchungsgebiet Starnberg wurden die folgenden Werte bestimmt:

		Prognose [1]	Prognose neu
NO ₂	Jahresmittelwert	28 µg/m ³	24 µg/m ³
PM10	Jahresmittelwert	-	22 µg/m ³

Tabelle 2.4: Vorbelastungen für 2010 Im Untersuchungsgebiet Starnberg

2.6 Schadstoffemissionen der Motorfahrzeuge

2.6.1 Verkehrssituation

Ein Fahrmuster steht für ein typisches Fahrverhalten und kann mit Hilfe kinematischer Kenngrößen (Geschwindigkeit, Dynamik) beschrieben werden. Die Emissionsfaktoren wurden ursprünglich für diese Fahrmuster ermittelt. Für die praktische Anwendung interessiert aber, auf welchen Strassenabschnitten welche Fahrmuster vorkommen. Es gilt also, die Fahrmuster den Streckentypen zuzuordnen. Aus Untersuchungen des Fahrverhaltens wurde ermittelt, welche Fahrmuster in welcher Verkehrssituation mit welchem Anteil vorkommt. Das elektronische Handbuch [7] gibt den Benutzern deshalb die Emissionsfaktoren pro Verkehrssituation an.

Die Verkehrssituation und die zugeordneten mittleren Geschwindigkeiten, die der Immissionsberechnung zugrunde liegen, sind:

Verkehrssituation und Anwendung			Pkw	SNF
IO_HVS2	Innerorts, vorfahrtberechtigte Hauptverkehrsstrasse	0%	46	40
	mit leichten Störungen - Tunnel und Oberflächenverkehr	±4%	46	38

Tabelle 2.5: Verkehrssituationen und mittlere Fahrgeschwindigkeiten in [km/h]

Im Tunnel wird gleichmässiger gefahren als auf dem übrigen Strassennetz. Damit ergeben sich bei den Stickoxiden und bei den motorisch emittierten Partikeln geringere Emissionen als auf der offenen Strasse mit einem häufiger gestörten Verkehrsfluss (Kreuzungen, Lichtsignalanlagen, Stockung). Im Fall des Entlastungstunnels Starnberg gehen wir auch im Tunnel von den höheren Emissionen des gestörten Verkehrsflusses aus, da der Tunnel während der Stosszeiten relativ stark belastet ist. An das Nordportal anschliessend folgt in einem kurzen Abstand eine Lichtsignalanlage. Eventuell ist mit Rückstau bis in den Tunnel zu rechnen. Diese Möglichkeit soll in der Annahme der Verkehrssituation berücksichtigt werden.

2.6.2 Zusammensetzung des Fahrzeugparks

Die Zusammensetzung des Fahrzeugparks für die Prognosejahre entnehmen wir dem elektronischen Handbuch Emissionsfaktoren V1.2 des Umweltbundesamtes [7]. Gegenüber den in [1] verwendeten Emissionsfaktoren ergeben sich aus der neuen Version des HBEFA Änderungen in der Zusammensetzung des Fahrzeuggemisches und durch die Berücksichtigung neuer Fahrzeugkonzepte.

Neue Fahrzeugkonzepte

Ausgehend von den gemessenen Emissionsfaktoren der gegenwärtig verkehrenden Fahrzeugtypen werden im Handbuch auch Emissionsfaktoren künftiger Konzepte angegeben. Deren Emissionsniveau wurde in Anlehnung an die absehbare Entwicklung der Abgasvorschriften abgeschätzt.

Als neue Fahrzeugkonzepte sind insbesondere die Emissionsnormen EURO3 (ab 2000) und EURO4 (ab 2005) zu nennen, die in der EU-Richtlinie 98/69/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober Massnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen angegeben sind. Die EURO4-Werte beruhen auf der Verfügbarkeit verbesserter Kraftstoffe.

Bei den schweren Nutzfahrzeugen SNF, die eine Zusammensetzung von Lkw, Lastzügen und Sattelschleppern darstellen, ist eine zusätzliche Norm „EURO5“ aufgenommen, die gemäss einem gemeinsamen Standpunkt des Umweltministerrats vom 21.12.1998 ab 2008 die NO_x-Emissionen der SNF zusätzlich beschränken soll.

Fahrzeugpark

Der Anteil der Dieselfahrzeuge an den Personenwagen wird im HBEFA V1.2 für das Jahr 2010 mit etwa 15.1% prognostiziert. Dies entspricht der Annahme aus dem bestehenden Immissionsgutachten von 15%.

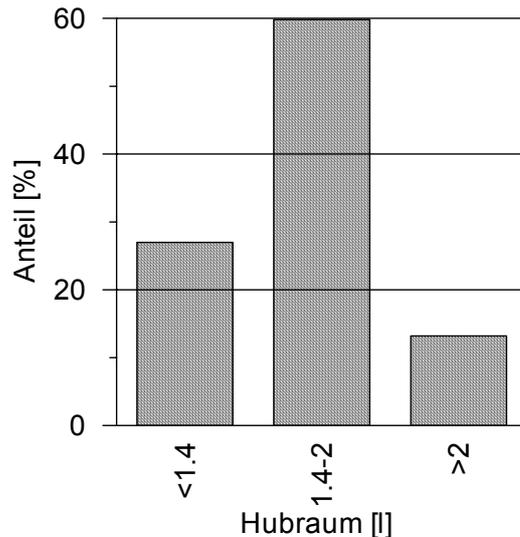


Abbildung 2.6: Anteile der Motorgrößen bei den Personenwagen.

Bei der Zusammensetzung der Pkw wird zwischen drei Motorgrößen unterschieden. Die Verteilung der Pkw ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Gegenüber dem Verkehrsmix des Jahres 2001 wird der Trend zu größeren Fahrzeugen mit höherer Motorleistung weitergeführt. Die Zusammensetzung verändert sich jedoch insgesamt nur unwesentlich.

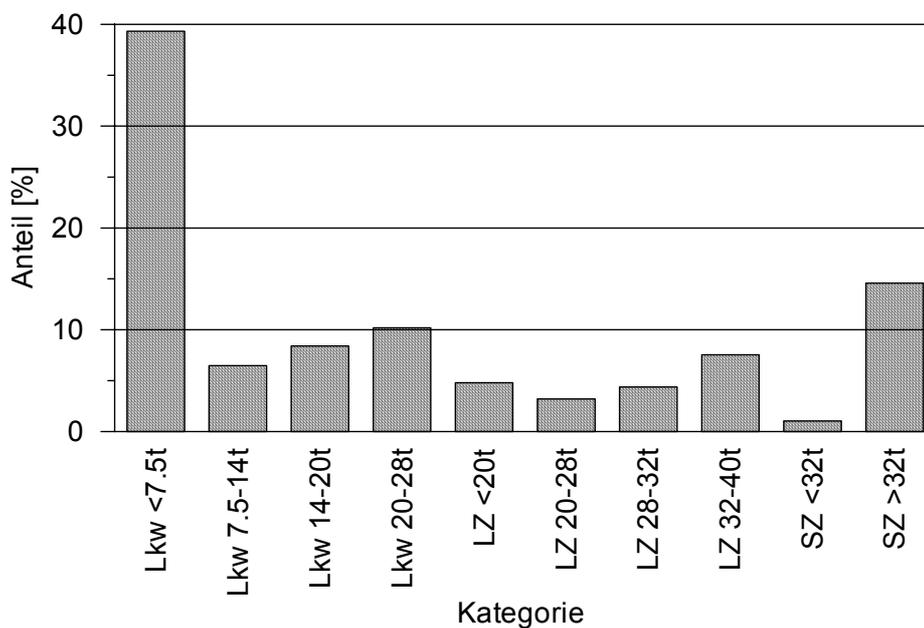


Abbildung 2.7: Zusammensetzung der schweren Nutzfahrzeuge SNF aus Lastwagen, Lastzügen und Sattelzügen.

Bei den schweren Nutzfahrzeugen stellen die Lastwagen unter 7.5 t zulässigem Gesamtgewicht mit annähernd 40% den grössten Anteil. Den zweitgrössten Anteil haben mit etwas weniger als 15% Sattelzüge mit einem zulässigen Gesamtgewicht über 32 t (Abbildung 2.7). Die Verkehrszusammensetzung variiert je nach der Verkehrssituation, die im Handbuch gewählt wird. Die Diagramme sind für die Situation IO_HVS2, d.h. eine Verkehrssituation innerhalb einer Ortschaft angegeben, einer vorfahrtberechtigten Ortsdurchfahrt mit leichten Störungen (Ampelanlage mit grüner Welle bei über 50 km/h).

Aufgrund der neuen Emissionsdaten sind die Ergebnisse neuerer Immissionsgutachten kaum mit den Gutachten vergleichbar, die auf der alten Datengrundlage basieren.

2.6.3 Entwicklung der Emissionsfaktoren

Die aus lufthygienischer Sicht wichtigsten Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre sind die beiden Verbindungen Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂). Die Summe oder das Gemisch der beiden Substanzen wird als NO_x bezeichnet. Stickoxidemissionen entstehen beim Verbrennen fossiler Brenn- und Treibstoffe, insbesondere bei hohen Verbrennungstemperaturen, aus dem atmosphärischen Stickstoff und Sauerstoff. Die Stickoxide werden zu 90 bis 99% als Stickstoffmonoxid emittiert, welches in der Folge in der Atmosphäre relativ rasch in das giftigere Stickstoffdioxid umgewandelt wird [5].

Das Maximum der Stickoxidemissionen wurde Mitte der 80er Jahre erreicht (Deutschland einschliesslich DDR 1986: 3'511'000 t). Seither sind die jährlichen Stickoxidemissionen rückläufig, sie betragen 1996 noch 1'859'000 t [8].

Für die negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ist insbesondere das Stickstoffdioxid verantwortlich. Es begünstigt zusammen mit anderen Reizgasen Atemwegserkrankungen. Darüber hinaus sind Stickoxide wichtige Vorläufersubstanzen für die Bildung von bodennahem Ozon und von sauren Niederschlägen.

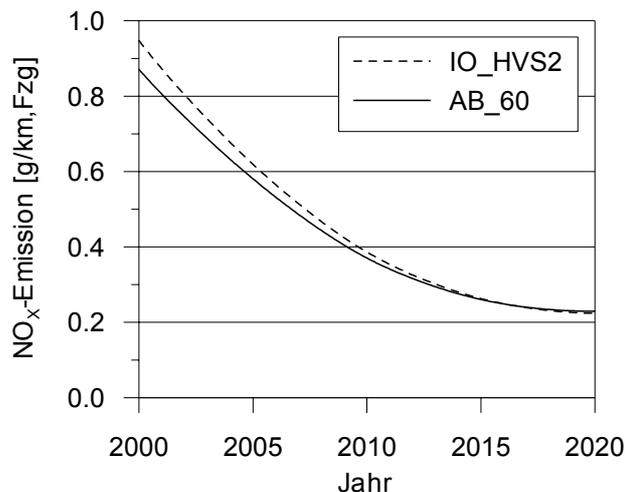


Abbildung 2.8: Entwicklung der NO_x-Emission [7] für ein Kfz, Lastwagenanteil 10%.

Der Prognosewert für NO_x-Fahrzeugemissionen enthält Annahmen über die Zusammensetzung des Fahrzeugkollektivs bezüglich Altersstruktur, tatsächlicher Emission der neuen Fahrzeuge und Alterungseinflüssen, insbesondere der Katalysatoren der Pkw. Die Emissionen steigen mit wachsender Motordrehzahl. Die Entwicklung der NO_x-Emissionen bei einem Anteil der schweren Nutzfahrzeuge von 10% ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Der starke Rückgang der Emission zwischen 2000 und 2015 um etwa 70% entsteht vor allem durch neue Emissionsstandards.

Ausgehend von der Fahrsituation IO_HVS2 (siehe Abschnitt 2.6.1) ergeben sich die Emissionsfaktoren für Stickoxide wie folgt:

	Steigung	Pkw	SNF
Tunnel	±4%	0.153 g/km	3.836 g/km
Oberfläche	0%	0.126 g/km	2.728 g/km
Gutachten 1996 [1]		0.32 g/km	7.5 g/km

Tabelle 2.6: NO_x-Emissionen für 2010 je Fahrzeug

Die Verminderung gegenüber den Emissionsfaktoren im bestehenden Gutachten ist auf die Verschärfung strengerer europäischer Emissionsnormen und die daraus folgende Verbesserung der Motortechnik zurückzuführen.

Partikelförmige Schadstoffe in der Atmosphäre kommen in sehr unterschiedlicher Grösse vor. Aus lufthygienischer Sicht interessiert insbesondere der lungengängige Feinstaub. Die Zusammensetzung der Stäube ist sehr variabel. Sie können zahlreiche anorganische (z.B. Schwermetalle, Sulfat) und organische Verbindungen (z.B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) enthalten. Zu den Stäuben zählen auch Russpartikel, die vorwiegend aus Kohlenstoff bestehen.

Als Ursache für die Staubbelastung in der Atmosphäre kommen sowohl motorisierter Verkehr, Feuerungen und Industrie, als auch natürliche Quellen (z.B. Blütenstaub, vom Boden aufgewirbelter Staub) in Frage. Grosse Staubpartikel sinken zu Boden und werden als Staubbiederschlag wahrgenommen. Feinste Staubpartikel mit geringer Sinkgeschwindigkeit in Luft werden als Schwebstaub wahrgenommen. Werden nur lungengängige Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 µm betrachtet, so spricht man vom Schadstoff PM₁₀ (particulate matter < 10 µm, thorakale Fraktion des Schwebstaubs).

Die Staubemissionen insgesamt sind in Deutschland in den 90er Jahren um nahezu 1.6 Mio. t zurückgegangen. Dieser Trend ist vorwiegend das Ergebnis der Stilllegung der veralteten Feuerungs- und Industrieanlagen, der modernen Entstaubungsanlagen in den Kraft- und Fernheizkraftwerken in den neuen Bundesländern sowie der Umstellung von festen auf emissionsärmere flüssige und gasförmige Brennstoffe bei den Kleinfeuerungsanlagen.

Der Grenzwert für den Jahresmittelwert von PM₁₀ von 40 µg/m³ wird heute dennoch noch nicht bundesweit eingehalten. Im Jahresbericht des BayLfU für das Jahr 2000 sind für die Messstation München, Stachus mit 42 µg/m³ und für die Station Augsburg, Königsplatz mit 47 µg/m³ die höchsten PM₁₀-Konzentrationen angegeben [9].

Da die Reduktionspotentiale für Staubemission in Deutschland im letzten Jahrzehnt bereits weitgehend ausgeschöpft sind, ist auch zu erwarten, dass die Staubkonzentrationen in der Luft nur noch sehr langsam abnehmen werden. Die Belastung durch Feinstaub wird heute im zunehmenden Masse durch die Beiträge des Ferntransports und der natürlichen Emissionen bestimmt [8].

In [10] wird bei den PM₁₀-Emissionen durch Reifenabrieb und Aufwirbelung unterschieden zwischen Innerorts-, Ausserorts- und Tunnelstrecken. Für die Anwendung innerorts wurde die Anpassung der empirisch ermittelten Konstanten anhand von Messungen vorgenommen, wobei noch zwischen Strassen in gutem und schlechtem Zustand unterschieden wird. Insbesondere führen grosse Fahrzeugdichten und Fahrzeuggeschwindigkeiten, gleichmässige Fahrweise und grosse Abstände zwischen einmündenden Nebenstrassen zu geringerem

Reifenabrieb und zu einer geringeren Staubbeladung. Nach [10] sind die PM10-Emissionen im Tunnel niedriger als auf offenen Strassen. Die verwendeten PM10-Emissionsfaktoren aus Reifen- und Strassenabrieb für den Tunnelabschnitt und für den Oberflächenverkehr sind in Tabelle 2.7 angegeben.

	Pkw	SNF
Tunnel	0.0577 g/km	0.1522 g/km
Oberfläche	0.1116 g/km	0.1799 g/km

Tabelle 2.7: PM10-Emissionen für 2010 je Fahrzeug mit Abrieb und Aufwirbelung

Die Randbedingungen, die in die Berechnung der Partikelemissionen eingehen sind:

- Verkehr innerorts, guter Strassenzustand
- mittleres Gewicht von Pkw 1.1 t und Lkw 9 t
- ca. 120 Regentage pro Jahr
- motorische Partikelemissionen entsprechend der Verkehrssituation IO_HVS2 aus [7]

2.6.4 Fahrzeugemissionen Tunnellüftung

Für die Berechnung der notwendigen Frischluftmengen sind die Konzentration von Kohlenmonoxid und die Sichttrübung ausschlaggebend. Die Emissionsberechnung erfolgt nach der Methodik, die in der Ergänzung zur RABT-94 gemäss allgemeinem Rundschreiben vom Januar 2001 [24] dokumentiert ist.

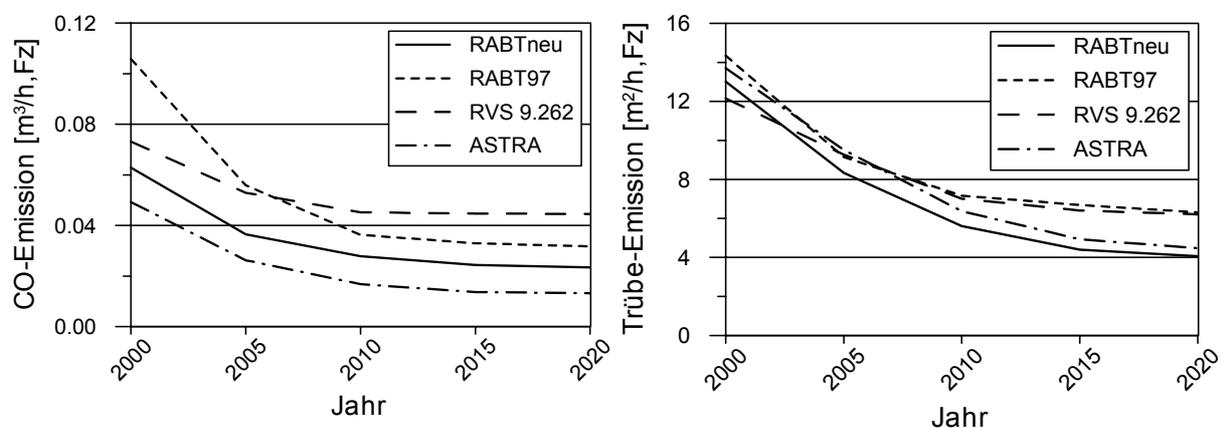


Abbildung 2.9: Emissionen eines mittleren Fahrzeugs (10% Lkw) bei Fahrt mit 60 km/h in der Ebene. Vergleich D_{neu} , D_{alt} , Schweiz (ASTRA), Österreich (RVS) [26]

In Abbildung 2.9 sind die Kohlenmonoxid- und Sichttrübe-Emissionen eines mittleren Fahrzeuges bei Fahrt mit 60 km/h in der Ebene dargestellt. Die Grafik vergleicht die RABT (Stand 1997), die Neufassung der Emissionen (Stand 2001), die aktualisierten Emissionen in der neuen Schweizerischen Richtlinie und die Österreichische Emissionsbasis. Bei dem mittleren Fahrzeug ist ein Anteil von 10% Lastwagen eingerechnet.

2.7 Ausbreitungsmeteorologie

Für die Ausbreitungsrechnungen verwenden wir die gleichen Winddaten wie sie bereits im bestehenden Immissionsgutachten von 1996 [1] dokumentiert sind. Die Winddaten wurden aus lokalen Messungen generiert. Für die Immissionsberechnung muss ein Winddatensatz auf Stundenbasis über ein ganzes Jahr vorliegen. Da die Messungen nur während etwas mehr als zwei Monaten durchgeführt wurden, wurden die Winddaten unter Verwendung der vollständigen Messreihe der Station München Riem auf ein ganzes Jahr erweitert. Es wurden pro Standort und Monate die Verhältniszahlen zwischen Starnberger Messungen und Riem-Messungen gebildet und die restlichen Starnberger Messungen aus den monatlichen Verhältniszahlen der Riem-Messungen extrapoliert.

Das Gelände bei den Portalen des Tunnels Starnberg ist geprägt durch die hügelige Umgebung, vor allem westlich des Tunnels. Die Höhenunterschiede zwischen Kamm- und Tallage gehen aber nicht über 40 bis 50 m hinaus. Bei den eher flachen Hangneigungen im Westen ist mit keinen wesentlichen Veränderungen in der Windgeschwindigkeit gegenüber den Messungen am Flughafen Riem zu rechnen. Die ausgeprägte Flanke auf der Ostseite des Hügels führt Winde aus dem Nord-Südsektor stärker.

Die Messungen in Starnberg erfolgten zwischen dem 21.3. und 31.5.1989 an der Münchnerstrasse (Nordportal) und an der Weilheimerstrasse (Südportal). Die Messungen Schlossberg, die ebenfalls in [1] dokumentiert sind, wurden für die Ausbreitungsberechnung der Kaminabluft verwendet. Da für die Berechnung ein Kaminbetrieb zwischen 7 und 19 Uhr angenommen wurde, ist nur die Tagwindrose massgebend.

Die Winddaten, die der Ausbreitungsrechnung zugrunde liegen, sind in Anhang B dieses Gutachtens dokumentiert.

2.8 Grenzwerte der Luftqualität im Tunnel

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Neufassung der Fahrzeugemissionen für die Bemessung von Tunnellüftungen“ [24], das im Januar 2001 als Rundschreiben des BMVBW veröffentlicht wurde, wurden Emissionsfaktoren und Bemessungswerte neu festgelegt. Die Beurteilung der Luftqualität erfolgt nach dieser Neufassung.

Der Grenzwert für lang andauernde Wartungsarbeiten im Tunnel unter Verkehr wird im Entwurf der RABT Ausgabe 2002 [25] definiert.

Geschwindigkeitsbereich	CO-Konzentration	Sichttrübung
Flüssiger Verkehr 50 bis 100 km/h	70 ppm	0.005 /m
Stau, Stockung 0 bis 10 km/h	100 ppm	0.007 /m
Tunnelsperrung	200 ppm	0.012 /m
Wartung unter Verkehr	30 ppm	0.003 /m

Tabelle 2.8: Bemessungswerte der Luftqualität im Tunnel [24], [25]

2.9 Strahlventilatoren

Es wird im folgenden geprüft, ob im Tunnel Starnberg eine durchgehende Längslüftung im Normalbetrieb möglich ist. Bei einer Längslüftung mit Strahlventilatoren wird für einen be-

stimmten Anwendungsfall die notwendige Schubkraft bestimmt. Diese Schubkraft ist jedoch nicht mit dem Standschub des Ventilators zu vergleichen. Beim Vergleich von verschiedenen Strahlventilatoren ist die Hintergrundströmung am Ventilator einzubeziehen.

Kriterien für die Wahl eines Ventilator Typs sind die geometrische Grösse und der vorhandene Raum im Tunnel, Preis und Energieverbrauch der Ventilatoren und die Redundanz im Falle der Versagens eines Ventilators oder einer Gruppe.

In der Lüftungsberechnung verwenden wir die folgenden technischen Daten der Strahlventilatoren 90R (reversibel).

Durchmesser des Laufrades	900 mm
Aussendurchmesser	~1'100 mm
Länge mit Schalldämpfer 1*D	~3'100 mm
Förderleistung	20.0 m ³ /s
Ausblasgeschwindigkeit	31.4 m/s
Motornennleistung	22 kW

Tabelle 2.9: Technische Daten der Strahlventilatoren

2.10 Lüftungskonzepte

Da der Tunnel Starnberg nach dem Entwurf der RABT [25] mit einer Rauchabsaugung über eine Zwischendecke mit einzeln steuerbaren Klappen auszustatten ist, kommen als Lüftungssystem eine durchgehende Längslüftung mit Strahlventilatoren oder eine Längslüftung mit Absaugung in Tunnelmitte in Betracht. Eine Halbquerlüftung ist aufgrund des geringen Frischluftbedarfs nicht wirtschaftlich.

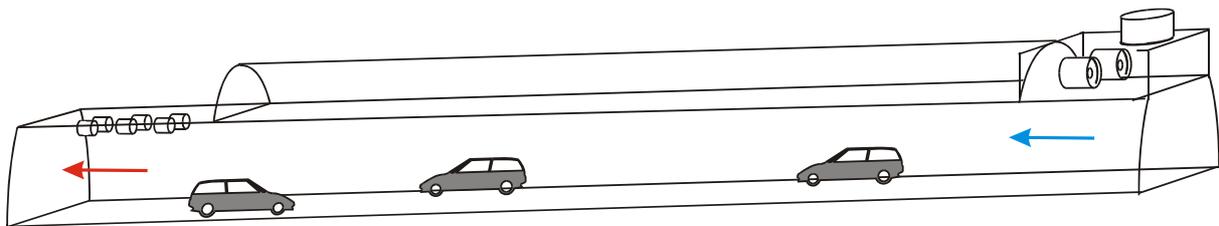


Abbildung 2.10: Normalbetrieb I: Durchgehende Längslüftung mit Strahlventilatoren

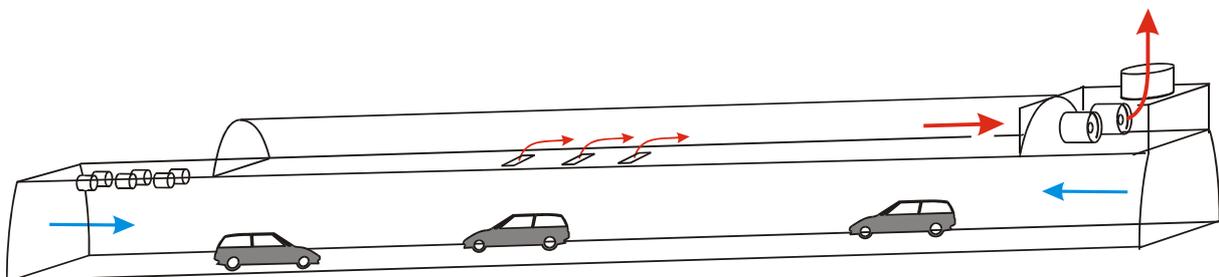


Abbildung 2.11: Normalbetrieb II: Längslüftung mit Absaugung in Tunnelmitte

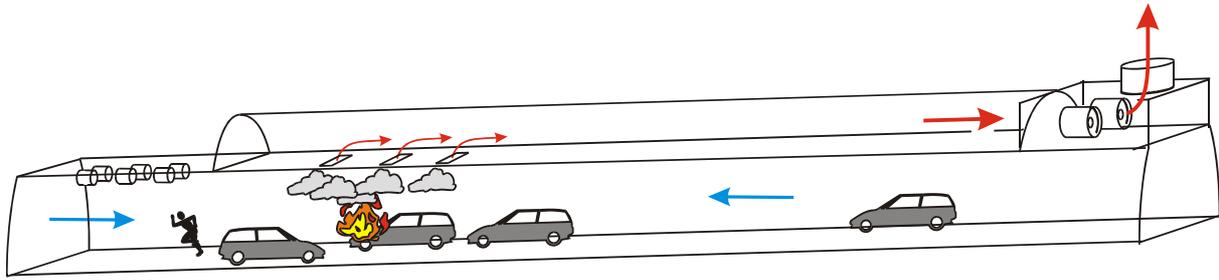
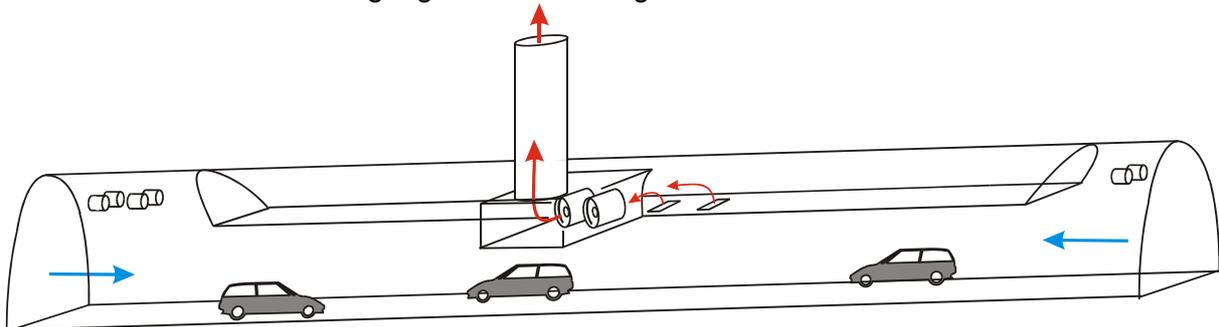


Abbildung 2.12: Brandlüftung: Lokale Rauchabsaugung mit steuerbaren Abluftklappen

Die Anordnung der Lüftungszentrale kann grundsätzlich am Tunnelportal oder in Tunnelmitte erfolgen. Bei Anordnung im Bereich der Tunnelmitte wird die Lüftungszentrale meist unterirdisch errichtet. Eine Anordnung oberirdisch am Kaminfuß ist grundsätzlich möglich. Die Kanallängen sind bei der Mittelzentrale verkürzt, wodurch sich die installierte elektrische Leistung für den Brandfall vermindert.

Wenn die Lüftung für den Immissionsschutz in der Umgebung der Tunnelportale betrieben werden muss, bringt die Anordnung der Zentrale in der Tunnelmitte einen geringeren Energieverbrauch, da die Abluft nicht durch den langen Abluftkanal über der Zwischendecke bis zum Portal gefördert werden muss. Andererseits ist mit höheren Baukosten zu rechnen.

Normalbetrieb: Mittenabsaugung zur Vermeidung von Portalabluft



Brandbetrieb: Lokale Rauchabsaugung über einzeln steuerbare Klappen

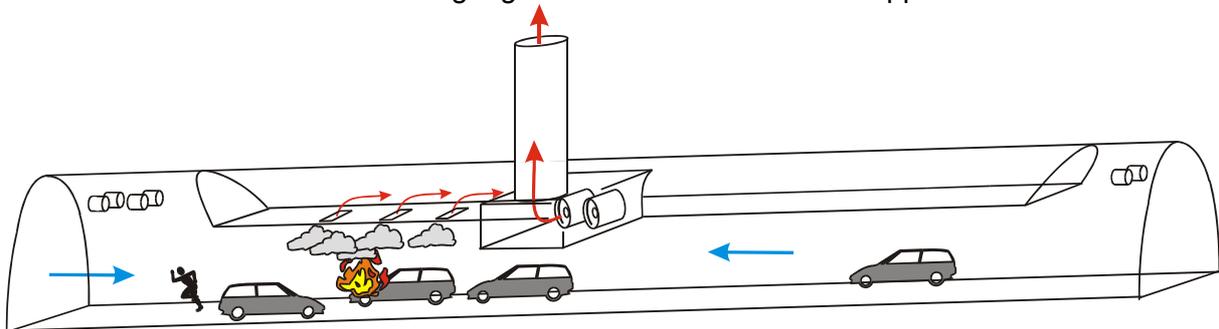


Abbildung 2.13: Lüftungskonzept Tunnel Starnberg mit Mittenzentrale

Die Lüftungssysteme

Mittenabsaugung mit Mittelzentrale

und

Durchgehende Längslüftung mit Portalzentrale

sind Gegenstand der weiteren Untersuchungen.

2.11 Fluchtwege

Der Entlastungstunnel Starnberg muss aufgrund seiner Länge von annähernd 2 km mit mehreren Fluchtwegen ausgestattet werden. Im Entwurf der Richtlinie RABT Ausgabe 2002 [25] werden Fluchtwege in regelmässigen Abständen von höchstens 300 m gefordert. Die Notausgänge führen in einen Rettungsstollen oder direkt ins Freie.

3 Gauss-Ausbreitungsrechnung mit HIWAY-2

3.1 Methodik der Immissionsberechnung

Für die mittleren Zusatzkonzentrationen in einem grösseren Ausbreitungsgebiet, wie sie in diesem Abschnitt dargestellt sind, hat sich die Berechnung mit Gauss'schen Verteilungsfunktionen als gute Methode erwiesen. Ein ausgetestetes und international anerkanntes Rechenprogramm ist HIWAY-2 der amerikanischen Umweltbehörde EPA [11]. Mit diesem Programm wird die Ausbreitung der Emissionen aller modellierten Linienquellen gleichzeitig für alle möglichen Wettersituationen berechnet.

Eingehende Messungen direkt neben Strassen im Freien zeigen, dass die Fahrzeugabgase durch die Turbulenz, die von den Fahrzeugen verursacht wird, auf eine Höhe von 2 bis 8 m über der Fahrbahn verteilt werden. HIWAY-2 berücksichtigt diese Turbulenz in Abhängigkeit des Windvektors (Richtung und Stärke). Das Modell HIWAY-2 wurde für ebenes Gelände entwickelt. Die Orographie wird indirekt über die Definition der örtlichen Windfelder berücksichtigt. Unter gewissen Umständen können auch Brückenlagen und Taleinschnitte modelliert und berechnet werden.

Die Tunnelluft, die aus dem Portal strömt, verhält sich anfänglich wie ein Luftfreistrahler, d.h. die Ausbreitung ist von der Austrittsgeschwindigkeit und der Strahlerturbulenz abhängig. Je grösser die Ausströmgeschwindigkeit ist, um so länger verbleibt der Strahl in seiner Ausbreitungsrichtung. Mit zunehmendem Abstand vom Portal dominiert der Einfluss der Turbulenz, die von den Fahrzeugen induziert wird, die nicht nur eine Quervermischung, sondern auch eine Längsverschleppung der Tunnelluft bewirkt. Resultate aus Grossversuchen stammen von I. Yoshizawa et al. [12] und Modellversuchen von M. Vanderheyde [13]. Das Ausbreitungsmodell HIWAY-2 in der Anwendung von HBI wurde mit zwei Feldmessungen geeicht [14] und [15]. Ergebnisse einer Immissionsprognose für eine Portalzone am Petuel Tunnel München wurden mit einer Messung im Windkanal verglichen. Dabei wurde die Aussage des Gutachtens zum Petuel Tunnel in München trotz punktuell unterschiedlicher Ergebnisse bestätigt [16]. Die Belastungen von offenen Strassen werden auf einer Höhe von 1.5 m über dem Boden berechnet.

Die Beobachtungen zur Ausbreitung von Portalabluft legen es nahe, die Tunnelabluft als zusätzliche Volumenquelle längs der Strasse auf eine bestimmte Länge ab Portal aufzufassen. Die anfängliche Höhen-, Breitenverteilung und Längsausdehnung hängt generell vom Strassentyp (Gegenverkehr, Richtungsverkehr), der örtlichen Orographie (Strassen im Einschnitt, Leitwände, Umgebungsbebauung) und den mittleren Windverhältnissen ab. Die Portale am Tunnel Starnberg sind als Linienquellen mit einer Länge von jeweils 100 m modelliert.

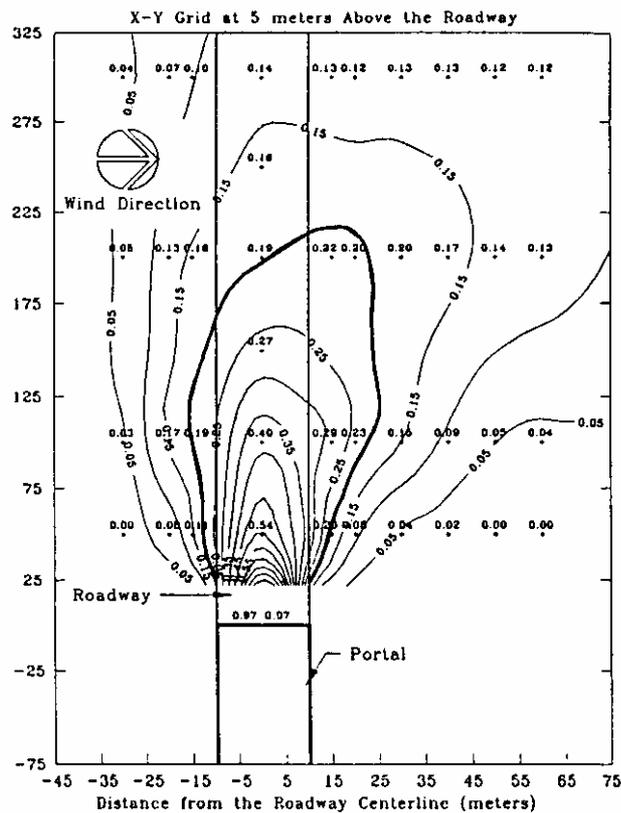


Abbildung 3.1: Windkanalmessung der Schadstoffverteilung um ein Portal

Die Ausbreitungsrechnung erfolgt für 36 10° -Sektoren der Windrichtung und drei Stabilitätsklassen instabil, neutral und stabil. Je Rechengang können mehrere tausend Punkte berechnet werden. Als Maschenweite des Rechnetzes hat sich der Abstand 50 m x 50 m bewährt. Nach der Ausbreitungsrechnung mit HIWAY-2 folgt die Gewichtung der Episodenwerte unter Einbezug der Windgeschwindigkeit sowie der berechneten Stärke der Emissionsquellen für jede Stunde über das Bezugsjahr. Die Oxidationsrechnung für NO_x erfolgt nach dem empirischen Verfahren von Romberg [18], das vom BayLfU zur Anwendung empfohlen wurde.

3.2 Genauigkeit der Immissionsberechnung

Bei einer Immissionsprognose für einen künftigen Zustand müssen prognostizierte Jahres- und Tagesgänge des Verkehrs, Fahrzeugemissionen und Wetterdaten verwendet werden.

Die Zuverlässigkeit der berechneten Schadstoffemissionen hängt von der zugrunde gelegten Verkehrsprognose (DTV, Lastwagenanteil, Verkehrssituation) und von der Prognose der Emissionsfaktoren ab.

Bei den Immissionen kommen die Unsicherheiten der Modellierung und des Berechnungsverfahrens selbst hinzu. Diese Unsicherheit in den berechneten Konzentrationen beträgt im vorliegenden Fall bis zu 30%, wenn die berechneten Konzentrationen als Punktwerte aufgefasst werden. Beim Vergleich zwischen der Berechnung und der späteren Messung muss die Messgenauigkeit für die unterschiedlichen Schadstoffe betrachtet werden.

3.3 Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung

Die Resultate der flächendeckenden Immissionsprognosen sind als Immissionskarten im Anhang D enthalten. Die erste Seite zeigt im Überblick die berechneten Situationen. Die Karten D.1 bis D.10 zeigen die Belastungen im gesamten Untersuchungsbereich, der allseitig deutlich über den direkten Einflussbereich der Emissionen aus dem Tunnel hinausgeht. Es wird damit deutlich, dass das Vorhaben trotz seiner Grösse einen örtlich eng begrenzten Einfluss auf die Luftschadstofflage hat.

Grundsätzlich führt ein Tunnel zu einer Verlagerung von Emissionen und somit von den zugehörigen Belastungen: Die Gebiete, die vom Tunnel umgangen werden, werden aufgrund der Verkehrsabnahme und der Verflüssigung des Verkehrsflusses entlastet. Die Gebiete in den Portalzonen werden ohne zusätzliche bauliche und betriebliche Massnahmen zusätzlich belastet. Um diese Mehrbelastungen zu begrenzen, kann das Lüftungssystem so geplant werden, dass die Portalabluft vermindert und damit die Belastung in der unmittelbaren Portalnähe im Vergleich zur Situation mit freier Portalabluft vermindert werden kann.

3.3.1 Stickstoffdioxid NO₂

Abbildung D.1 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der Stickstoffdioxid(NO₂)-Gesamtbelastung in der Umgebung des Nordportals im Jahr 2010. Entlang der offenen Strassenzüge auf der Münchner Strasse wird der Beurteilungswert von 40 µg/m³ eingehalten. Östlich des Eisenbahnbrücke über die Münchner Strasse – insbesondere in der Nähe der Kreuzungen mit der Gautinger Strasse und der Moosstrasse ist die Belastung leicht erhöht und erreicht dort Werte um 35 µg/m³. Westlich des Tunnelportals an der Leutstettner Strasse ist die Belastung etwas vermindert. Dort erreicht die NO₂-Konzentration Werte zwischen 31 µg/m³ und 33 µg/m³ im Kreuzungsbereich. Im unmittelbaren Einflussbereich der Portalabluft zwischen der Leutstettner Strasse und der Eisenbahnbrücke wird der Beurteilungswert von 40 µg/m³ überschritten. Südlich der Münchnerstrasse liegt der Bereich der Überschreitung ausserhalb der Gebäudelinie. An den nächstgelegenen Gebäuden¹ werden Konzentrationen zwischen 34 und 38 µg/m³ berechnet. Nördlich der Münchner Strasse liegt die Bebauung jedoch näher an der Strasse. An der Gebäudekante kann der Beurteilungswert für Stickstoffdioxid erreicht oder knapp überschritten werden.

Abbildung D.2 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der Stickstoffdioxid(NO₂)-Gesamtbelastung in der Umgebung des Nordportals im Jahr 2010 für die Lüftungsvariante Mittenab-saugung, bei der wir davon ausgehen, dass 80% der Tunnelabluft in Tunnelmitte abgesaugt und durch einen Kamin ausgeblasen wird. Die Konzentrationen im Strassenbereich entlang der Münchnerstrasse sind gegenüber der Abbildung D.1 nur geringfügig vermindert. Zwischen der Leutstettner Strasse und der Eisenbahnbrücke ist die Konzentrationsspitze jedoch abgeschwächt. Selbst im Strassenbereich wird der Beurteilungswert nicht erreicht. An der Bebauung südlich der Münchner Strasse wird die prognostizierte NO₂-Konzentration von 34 bis 36 µg/m³ auf 30 bis 32 µg/m³ vermindert (-13%). An der Bebauung nördlich der Münchner Strasse sinkt die berechnete Belastung von etwa 40 auf etwa 34 µg/m³ (-17%).

¹ Ein Gebäude fehlt in dieser Plandarstellung südlich der Münchner Strasse, vgl. Abbildung 2.1.

Die Belastungsminderung aufgrund der Absaugung ist in Abbildung D.3 dargestellt. Das Diagramm zeigt die Differenz aus den Abbildungen D.1 und D.2. Die grösste Wirkung der Absaugung betrifft den unmittelbaren Strassenbereich. Mit zunehmendem Abstand von der Strasse sinkt der Einfluss der Emissionsminderung. Die Form der Höhenlinien in Abbildung D.3 zeigt den Einfluss der Windrose (Abbildung B.1). An der Bebauung südlich der Münchner Strasse ergibt sich eine Minderung der Belastung um etwas mehr als $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nördlich der Strasse 6 bis $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Minderung nördlich der Strasse ist bereits als signifikant zu betrachten, südlich bewegt sie sich im Rahmen der Belastungsschwankung, die an einem Messpunkt von Jahr zu Jahr auftreten kann. Konzentrationsminderungen unter $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ können kaum als signifikant betrachtet werden.

Abbildung D.4 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der Stickstoffdioxid(NO_2)-Gesamtbelastung in der Umgebung des Südportals im Jahr 2010. Entlang der Weilheimer Strasse östlich des Südportals beträgt die Belastung in einem etwa 60 m breiten Streifen mehr als $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Entlang der Jahnstrasse übersteigt die Konzentration die Grundbelastung nur unwesentlich. Die grössten Belastungen ergeben sich wiederum in unmittelbarer Nähe des Tunnelportals. Die Konzentrationen erreichen dort am Strassenrand Werte um $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$. An der nächstgelegenen Bebauung südlich der Weilheimer Strasse ist die Belastung jedoch bereits deutlich geringer. Sie beträgt an der Gebäudekante etwa $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Belastung in der Umgebung des Südportals wird somit nicht als kritisch angesehen.

Abbildung D.5 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der Stickstoffdioxid(NO_2)-Gesamtbelastung in der Umgebung des Südportals im Jahr 2010 für die Lüftungsvariante Mittenabsaugung, bei der wir davon ausgehen, dass 80% der Tunnelabluft in Tunnelmitte abgesogen und durch einen Kamin ausgeblasen wird. Die Konzentrationen in Strassennähe entlang der Weilheimer Strasse sind gegenüber Abbildung D.4 praktisch unverändert. Im Portalbereich ist die Belastungsspitze hingegen stark abgeschwächt. Die Konzentrationen erreichen am Strassenrand nur noch Werte um $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$. An der Gebäudekante südlich des Portals sind die berechneten Konzentrationen auf etwa $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vermindert.

Die Belastungsminderung aufgrund der Absaugung ist in Abbildung D.6 dargestellt. Das Diagramm zeigt die Differenz aus den Abbildungen D.4 und D.5. Die grösste Wirkung der Absaugung betrifft den unmittelbaren Strassenbereich. Mit zunehmendem Abstand von der Strasse sinkt der Einfluss der Emissionsminderung rasch ab. An der Bebauung unmittelbar südlich der Weilheimer Strasse zeigt das Diagramm eine Minderung der Konzentrationen um etwa $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Belastungsminderungen unter $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ können kaum als signifikant betrachtet werden, da eine jährliche Variation der Immissionsmessungen in der gleichen Grössenordnung liegt.

3.3.2 Feinstaub PM10

Abbildung D.7 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der Feinstaub(PM_{10})-Gesamtbelastung in der Umgebung des Nordportals im Jahr 2010. Am Strassenrand der offenen Münchner Strasse wird der Beurteilungswert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eingehalten. Östlich der Eisenbahnbrücke über die Münchner Strasse – insbesondere in der Nähe der Kreuzungen mit der Gautinger Strasse und der Moosstrasse ist die Belastung leicht erhöht und erreicht dort Werte zwischen 30 bis $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Westlich des Tunnelportals an der Leutstettner Strasse ist die

Belastung etwas vermindert. Dort erreicht die PM10-Konzentration Werte zwischen $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Kreuzungsbereich. Im unmittelbaren Einflussbereich der Portalabluft zwischen der Leutstettner Strasse und der Eisenbahnbrücke wird der Beurteilungswert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ am Strassenrand nur knapp unterschritten. An den nächstgelegenen Gebäuden südlich der Münchner Strasse werden Konzentrationen zwischen 30 und $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet. Nördlich der Münchner Strasse liegt die Bebauung jedoch näher an der Strasse. An der Gebäudekante werden Konzentrationen zwischen 33 und $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ prognostiziert.

Abbildung D.8 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der PM10-Gesamtbelastung in der Umgebung des Nordportals im Jahr 2010 für die Lüftungsvariante Mittenabsaugung. Bei dieser Lüftungsvariante gehen wir davon aus, dass 80% der Tunnelabluft in Tunnelmitte abgesogen und durch einen Kamin ausgeblasen wird. Die Konzentrationen im Strassenbereich entlang der Münchnerstrasse sind gegenüber der Abbildung D.7 nur geringfügig vermindert. Zwischen der Leutstettner Strasse und der Eisenbahnbrücke ist die Konzentrationsspitze jedoch abgeschwächt. Selbst am Strassenrand liegt die Konzentration nicht über den Werten der Kreuzung zwischen Münchner Strasse und Gautinger Strasse. An der Bebauung südlich der Münchner Strasse wird die prognostizierte PM10-Konzentration von 30 bis $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auf 28 bis $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vermindert. An der Bebauung nördlich der Münchner Strasse sinkt die berechnete Belastung von etwa 36 auf etwa $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Abbildung D.9 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der PM10-Gesamtbelastung in der Umgebung des Südportals im Jahr 2010. Entlang der Weilheimer Strasse östlich des Südportals beträgt die Belastung in einem etwa 60 m breiten Streifen zwischen über $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Entlang der Jahnstrasse übersteigt die Konzentration die Grundbelastung nur unwesentlich. Die grössten Belastungen ergeben sich wiederum in unmittelbarer Nähe des Tunnelportals. Die Konzentrationen erreichen dort am Strassenrand Werte um $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$. An der nächstgelegenen Bebauung südlich der Weilheimer Strasse beträgt die Belastung an der Gebäudekante etwa $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die PM10-Belastung in der Umgebung des Südportals wird somit nicht als kritisch angesehen.

Abbildung D.10 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der PM10-Gesamtbelastung in der Umgebung des Südportals im Jahr 2010 für die Lüftungsvariante Mittenabsaugung. Bei dieser Lüftungsvariante gehen wir davon aus, dass 80% der Tunnelabluft in Tunnelmitte abgesogen und durch einen Kamin ausgeblasen wird. Die Konzentrationen im Strassenbereich entlang der Weilheimer Strasse sind gegenüber Abbildung D.4 praktisch unverändert. Im Portalbereich ist die Belastungsspitze hingegen stark abgeschwächt. Die Konzentrationen erreichen am Strassenrand nur noch Werte bis $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$. An der Gebäudekante südlich des Portals sind die berechneten Konzentrationen auf etwa $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vermindert.

4 Numerische Ausbreitungsrechnung mit MISKAM

4.1 Methodik der Immissionsberechnung

MISKAM (Mikroskaliges Klima- und Ausbreitungsmodell) ist ein dreidimensionales Strömungs- und Ausbreitungsmodell für die kleinräumige Prognose von Windverteilung und Konzentrationen in städtischen Gebieten. Das Programm wurde von Dr. Eichhorn (Gutenberg Universität Mainz) entwickelt und validiert. Eine ausführliche Programmbeschreibung ist in [19] angegeben.

Die Validierung von MISKAM erfolgte anhand von Messdaten aus Windkanaluntersuchungen und Ergebnisse aus Feldmessungen. Ein Teil der Validierungsarbeit ist in [20] (Vergleich mit Windkanalmessungen und anderen Rechenprogrammen) und [21] (Vergleich mit Windkanalmessungen, Feldversuchen und anderen Rechenprogrammen) dokumentiert.

WinMISKAM [22] ist eine Windows-Applikation, welche eine komfortablere Verwendung von MISKAM auf unter Windows betriebene Rechnern erlaubt. Der Rechenkern besteht aus der aktuellen MISKAM Version, was die vollständige Kompatibilität mit den Ergebnissen von MISKAM garantiert.

Die Strömungsberechnung basiert auf einer numerischen Lösung der inkompressiblen, dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen in einem kartesischen Koordinatensystem. Die Bebauung sowie alle andere wesentlichen geometrischen Eigenschaften vom Ausbreitungsgebiet müssen mit diesem Gitter dargestellt werden. Kleine, nicht explizit aufgelöste Einzelheiten können durch eine geeignete Rauigkeitsverteilung erfasst werden.

Zur Berechnung vom turbulenten Austausch sind zwei Turbulenzmodelle implementiert, ein „k-Modell“ und das $k-\epsilon$ (bzw. $E-\epsilon$) Modell. Letzteres ist rechnerisch wesentlich anspruchsvoller, gestattet aber eine realistischere Modellierung der komplexen dreidimensionalen Strömungsvorgänge bei komplexer Bebauung. Für die Ausbreitungsrechnungen, die in diesem Bericht dokumentiert sind, wurde nur mit dieser Variante gearbeitet.

Die Berechnung der Schadstoffausbreitung basiert auf den dreidimensionalen Transportgleichungen, welche Advektion und turbulente Diffusion von Schadstoffen berücksichtigen. MISKAM gestattet nur die Ausbreitungsrechnung inerter Schadstoffe. Chemische Reaktionen werden nicht betrachtet. Die Oxidation von NO zu NO₂ muss daher separat berechnet werden. Die Umrechnung erfolgt mit dem Ansatz von Romberg [18]. Strassen und Tunnelportale werden als Linien- bzw. als Volumenquellen modelliert. Die Quellstärke hängt vom Verkehr (Geschwindigkeit, Lkw Anteil, Verkehrszusammensetzung, Bezugsjahr usw.) und von den spezifischen Fahrzeugemissionen ab.

MISKAM gestattet die Berechnung von Einzelepisoden. Mit Episode bezeichnen wir eine vorgegebene Kombination aus Windrichtung, Windstärke und Emission, das dazugehörige Strömungsfeld und die Schadstoffverteilung. Einzelepisoden müssen zur Bestimmung von Jahresmittelwerten und Perzentilen statistisch ausgewertet werden. Für dieses Gutachten wurden die in WinMISKAM implementierten Auswerteroutinen verwendet. Die Auswertung von WinMISKAM erlaubt keine Berücksichtigung der Tagesgänge von Verkehr und Wind.

Die Anzahl Einzelepisoden, welche für eine zuverlässige Immissionsprognose berücksichtigt werden müssen, ist stark von der Konfiguration abhängig. Theoretisch sollten Berechnungen für alle an einem Ort auftretende Kombinationen von Windgeschwindigkeit, Richtung und

Stabilitätsklasse durchgeführt werden. Es zeigt sich aber, dass Windgeschwindigkeiten sich in diesem Fall sehr genau skalieren lassen, und dass der Einfluss der atmosphärischen Stabilitätsbedingungen bei kleinräumigen Berechnungen und dichter Bebauung klein ist. Testrechnungen von Bigalke [23] deuten darauf hin, dass die Berücksichtigung von 12 Windrichtungen in städtischen Gebieten schon zu recht guten Ergebnissen führen kann, und dass dieser Wert für eine grobe Abschätzung von Jahresmittelwerten sogar bis auf 4 reduziert werden könnte. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen wird für die Immissionsprognose für Starnberg mit 36 Windrichtungen gearbeitet.

4.2 Genauigkeit der Immissionsberechnung

Trotz der hohen Benutzerfreundlichkeit, erfordert die Anwendung von MISKAM Erfahrung, sowohl von der Beurteilung der Schadstoffausbreitung wie auch von der numerischen Seite. Ungenügende Sorgfalt im Umgang mit dem Modell kann zu (qualitativ und quantitativ) falschen Aussagen führen. Zu den kritischen Elementen bei der Durchführung einer typischen Immissionsberechnung mit MISKAM gehören die Richtige Wahl von Immissions- und Emissionsperimeter, die Qualität des Rechengitters, die Bestimmung der Quellstärke anhand der spezifischen Emissionsfaktoren und des Verkehrs, die Modellierung der Portalquellen, die Qualität der vorhandenen Meteorodaten und die statistische Auswertung der Ergebnisse.

Im Rahmen eines Europäischen Forschungsprogrammes durchgeführte Validierungsrechnungen [21] geben Hinweise auf die quantitative Genauigkeit. Die Ergebnisse der Studie deuten darauf hin, dass bei Ausbreitungsrechnungen mit MISKAM mit punktuellen Abweichungen von 20 bis 30% zwischen Messung und Berechnung ausgegangen werden muss.

4.3 Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung

Die Resultate der Immissionsprognosen sind als Immissionskarten im Anhang E enthalten. Die erste Seite zeigt im Überblick die berechneten Situationen. Die Karten F.1 bis F.4 zeigen die Belastungen in den Portalbereichen. Der dargestellte Bereich ist ein Ausschnitt aus dem Rechengebiet. Das Rechengebiet geht allseitig deutlich über den direkten Einflussbereich der Emissionen aus dem Tunnel hinaus.

4.3.1 Stickstoffdioxid NO_2

Abbildung E.1 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der Stickstoffdioxid-Gesamtbelastung in der Umgebung des Nordportals im Jahr 2010. Im Bereich der offenen Strasse östlich der Bahnlinie liegt die Linie, die eine Konzentration in der Höhe des Beurteilungswertes $40 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ anzeigt, vollständig im Strassenbereich. An den Gebäuden entlang der offenen Strasse liegen die berechneten Konzentrationen bei 32 bis $38 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$. Entlang der Münchner Strasse westlich des Tunnelportals ist die Schadstoffkonzentration geringer als östlich der Bahnlinie. An der Bebauung entlang der Strasse liegen die berechneten Konzentrationen bei etwa $32 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$, etwa 20% unter dem Beurteilungswert. Damit wird die Entlastung durch den Tunnel sichtbar.

Der Einflussbereich der Portalabluft ist lokal begrenzt. Er umfasst den Bereich zwischen der Kreuzung der Münchner Strasse und der Leutstettner Strasse bis zur Bahnlinie. In diesem

Abschnitt kann an den Fassaden der Gebäude nördlich und südlich der Strasse der Grenzwert von $40 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ erreicht oder leicht überschritten werden. Die Schadstoffsituation erscheint noch relativ günstig, da die Bebauung gerade im Einflussbereich der Portalquelle einen relativ grossen Abstand von der Strasse aufweist.

Abbildung E.2 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der Stickstoffdioxid-Gesamtbelastung in der Umgebung des Südportals im Jahr 2010. Entlang der offenen Strasse östlich des Einflussbereichs der Portalabluft liegen die Konzentrationen deutlich tiefer als in der Umgebung des Nordportals. Dies ist auf das geringere Verkehrsaufkommen in der Weilheimer Strasse zurückzuführen. Am Portal selbst ergibt die Berechnung, dass auf einer Länge von etwa 120 m bis zu einem Strassenabstand von etwa 12 m der Beurteilungswert $40 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ erreicht werden kann. Für die umliegende Wohnbebauung ist die Situation jedoch nicht kritisch, da die nächstliegenden Häuser etwa 30 m von der Strasse entfernt sind. An diesen nächstliegenden Gebäuden ergibt die Berechnung Schadstoffkonzentrationen bei 32 bis $34 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$.

Die Immissionsbelastung durch den Schadstoff Stickstoffdioxid kann nach der MISKAM-Ausbreitungsrechnung an einzelnen Gebäuden am Nordportal knapp den Grenzwert erreichen. Am Südportal ist die Belastung nicht kritisch.

4.3.2 Feinstaub PM10

Abbildung E.3 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der PM10-Gesamtbelastung in der Umgebung des Nordportals im Jahr 2010. Im Bereich der offenen Strasse östlich der Bahnlinie liegt die Linie, die eine Konzentration in der Höhe des Beurteilungswertes $40 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ anzeigt, annähernd vollständig im Strassenbereich. An einem Gebäude nördlich der Münchner Strasse erreicht die Linie, die Konzentrationen von $40 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ anzeigt, gerade die Fassade. Das Gebäude befindet sich jedoch ausserhalb des Einflussbereichs der Portalabluft. Eine Verminderung der Portalabluft kann dort kaum eine messbare Minderung bringen. Entlang der Münchner Strasse westlich des Tunnelportals ist die Schadstoffkonzentration geringer als östlich der Bahnlinie. An der Bebauung entlang der Strasse liegen die berechneten Konzentrationen bei 30 bis $32 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$. Damit wird die Entlastung durch den Tunnel sichtbar.

Der Einflussbereich der Portalabluft ist lokal begrenzt. Er umfasst den Bereich zwischen der Kreuzung der Münchner Strasse und der Leutstettner Strasse bis zur Bahnlinie. In diesem Abschnitt reicht die Linie, die eine Konzentration am Grenzwert von $40 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ anzeigt, etwas weiter über den Strassenbereich hinaus. Für die umliegenden Gebäude ergibt die Berechnung jedoch keine Überschreitung des Beurteilungswertes. Die Schadstoffsituation erscheint akzeptabel, da die Bebauung gerade im Einflussbereich der Portalquelle einen relativ grossen Abstand von der Strasse aufweist.

Abbildung E.4 zeigt die Prognose des Jahresmittelwertes der Stickstoffdioxid-Gesamtbelastung in der Umgebung des Südportals im Jahr 2010. Entlang der offenen Strasse östlich des Einflussbereichs der Portalabluft liegen die Konzentrationen deutlich tiefer als in der Umgebung des Nordportals. Dies ist auf das geringere Verkehrsaufkommen in der Weilheimer Strasse zurückzuführen. Am Portal selbst ergibt die Berechnung, dass nur im unmittelbaren Strassenbereich der Beurteilungswert $40 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ erreicht werden kann. Für die

umliegende Wohnbebauung ist die Situation nicht kritisch, da die nächstliegenden Häuser etwa 30 m von der Strasse entfernt sind. An diesen nächstliegenden Gebäuden ergibt die Berechnung Schadstoffkonzentrationen zwischen 26 bis 30 $\mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$, also 30 bis 35% unter dem Beurteilungswert.

Die Immissionsbelastung durch den Schadstoff PM₁₀ erreicht nach der MISKAM-Ausbreitungsrechnung in der Umgebung des Nordportals nur an einem Gebäude an der Münchner Strasse knapp den Grenzwert. Dieses Gebäude befindet sich ausserhalb des Einflussbereichs der Portalabluft. Am Südportal ist die Belastung nicht kritisch.

5 Vergleich der Ergebnisse MISKAM – HIWAY

Die Ergebnisse der Immissionsprognosen mit den Berechnungsprogrammen MISKAM und HIWAY ergeben punktuell unterschiedliche Ergebnisse, führen jedoch zu der gleichen Beurteilung. In diesem Abschnitt gehen wir auf die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Berechnungsmethoden ein.

Zunächst sind die Anwendungsbereiche der beiden Programme zu unterscheiden. HIWAY-2 wurde in erster Linie für Ausbreitungsrechnungen über ein Untersuchungsgebiet von einigen Quadratkilometern Ausdehnung entwickelt. Das Programm ist besonders für die Beurteilung der gesamten Auswirkungen eines Strassen- oder Tunnelprojektes auf die Lufthygiene geeignet. Bei einem grossen Untersuchungsperimeter wird ein Raster von Immissionspunkten festgelegt, bei dem zwischen zwei Punkten ein Abstand von 50 m liegt. Bedingt durch das Punktraster können – abhängig von der Lage der Rechenpunkte zu den Quellen – lokale Spitzenkonzentrationen auf einer Fläche von etwa 0.5 ha untergehen. Für die Gesamtbeurteilung eines Projektes haben derart kleinräumige Einflüsse eine untergeordnete Bedeutung, zumal diese Spitzenkonzentrationen nur im Strassenbereich auftreten.

MISKAM ist für ein Untersuchungsgebiet mit einer Ausdehnung von wenigen hundert Metern entwickelt worden. Mit einer Immissionsprognose in der Umgebung der Portale kann also keine Gesamtbeurteilung eines Tunnelprojektes erfolgen, da der untertunnelte, entlastete Bereich nicht erfasst wird. Andererseits können die Konzentrationen innerhalb eines kleinen Ausbreitungsgebietes mit Berücksichtigung lokaler Einflüsse (Gebäudeumströmung usw.) berechnet werden. Die Ergebnisse sind detaillierter. Die räumliche Auflösung der Konzentrationen ist bei der numerischen Berechnungsmethode sehr hoch.

Die höchsten Schadstoffkonzentrationen treten bei beiden Modellen in unmittelbarer Nähe der Quellen, also im Strassenbereich, auf. Diese Konzentrationsmaxima sind in der Darstellung der Ergebnisse bei MISKAM enthalten. Bei HIWAY treten sie nur auf, wenn ein Immissionspunkt im Strassenbereich liegt.

Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten, eine Schadstoffquelle in einer Ausbreitungsrechnung zu definieren. Eine Möglichkeit ist die Vorgabe einer Anfangskonzentration. Bei einer Portalquelle könnte sich diese Konzentration aus der Schadstoffkonzentration im Tunnel und aus der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel berechnen. In den Ausbreitungsmodellen MISKAM und HIWAY wird die Strömung aus dem Portal jedoch nicht einbezogen. Bei der Vorgabe der Anfangskonzentration ist die freigesetzte Schadstoffmenge somit eine Funktion der Windgeschwindigkeit und keine Vorgabe der Berechnung. Die zweite Möglichkeit der Modellierung einer Portalquelle ist die Angabe der freigesetzten Schadstoffmenge pro Zeit (Quellstärke). Bei dieser Definition ergibt sich die Anfangskonzentration aus der Windgeschwindigkeit und der freigesetzten Schadstoffmenge. Wenn die lokale Windgeschwindigkeit vor dem Portal kleiner ist als die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel, so ist die berechnete Anfangskonzentration im Strassenbereich höher als die tatsächliche Konzentration am Tunnelende. Da im Ausbreitungsgebiet die gesamte freigesetzte Schadstoffmenge wichtiger ist als die Anfangskonzentration im Strassenbereich, schreiben Ausbreitungsmodelle in der Regel die Angabe einer Quellstärke vor.

Bei der Interpretation der Immissionskarten ist zu beachten, dass sich die Konzentrationen an der Quelle aus der Definition der Quellen ergeben. Sie sind nicht Ergebnis der Ausbreitungsvorgänge. Die Definition der Quellen ist in beiden Modellen unterschiedlich. Bei HIWAY-2 geht die Berechnung von einer Anfangskonzentration aus, die von der Windgeschwindigkeit abhängt. In einem empirischen Ansatz wird zusätzlich die Turbulenz berücksichtigt, die von den einzelnen Fahrzeugen erzeugt wird. Bei MISKAM werden die Schadstoffe innerhalb eines Volumens freigesetzt. Die Anfangskonzentration hängt – neben der Quellstärke und der Windgeschwindigkeit – vom Volumen der Quelle ab. Auch hier ist die Anfangskonzentration eher eine Randbedingung der Berechnung und kein Ergebnis. Für die Interpretation der berechneten Konzentrationen sei nochmals auf die Definition der Beurteilungswerte in Abschnitt 2.4.1 hingewiesen. Im Entwurf der 22. BImSchV ist der Ort für eine Immissionsmessung definiert, danach gelten die Beurteilungswerte nicht für den unmittelbaren Strassenbereich, sondern für die Fassaden der umliegenden Gebäude. Die hohen Anfangskonzentrationen auf der Strasse, die in den MISKAM-Immissionskarten dargestellt sind, sollten also nicht für einen Vergleich mit den Beurteilungswerten herangezogen werden. In grösserer Entfernung von der Quelle nimmt die Schadstoffkonzentration in Bodennähe nach der Berechnung mit MISKAM schneller ab als nach der Berechnung mit HIWAY (Vergleich z.B. zwischen Abbildung D.7 und Abbildung E.3, Konzentrationslinie $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Dies ist auf die erhöhte bodennahe Turbulenz zurückzuführen, die bei der Gebäudeumströmung entsteht. Die empirischen Parameter, die in die Ausbreitungsrechnung bei HIWAY eingehen, sind auf eine ebene, ungestörte Ausbreitung abgestimmt, wodurch die Konzentration eher konservativ ermittelt wird.

6 Schadstoffimmissionen durch Kaminabluft

6.1 Einleitung

Der Bau eines Tunnelluftkamins bezweckt, die Abgase aus dem Tunnel in höhere Luftschichten zu verfrachten, was analog zu einem Hochkamin auf geringe Abgaskonzentrationen am Boden führt.

Dank dem Ausstoss dieser Tunnelluft senkrecht nach oben können je nach Windgeschwindigkeit Aufstieghöhen von 50 bis 100 m über der Kaminmündung erreicht werden. Anschliessend wird die Tunnelluft durch Wind und atmosphärische Turbulenz allseitig weiter verteilt. In einem grösserem Abstand vom Kamin berührt ein Teil des Abgases in sehr verdünntem Mass wieder den Boden. Im Vergleich zu den Immissionen von offenen Strassen und von Tunnelportalen sind die bodennahen Belastungen aus Abluftkaminen sehr gering. Der Grund dazu liegt in der besseren räumlichen Ausbreitung und Verdünnung der Schadstoffe sowie in der meist grösseren vertikalen Distanz bis zu den nächsten Immissionsorten. Zusätzlich sind die meteorologischen Ausbreitungsbedingungen in der Höhe günstiger als bei bodennahen Emissionen.

In diesem Kapitel sind die Ausbreitungsrechnungen für die Schadstoffe Stickstoffdioxid NO_2 und lungengängigen Feinstaub PM_{10} dokumentiert. Da die Einzelheiten über den Kaminbetrieb erst während dem Betrieb des Tunnels festgelegt werden können, gehen wir grundsätzlich von konservativen Annahmen bezüglich Kaminhöhe und -betriebsdauer, Ausblasgeschwindigkeit und Meteorologie aus. Die tatsächlichen Belastungen werden voraussichtlich deutlich niedriger sein als in den Immissionskarten dargestellt.

6.2 Methodik der Immissionsberechnung

Die Berechnung der weiträumigen Immissionen im Langzeitmittel aus Abluftkaminen wird bei HBI meist mit dem US EPA-Programm ISCST (Industrial Source Code Short Term) durchgeführt. Als Ergebnis liegen die Belastungen in einem Horizontalschnitt in einem grossen Untersuchungsgebiet vor.

Für die Ausbreitungsrechnung wird die Windstatistik der Messstation Schlossberg verwendet. Die Windrose ist in Abbildung B.3 im Anhang dargestellt. Die Ausblasgeschwindigkeit aus der Kaminmündung wird zwischen 10 und 15 m/s angenommen. In der RABT Ausgabe 1994 wird empfohlen, einen Abluftkamin mit Ausblasgeschwindigkeiten zwischen 10 und 20 m/s zu betreiben. Bei einer höheren Ausblasgeschwindigkeit ergibt sich eine stärkere Verdünnung bei einem höheren Energieaufwand. Ab etwa 20 m/s Ausblasgeschwindigkeit kann sich eine hörbare Geräusentwicklung durch den Luftstrahl ergeben.

Gemäss der Festlegung in der TA Luft für Kaminberechnungen wird von einem pauschalen Mittelwert der Oxidationsrate NO_2/NO_x von 60% ausgegangen. Die Emissionsdaten entsprechen den Angaben in Abschnitt 2.6 dieses Berichts.

Im weiteren gehen wir für die Berechnung von den Grundlagen aus, die in Tabelle 6.1 zusammengefasst sind.

Kaminhöhe	15 m
Rezeptorhöhe	14 m
Kaminbetrieb	7-19 Uhr
Abluftmenge	230 m ³ /s
Ausblasgeschwindigkeit	10, 12 und 15 m/s
Umwandlungsrate NO ₂ /NO _x	60 %
Mittlere PM10-Emission 2010, 7-19 Uhr	720.2 g/h
Mittlere NO _x -Emission 2010, 7-19 Uhr	134.9 g/h

Tabelle 6.1: Grundlagen der Ausbreitungsrechnung

Die Rezeptorhöhe gibt die Höhe über dem Boden an, in der die Konzentrationen berechnet werden. Die Konzentrationen am Boden sind nochmals geringer als in dieser Rezeptorhöhe.

6.3 Ergebnisse der Ausbreitungsrechnung

In den Abbildungen F.1 bis F.3 im Anhang sind die Jahresmittelwerte der Stickstoffdioxid- und PM10 Zusatzbelastungen aus der Kaminabluft als Immissionskarten dargestellt.

Abbildung F.1 zeigt die Immissionskarten für eine mittlere Ausblasgeschwindigkeit von 10 m/s. Die prognostizierte maximale Zusatzbelastung beträgt 0.34 µg/m³ Stickstoffdioxid und 0.11 µg/m³ PM10 im Jahresmittelwert. Dies entspricht etwa 0.85% des Grenzwertes für Stickstoffdioxid und 0.28% des Grenzwertes für PM10. Zusatzbelastungen in dieser Größenordnung können bereits aufgrund der Hintergrundbelastung messtechnisch nicht nachgewiesen werden.

Bei einer erhöhten Ausblasgeschwindigkeit von 12 m/s bzw. 15 m/s sinkt die prognostizierte Zusatzbelastung weiter ab. Der Einfluss der Ausblasgeschwindigkeit kann aus Tabelle 6.2 abgelesen werden.

Ausblasgeschwindigkeit	Maximale Zusatzbelastung	
	NO ₂	PM10
10 m/s	0.34 µg/m ³	0.11 µg/m ³
12 m/s	0.30 µg/m ³	0.09 µg/m ³
15 m/s	0.26 µg/m ³	0.08 µg/m ³

Tabelle 6.2: Maximale Zusatzbelastung durch NO₂ und PM10 in Abhängigkeit der Ausblasgeschwindigkeit

Die Immissionsberechnungen zeigen, dass die Tunnelabgase durch einen mit 10 bis 15 m/s austretenden Abluftstrahl enorm verdünnt werden und dass am Boden nicht mehr messbare Zusatzbelastungen auftreten.

Die Ausblasgeschwindigkeit 10 m/s sollte auch im Teillastbetrieb nicht wesentlich unterschritten werden, um eventuelle Geruchsbelastungen in der Umgebung des Kamins zu vermeiden. Um am Kaminaustritt auch bei böigem Wind einen stabilen Luftaustritt zu bewahren, empfiehlt es sich, die 230 m³/s Tunnelabluft mit 18 m/s auszustossen, also 12.7 m² Kaminquerschnittsfläche vorzusehen. Auch im Teillastbetrieb bei Absaugung von 115 m³/s genügt eine Ausblasgeschwindigkeit von 9 m/s für die Abgasverdünnung.

Da bei Betrieb der Absaugung zur Belüftung des Tunnelinneren eine geringere Luftmenge genügt, sollte eine Unterteilung des Kamins in zwei Züge geprüft werden. In der Ausführungsplanung für den Tunnel ist zu vergleichen, welche der folgenden Varianten vorzuziehen sei:

- Variante A: Auslegung des Kamins auf eine maximale Ausblasgeschwindigkeit von 18 m/s und eine minimale Abluftmenge von 115 m³/s.
- Variante B: Auslegung auf eine maximale Ausblasgeschwindigkeit von 15 m/s und eine Unterteilung des Kamins in zwei Züge.

Bei Variante A sind höhere Betriebskosten und bei Variante B höhere Investitionskosten zu erwarten. Bei der Auswahl ist auch die Gestaltung des Kamins zu beachten.

7 Lüftung im Normalbetrieb

7.1 Verkehrsfälle

Zur Lüftungsberechnung werden bestimmte Verkehrsfälle (Kombinationen von Verkehrssituationen, -belastungen und Fahrgeschwindigkeiten) definiert, welche das nach der Erfahrung mögliche Spektrum abdecken. Die hier zugrunde gelegten Verkehrsfälle sind in Tabelle 7.1 zusammengestellt. Aus der Berechnung des jeweiligen Aussenluftbedarfs, der Selbstlüftung des Verkehrs und des notwendigen Ventilatorschubs im Fall einer Längslüftung ergeben sich schliesslich die zur Bemessung der Lüftungsanlage massgebenden Fälle.

Nr.	Verkehrsfälle	Dichte [Fz/h]	Richtung		Lw-Anteil [%]	Pw [Fz/h]	Lw [Fz/h]	Geschw. [km/h]
			s→n / n→s	[%/%]				
1	10% DTV flüssig	1'760	20/80		5	1'672	88	60
2	10% DTV flüssig	1'760	40/60		5	1'672	88	60
3	10% DTV flüssig	1'760	60/40		5	1'672	88	60
4	10% DTV flüssig	1'760	80/20		5	1'672	88	60
5	10% DTV 40 km/h	1'760	20/80		5	1'672	88	30
6	10% DTV 40 km/h	1'760	40/60		5	1'672	88	30
7	10% DTV 40 km/h	1'760	60/40		5	1'672	88	30
8	10% DTV 40 km/h	1'760	80/20		5	1'672	88	30
9	stockend 1 Spur	1'000	0/100		5	950	50	10
10	Stau 1 Spur	150/km	0/100		5	142	8	0

Tabelle 7.1: Auswahl der untersuchten Verkehrsfälle für das Jahr 2010

Die Verkehrsfälle 9 und 10 können bei länger andauernden Wartungsarbeiten unter Verkehr im Tunnel auftreten. Daher ist der niedrige Grenzwert für die Luftqualität aus Tabelle 2.8 anzuwenden.

7.2 Frischluftbedarf

Die Berechnungen des Frischluftbedarfs und der Selbstlüftung werden mit dem Programm FLB NT1.6 durchgeführt, das stationäre Verkehrszustände auf der Basis von Stundenwerten einbezieht.

Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2 zeigen den berechneten Frischluftbedarf für die zehn Verkehrsfälle aus Tabelle 7.1. In fast allen Verkehrsfällen ist die Sichttrübung für den Frischluftbedarf massgebend. Einzig bei stockendem Verkehr auf einer Fahrspur und den Grenzwerten, die während Wartungsarbeiten im Tunnel einzuhalten sind, erfordert die Einhaltung der CO-Konzentration eine etwas grössere Frischluftmenge als die Sichttrübung.

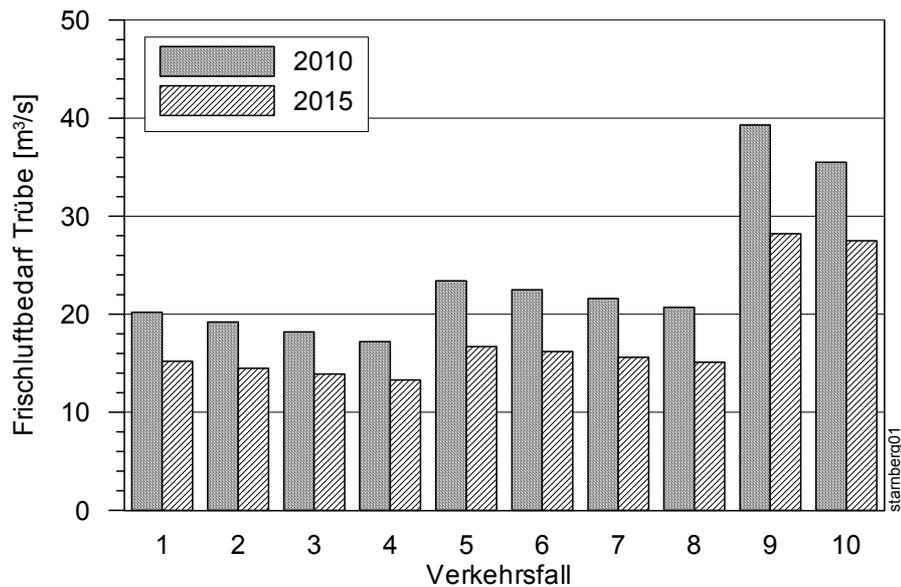


Abbildung 7.1: Frishluftbedarf für die Einhaltung der Sichttrübe für die Verkehrsfälle aus Tabelle 7.1

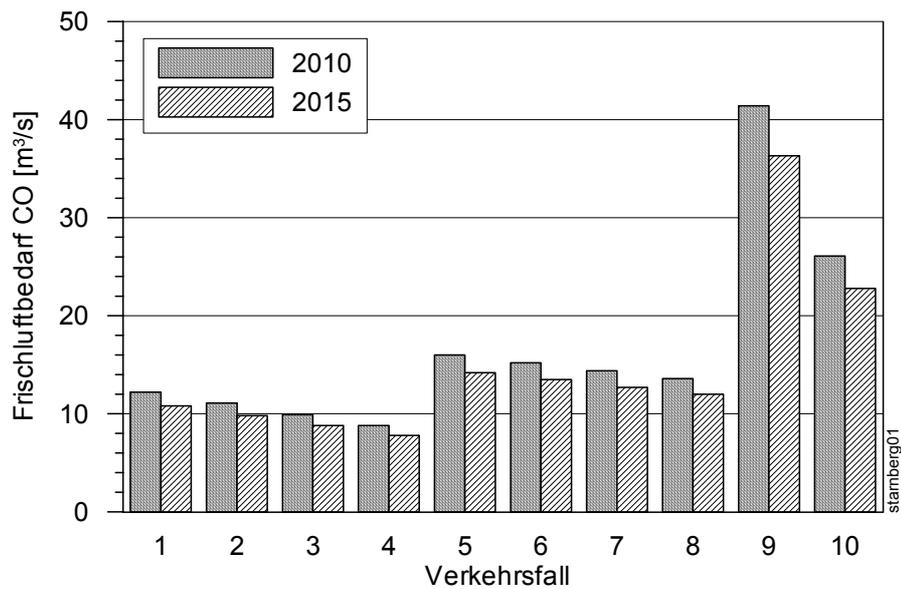


Abbildung 7.2: Frishluftbedarf für die Einhaltung der CO-Konzentration für die Verkehrsfälle aus Tabelle 7.1

Die Selbstlüftung durch den Verkehr ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Für die Selbstlüftung ist nur der Betrag, nicht die Richtung der durch den Verkehr geförderten Luftmenge von Bedeutung.

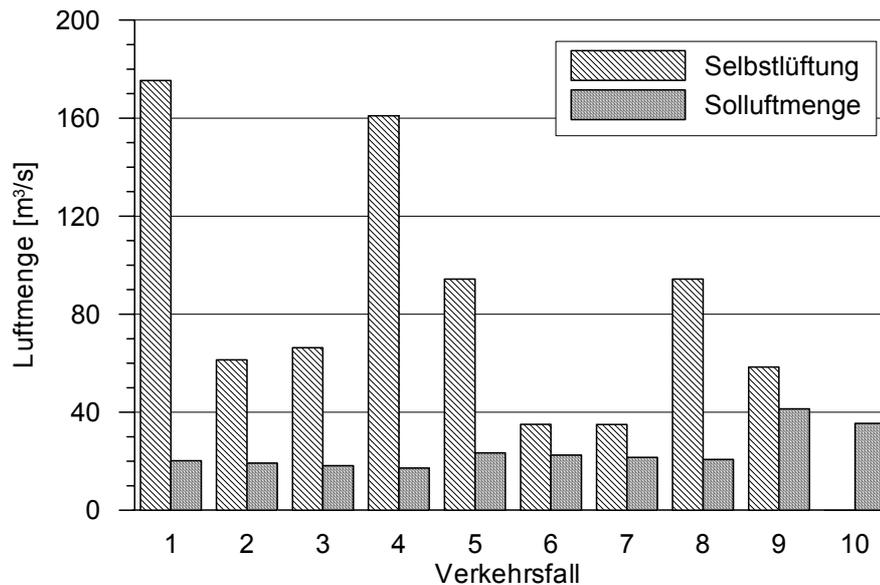


Abbildung 7.3: Selbstlüftung durch den Verkehr und Sollluftmenge 2010 für die Verkehrsfälle aus Tabelle 7.1

In fast allen Verkehrsfällen ist die Selbstlüftung grösser als der Frischluftbedarf. Einzige Ausnahme ist die Situation mit stehenden Fahrzeugen in einer Fahrtrichtung (Fall 10). Ausgehend von „sauberer“ Tunnelluft, erreicht die Sichttrübung bei Stau in einer Fahrtrichtung nach etwa 40 min den Grenzwert. Der Fahrzeugstau muss also über längere Zeit vorliegen, bis der Bemessungswert erreicht wird. Gleichzeitig genügt bereits eine Druckdifferenz zwischen den Portalen von 5 Pa, um bei Stau für eine ausreichende Frischluftzufuhr zu sorgen. Bei den „normalen“ Grenzwerten geht der Frischluftbedarf in diesen Situationen um mehr als die Hälfte (Sichttrübung) zurück.

Um bei Stau und den strengen Grenzwerten während Wartungsarbeiten im Tunnel genügend Frischluft in den Tunnel zu fördern, ist ein Schub von 220 N erforderlich. Dieser Schub kann von einem Strahlventilator Typ 90R aufgebracht werden.

Durch die Verringerung der Fahrzeugemissionen ergibt sich bei der Auslegung von neuen Lüftungsanlagen ein sehr geringer Frischluftbedarf. Wird eine Lüftung mit einem derart schwachen System ausgestattet, wird das Regelungssystem aus Tunnelluft, Verkehr und Tunnellüftung sehr träge. In [24] wird ein Korrekturfaktor bei geringem Frischluftbedarf vorgeschlagen. Die Berücksichtigung dieses Korrekturfaktors schafft für die Regelung der Lüftungsanlage eine genügende Kapazität, um z.B. ein lokales Schadstoffmaximum aus dem Tunnel zu treiben. Für den Tunnel Starnberg empfehlen wir eine Mindestluftmenge von $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Daraus ergibt sich eine minimale Strömungsgeschwindigkeit von 1.5 m/s im Tunnel und die Möglichkeit, die Tunnelluft innerhalb einer Stunde 2.5mal auszutauschen. Um diese Strömungsgeschwindigkeit in allen Szenarien aus Tabelle 7.1 erreichen zu können, ist ein Schub von 1.19 kN erforderlich. Dieser Schub kann von drei Strahlventilatoren vom Typ 90R aufgebracht werden. Massgeblich sind die Verkehrsfälle 6 und 7 im Jahr 2015.

7.3 Empfehlung

Für die **Mittenabsaugung mit Mittelzentrale** ist die minimale Luftmenge ausschlaggebend. Wir empfehlen die Auslegung der Absaugung auf eine Luftmenge von mindestens 90 m³/s. Diese Luftmenge korrespondiert mit einer Luftströmung im Verkehrsraum von etwa 2.0 m/s und beinhaltet einen Sicherheitszuschlag für die Regelung der Mittenabsaugung. Zur Vermeidung von Portalabluft sowie für die Rauchabsaugung im Brandfall ist jeweils eine höhere Abluftmenge vorzusehen. Dies wird in den folgenden Abschnitten dieses Berichts untersucht. Wird der Tunnel mit einer **durchgehenden Längslüftung** mit Strahlventilatoren ausgestattet, genügt die Anordnung von reversiblen Strahlventilatoren, die zusammen zumindest den Schub von drei Strahlventilatoren des Typs 90R erreichen. Die technischen Daten der Ventilatoren, die für die Berechnung vorgegeben wurden, sind in Abschnitt 2.9 dieses Berichts angegeben.

8 Verminderung der Portalabluft

8.1 Verkehr

Für die Dimensionierung der Absaugung nehmen wir eine Verkehrsdichte von 1'760 Fahrzeugen pro Stunde und einen Lastwagenanteil von 10% an. Dies ergibt einen etwas höheren Schub der Fahrzeuge als mit dem mittleren Lastwagenanteil. Andererseits ist so ein kleiner Sicherheitszuschlag für die während des Tages wechselnde Zusammensetzung des Fahrzeugparks eingeschlossen. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt 60 km/h in beiden Richtungen. In der Berechnung wird die Richtungsaufteilung des Verkehrs variiert. Für die Bestimmung der Abluftmenge verwenden wir jedoch nur Richtungsaufteilungen bis 60% zu 40%. Damit sind im Stundenmittel die meisten Verkehrssituationen abgedeckt. Wenn im Ausnahmefall stärkere Asymmetrien auftreten können diese in begrenztem Umfang durch den Einsatz von Strahlventilatoren ausgeglichen werden.

8.2 Randbedingungen der Auslegung

Für die Bestimmung der Abluftmenge gehen wir zusätzlich zum Verkehr von den folgenden Randbedingungen aus:

- Die Absaugstelle befindet sich genau in Tunnelmitte.
- Kamineffekt entsprechend einer Temperaturdifferenz zwischen Tunnel und Umgebung von 5°C. Dies entspricht einem Gegendruck von 7.2 Pa.
- Zwischen den Tunnelportalen wirkt eine Druckdifferenz aufgrund meteorologischer Bedingungen oder Windlast von 6 Pa.

Beide Effekte wirken in der Berechnung in die gleiche Richtung, so dass sich eine resultierende Druckkraft von ± 13.2 Pa ergibt.

Bei einer Absaugung in Tunnelmitte und asymmetrischem Verkehr ergibt sich eine ungleichmässige Durchlüftung der beiden Tunnelhälften. Die Auslegung erfolgt so, dass im schwächer belüfteten Tunnelast eine Strömung mit 1.0 m/s in Richtung der Absaugstelle vorliegt. Mit dieser Mindestgeschwindigkeit ist bei kontinuierlichem Abluftbetrieb eine genügende Frischluftversorgung des Tunnels gewährleistet.

8.3 Abluftmenge

Die erforderliche Abluftmenge in Funktion der Richtungsaufteilung des Verkehrs ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Verkehrsanteil 0.0 heisst in dieser Darstellung, dass 1'760 Fahrzeuge stündlich nach Norden durch den Tunnel fahren, in der Gegenrichtung kommt kein Fahrzeug.

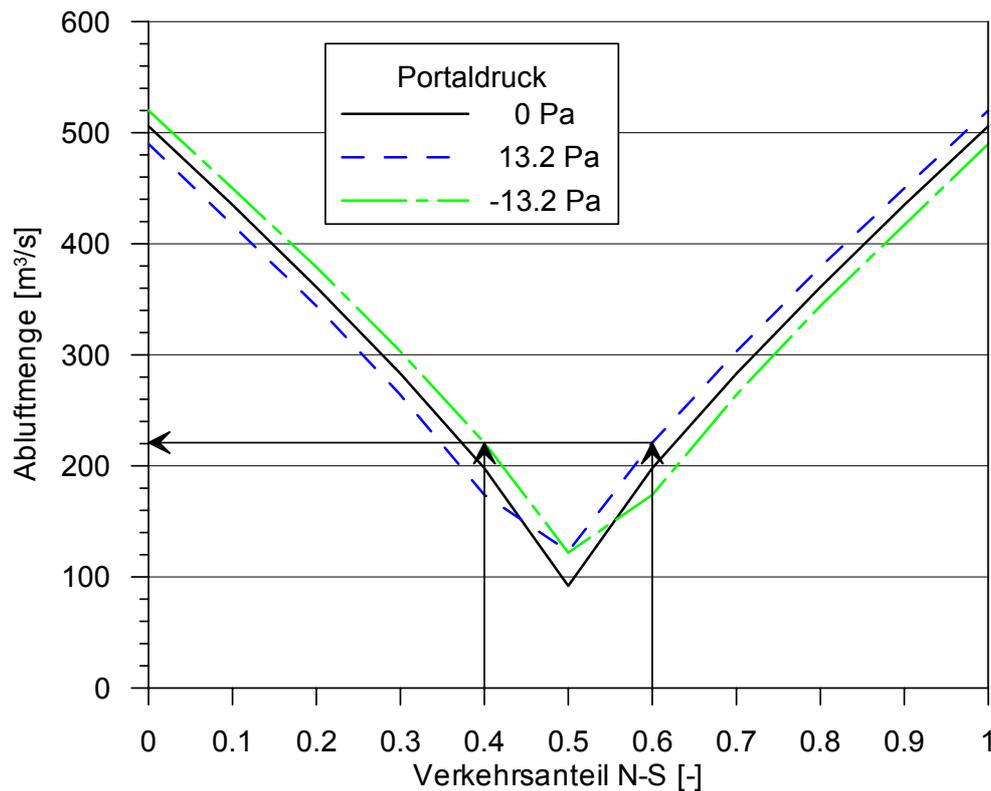


Abbildung 8.1: Erforderliche Abluftmenge als Funktion der Richtungs aufteilung des Verkehrs und der meteorologischen Druckverhältnisse. Die Ablesung ergibt die Absaugmenge $221 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Richtungs aufteilung 60% zu 40%

Bei einer Verkehrsbelastung von 1'760 Fahrzeugen pro Stunde mit der Richtungs aufteilung von 60% zu 40% soll ohne Unterstützung der Strahlventilatoren eine Belüftung des Tunnels von den Portalen zur Absaugzentrale hin möglich sein. Wir empfehlen daher für die **Kapazität der Absaugung** den Volumenstrom **$230 \text{ m}^3/\text{s}$** vorzusehen. Mit dieser Lüftungs kapazität lassen sich die meisten Verkehrsszenarien abdecken. Ein Ausgleich asymmetrischer Verkehrszustände mittels Strahlventilatoren ist zwar grundsätzlich möglich, erfordert jedoch eine höhere installierte Leistung. Im Ausnahmefall können Strahlventilatoren eingesetzt werden, um jederzeit eine Strömung von beiden Tunnelportalen zur Absaugstelle hin zu gewährleisten.

Bei einer symmetrischen Richtungs aufteilung des Verkehrs kann die Abluftmenge reduziert werden. Es erscheint somit sinnvoll, die Abluftventilatoren mit einer Drehzahlregelung für einen optimierten Betrieb der Absaugung mit Absaugleistungen zwischen etwa $100 \text{ m}^3/\text{s}$ und $230 \text{ m}^3/\text{s}$ auszurüsten.

9 Lüftung im Brandfall

Die Gefährdung der Tunnelbenutzer im Fall eines Brandereignisses geht vor allem von den Rauchgasen und von der Hitze des Brandes aus. Unter Sicherheit im Brandfall werden deshalb Fluchtmöglichkeiten sowie die Beherrschung der Rauchausbreitung und des Feuers verstanden. Dabei stehen die folgenden Ziele im Vordergrund:

- Rasche Evakuierung der Personen, die sich im Tunnel befinden (Hauptsächlich Selbstrettung, Einsatz von Rettungspersonal erfolgt in der Regel verzögert), in der ersten Phase nach Brandbeginn
- Erleichtern des Zugangs für die Feuerwehr zur Brandbekämpfung in einer zweiten Phase nach Brandbeginn.

9.1 Dimensionierungsbrand

Für die Beherrschung eines Brandes sind die Brandgrösse bzw. die Brandleistung, die entstehenden Temperaturen und die Ausbreitung der Rauchgase entscheidend. Als bestimmender Parameter wird in der Regel die Brandleistung angegeben. Während eines Fahrzeugbrandes im Tunnel müssen etwa die folgenden Brandleistungen erwartet werden:

Brandobjekt	Nominale Brandleistung
Kleiner Personenwagen	2 bis 5 MW
Grosser Personenwagen (Renault Espace)	5 MW
Lieferwagen	15 MW
Bus	20 MW
Lastwagen, beladen	20 bis 30 MW
Lastwagen mit gefährlichen Gütern	100 MW

Tabelle 9.1: Nominale Brandleistung verschiedener Brandobjekte

Die nominale Brandleistung wird meist nur über eine relativ kurze Zeitdauer (wenige Minuten) erreicht. Ein einzelner Pkw-Brand ist noch gut zu beherrschen. Ein Bus- oder Lkw-Brand oder ein Brand, in den mehrere Fahrzeuge verwickelt sind, stellt hingegen schon besondere Anforderungen sowohl an die Brandlüftung als auch an die Feuerwehr.

Der Auslegungsbrand nach der geltenden Richtlinie RABT-94 ist ein Brand eines Lastwagens mit einer Brandleistung von 20 MW. Bei der Neufassung der RABT, die derzeit von einer Arbeitsgruppe der Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen erarbeitet wird, wird die Leistung des Bemessungsbrandes auf 30 MW erhöht.

In der Diskussion befindet sich zusätzlich eine Abstufung nach dem Schwerverkehrsaufkommen im Tunnel, gemessen als Lastwagenkilometer pro Tunnelröhre und Tag [25]. Beim Tunnel Starnberg beträgt das Schwerverkehrsaufkommen 1'700 Lastwagenkilometer pro Tag. Damit liegt der Tunnel deutlich unterhalb der Grenze von 4'000 Lkw-km/Tag, ab der die Leistung des Auslegungsbrandes weiter erhöht werden soll.

9.2 Abluftmenge

Im Brandfall werden in der Umgebung des Brandortes in der Zwischendecke mehrere Klappen auf einer Länge von 300 m geöffnet. Die Klappen sind in Abständen von 50 bis 100 m anzuordnen. Durch die Klappen werden Luft und Rauchgase aus dem Fahrraum abgesogen, über den Deckenkanal zu den Absaugventilatoren geführt und ausgeblasen. Die Klappen sind einzeln steuerbar.

Es sind zwei parallele Absaugventilatoren vorgesehen. Dies bietet den Vorteil der Redundanz bei Ausfall eines Ventilators. Der Entwurf der Richtlinie RABT Ausgabe 2002 [25] verlangt für die Brandlüftung durch lokale Absaugung einen minimalen Abluftstrom am Brandort, der durch das Produkt aus der Strömungsgeschwindigkeit 3 m/s und dem Tunnelquerschnitt gebildet wird. Für den Tunnel Starnberg ergibt sich daraus ein minimaler Volumenstrom an der Absaugstelle von 138 m³/s bezogen auf die Umgebungsdichte der Luft. Zusätzlich soll die Lüftung so ausgelegt werden, dass sich bei Absaugung auf beiden Seiten des Brandabschnitts eine Strömungsgeschwindigkeit von zumindest 1.5 m/s zum Brand hin ergibt. In Abhängigkeit der Regelbarkeit der Strömungsgeschwindigkeit am Brandort kann somit eine grössere Luftmenge notwendig sein. Die Berechnung wird im nächsten Kapitel beschrieben.

9.3 Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit

Die Rauchausbreitung im Brandfall wird in erster Linie durch die Absaugung begrenzt. Zusätzlich ist im Tunnel Starnberg eine Unterstützung der Absaugung durch Strahlventilatoren vorgesehen.

Bei der minimalen Absaugmenge von 138 m³/s am Brandort ist eine Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit am Brandort notwendig, um eine effiziente Absaugung bei starken äusseren Kräften, z.B. durch den Kamineffekt oder durch eine meteorologische Druckdifferenz zwischen den Portalen, zu gewährleisten.

Strahlventilatoren werden im Tunnelabschnitt zwischen dem Ende der Zwischendecke und dem Tunnelportal angeordnet. In diesem Bereich ist im Normalprofil Platz vorhanden bzw. zu schaffen, um zwei Gruppen von Strahlventilatoren aufzunehmen. Angaben zur Positionierung der Ventilatoren sind in Abschnitt 10.2 angegeben.

Für die Auslegung der Strahlventilatoren für die Beschränkung der Strömung im Tunnel ist in der Richtlinie angegeben, dass von beiden Richtungen zum Brandort hin eine Strömungsgeschwindigkeit ≥ 1.5 m/s erreicht werden muss. Diese Randbedingung kann entweder durch eine Erhöhung der Absaugmenge oder durch den Einsatz von Strahlventilatoren erreicht werden. Für den kritischen Brandort am tiefsten Punkt des Tunnels ist diese Situation in Abbildung 9.1 dargestellt.

Das Diagramm zeigt, dass bei der vorgesehenen Luftmenge ein Schub von 2'631 N für die Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit aufgebracht werden muss (Temperaturdifferenz 5°C zwischen Tunnel und Umgebung, Winddruck auf das Nordportal 6 Pa). Dieser kann von fünf Strahlventilatoren vom Typ 90R mit einem Standschub von jeweils 640 N geleistet werden. Die technischen Daten der Strahlventilatoren, die für die Berechnung angenommen wurden, sind in Abschnitt 2.9 dieses Berichts angegeben. Bei einer Erhöhung der Absaugmenge auf

160 m³/s genügt ein Schub von 2'505 N. Dieser kann von vier Ventilatoren 90R aufgebracht werden. An den Ventilatoren ist zusätzlich die Undichtigkeit des Kanals zu berücksichtigen.

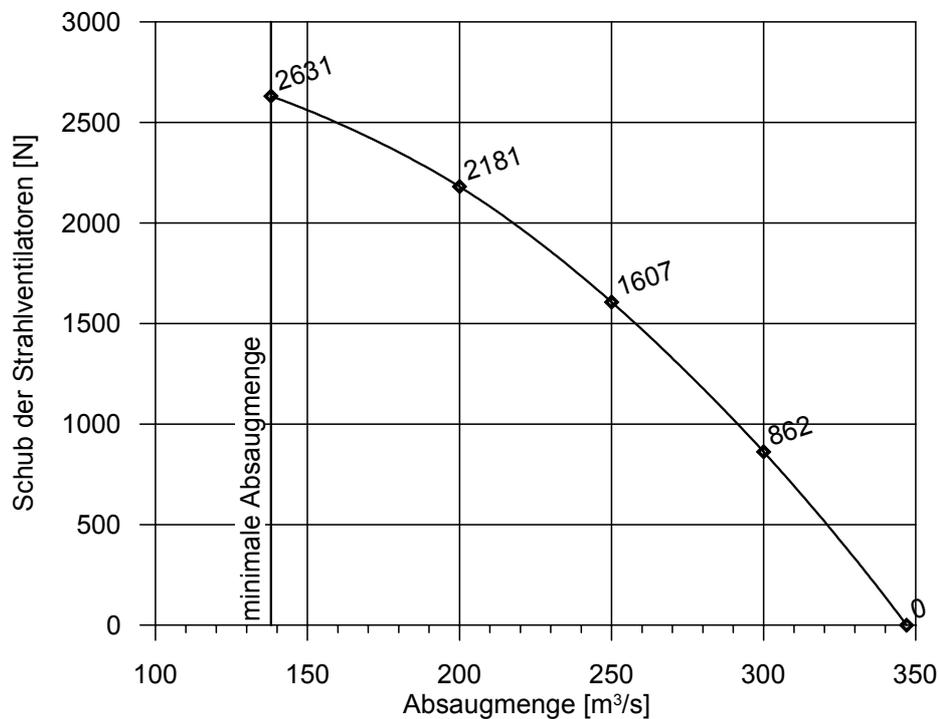


Abbildung 9.1: Auslegung der Brandlüftung für den Tunnel Starnberg, Brandort am tiefsten Punkt des Tunnels, 450 m vom Nordportal

Steht die Abluftmenge 221 m³/s der Mittenabsaugung (vgl. Abschnitt 8.3 dieses Berichts) für die Rauchabsaugung an jedem Abluftabschnitt zur Verfügung, genügt ein Schub der Strahlventilatoren von etwa 2'000 N. Wegen der Undichtigkeiten der Kanäle ist die Luftmenge im Brandabschnitt tatsächlich etwas geringer als die Kapazität der Mittenabsaugung.

Wir empfehlen eine Auslegung der Rauchabsaugung auf den **Volumenstrom 160 m³/s** am Brandort und die Installation von Strahlventilatoren mit dem Schub von **vier Strahlventilatoren Typ 90R** (Daten siehe Abschnitt 2.8).

10 Bauliche Randbedingungen

10.1 Abluftkanal

Der Abluftkanal muss einen genügenden Querschnitt für die geforderte Abluftmenge aufweisen. Dies ist mit dem vorgesehenen Querschnitt von 11 m^2 gegeben.

Der Abluftkanal muss begehbar sein, um eine einfache Wartung der ferngesteuerten einzeln zu betreibenden Abluftklappen zu ermöglichen. Mit einer freien Höhe von 1.70 m in der Mitte des Abluftkanals ist die Begehbarkeit knapp gewährleistet. Eine Höhe von 1.80 m bis 1.90 m ist vorzuziehen, wenn dies vom baulichen Aufwand her vertretbar erscheint.

In der Nähe der Tunnelportale ist die lokale Absaugung wenig wirksam, da hauptsächlich Aussenluft von der Absaugung erfasst wird. In der Richtlinie [25] ist angegeben, dass die erste Klappe in einer Entfernung von mehr als 200 m vom Tunnelportal anzuordnen ist. Im Abschnitt zwischen der ersten Klappe und dem Portal kann – je nach Lage der Lüftungszentrale – auf die Zwischendecke verzichtet werden. Der freie Raum im Tunnel kann für die Anordnung der Strahlventilatoren genutzt werden.

10.1.1 Variante 1: Mittenzentrale

Die Druckbelastung, die sich im Abluftkanal für die Variante mit Mittelzentrale ergibt, ist in Abbildung 10.1 dargestellt. Die grösste Belastung ergibt sich bei Absaugung vom Kanalende. Da die Anordnung in Tunnelmitte erfolgt, ist es unwesentlich, ob vom nördlichen oder südlichen Kanalende abgesogen wird. In der Abbildung sind zwei Varianten dargestellt. Zunächst ist das Beispiel mit einer Abluftmenge von $160 \text{ m}^3/\text{s}$ am Brandort dargestellt. In der Umgebung des Brandes werden vier Klappen geöffnet. Da in der Lüftungszentrale eine höhere Absaugkapazität zur Verfügung steht, ist zusätzlich die Situation mit der Abluftmenge $200 \text{ m}^3/\text{s}$ im Brandabschnitt dargestellt. In dieser zweiten Situation sind fünf Klappen geöffnet.

Bei der Kanallänge = 0 m in den Diagrammen ist eine grössere Leckmenge sichtbar. Da die Lüftungszentrale in der Mitte des Abluftkanals liegt, wird in der Berechnung die Undichtigkeit des zweiten Kanalabschnitts an einer Stelle zusammengefasst. Dies ist zulässig, da die Strömungsgeschwindigkeit in diesem Kanalabschnitt sehr klein ist.

Die tatsächliche Abluftmenge hängt zum einen vom Kennlinienfeld der Axialventilatoren, zum anderen von der Leistungsfähigkeit der Energieversorgung ab. Die detaillierte Dimensionierung ist Gegenstand der späteren Planungsphasen.

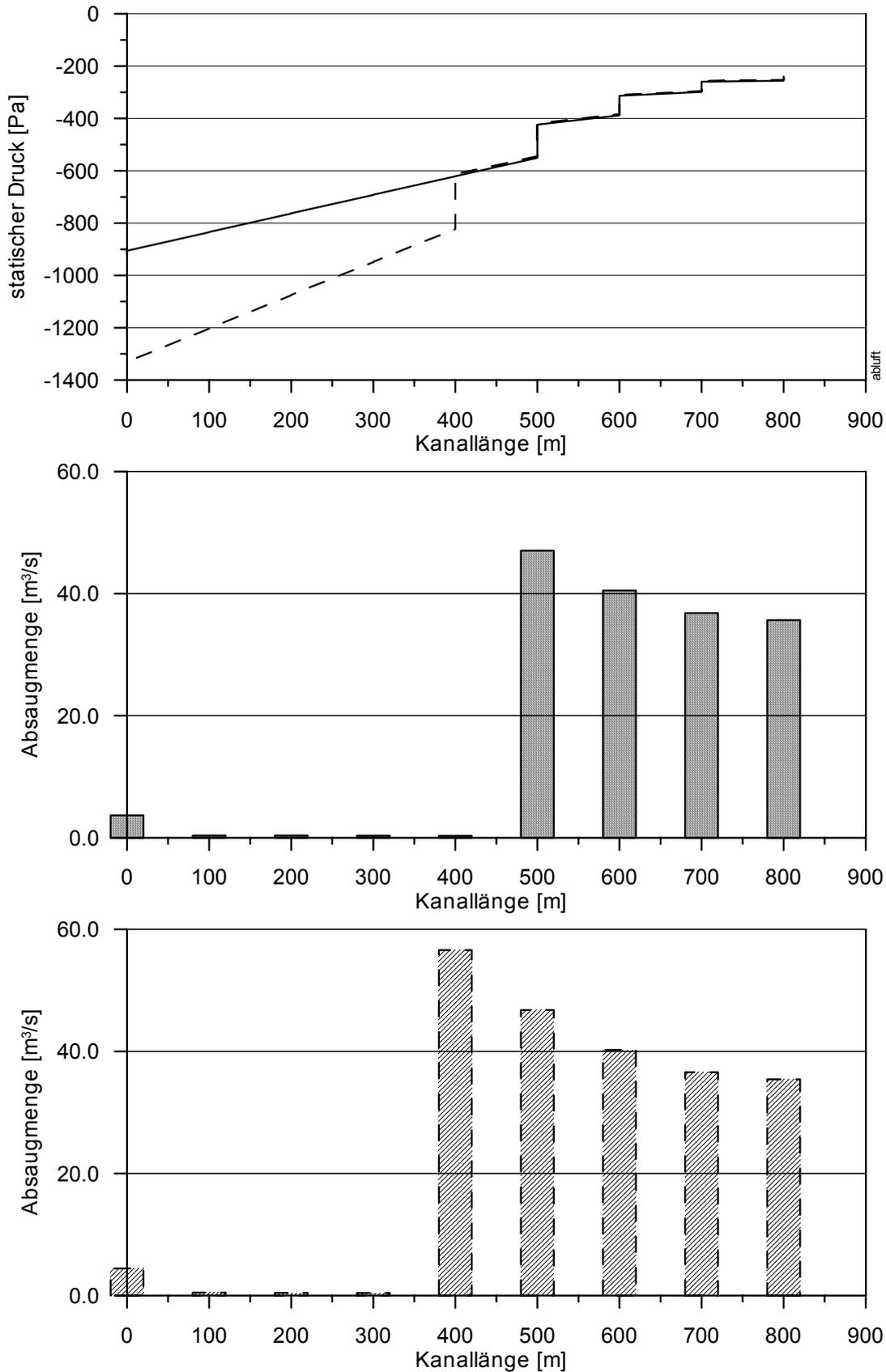


Abbildung 10.1: Druckverteilung im Abluftkanal (oben) und Verteilung der Abluftmenge 160 und 200 m³/s am Kanallende, mit Undichtigkeit der Klappen

10.1.2 Variante 2: Portalzentrale

Die Druckbelastung, die sich im Abluftkanal für die Variante mit Portalzentrale ergibt, ist in Abbildung 10.2 dargestellt. Die grösste Belastung ergibt sich bei Absaugung vom Kanalende. Das Diagramm zeigt die Druckverteilung für eine Abluftmenge von $160 \text{ m}^3/\text{s}$ am Brandort. In der Umgebung des Brandes werden vier Klappen geöffnet. Druckverteilung und Verteilung der Abluftmenge sind annähernd identisch mit dem Diagramm für die Absaugung von $160 \text{ m}^3/\text{s}$ über eine Mittelzentrale. Der gesteigerte Gesamtdruck ist lediglich auf die Verlängerung des Abluftkanals zurückzuführen.

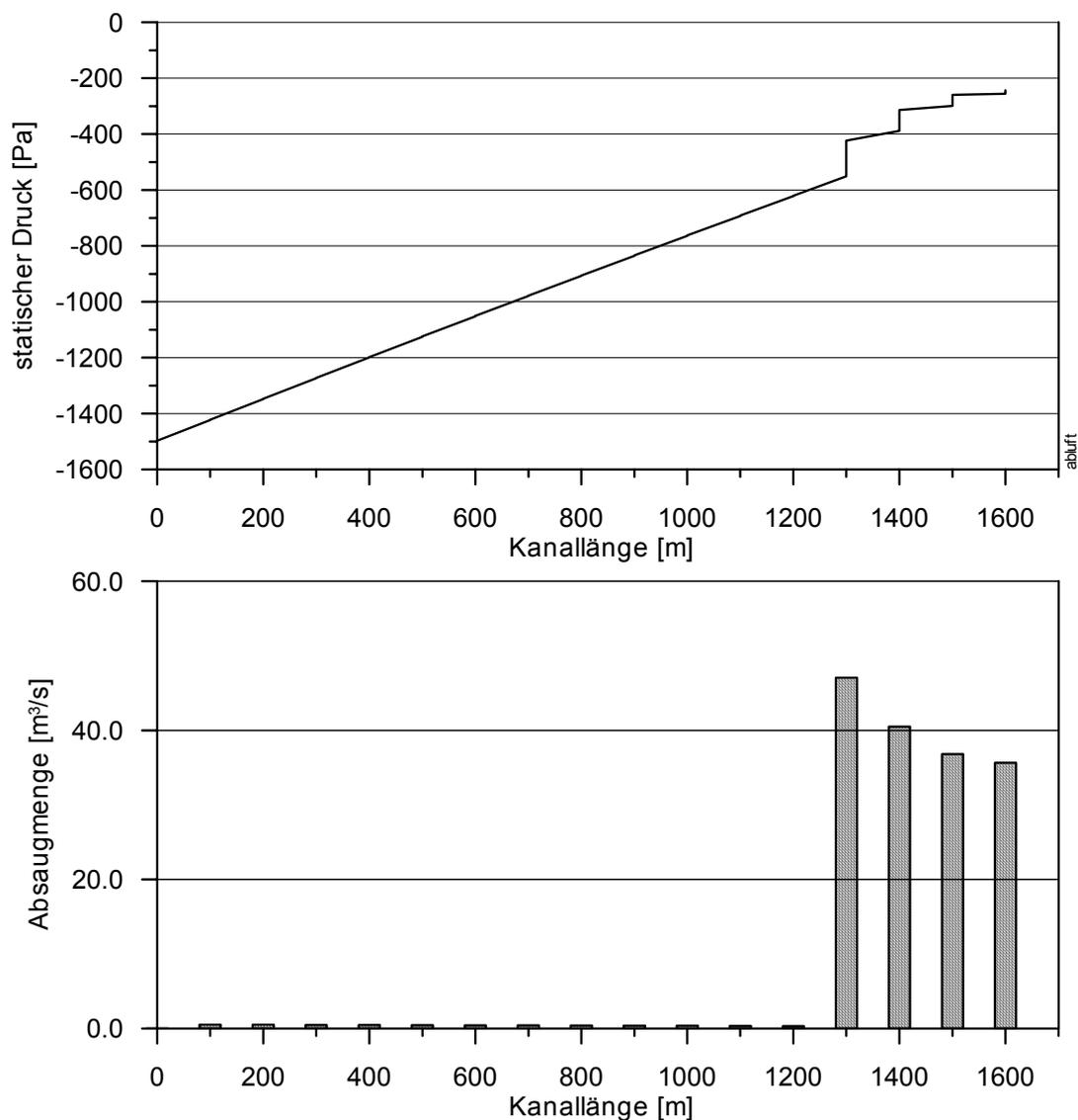


Abbildung 10.2: Druckverteilung im Abluftkanal (oben) und Verteilung der Abluftmenge $160 \text{ m}^3/\text{s}$ am Kanalende, mit Undichtigkeit der Klappen

10.2 Anordnung der Strahlventilatoren

Für die Anzahl Strahlventilatoren im Tunnel ist die Beeinflussung der Strömungsgeschwindigkeit im Brandfall massgebend. Wir gehen davon aus, dass zwei Gruppen mit jeweils zwei Strahlventilatoren mit Laufraddurchmesser 900 mm im Verkehrsraum angeordnet werden. Die äusseren Abmessungen der Strahlventilatoren sind in Tabelle 2.9 angegeben.

Wir empfehlen die Anordnung von zwei Ventilatorgruppen in der Nähe der Tunnelportale im bergmännischen Tunnelabschnitt ohne Zwischendecke. Bei der Anordnung der Strahlventilatoren sind die folgenden Mindestabstände einzuhalten:

- Zum nächsten Portal 100 m
- Zu einer plötzlichen Verengung des Querschnitts 80 m
- Zur nächsten Ventilatorgruppe 100 m
- Abstand zwischen Gehäuse und Tunneldecke 300 mm
- Abstand zwischen Gehäuse und Verkehrsraum 300 mm
- Zwischen zwei Ventilatoren 900 mm

Abbildung 10.3 zeigt die Anordnung von zwei Strahlventilatoren im bergmännischen Tunnelprofil. Abstände von jeweils 30 cm vom Tunnelgewölbe und vom Lichtraumprofil können mit eingehalten werden, sofern der Aussendurchmesser der Ventilatoren 1400 mm nicht überschreitet.

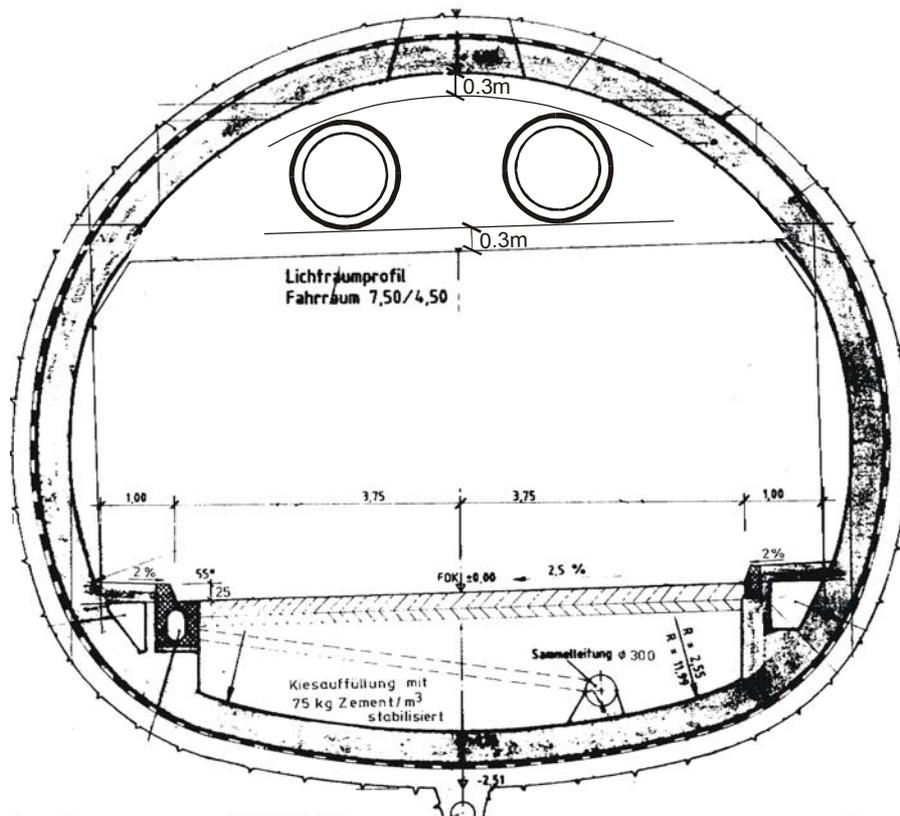


Abbildung 10.3: Anordnung der Strahlventilatoren im bergmännischen Tunnelprofil (Ventilatoren mit Aussendurchmesser 1400 mm)

Falls eine Ventilatorgruppe in einem Tunnelabschnitt angeordnet werden muss, der im Tagbau erstellt wird, sind die Ventilatoren in einer Nische unter der Tunneldecke anzuordnen. Die Skizze der Ventilatornische in Abbildung 10.4 verdeutlicht die wesentlichen Abmessungen.

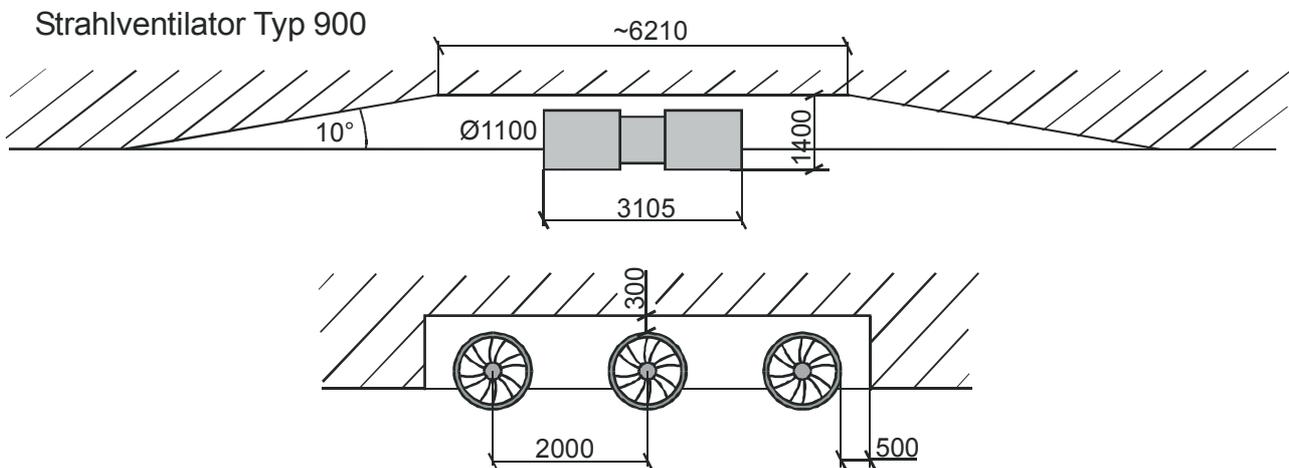


Abbildung 10.4: Anordnung der Strahlventilatoren in einer Ventilatornische (Beispiel mit drei Ventilatoren mit Laufraddurchmesser 900 mm in einer Gruppe, Skizze nicht maßstäblich)

10.3 Lüftungszentrale

10.3.1 Mittelzentrale

Zugunsten der Betriebssicherheit bei Rauchabsaugung sind zwei Ventilatoren vorzusehen. Wir empfehlen, die Mittelzentrale mit zwei Ventilatoren mit einem Laufraddurchmesser von 2.24 m und einer Fördermenge von jeweils $115 \text{ m}^3/\text{s}$ weiterzuführen.

Für die baulichen Belange bildet der Laufraddurchmesser D_a die Grundgröße der Dimensionierung. Tabelle 10.1 gibt den Platzbedarf der Ventilatoren mit Schalldämpfern in der Lüftungszentrale an. Ausgehend von diesen Grunddimensionen lässt sich die Luftführung in der Lüftungszentrale planen.

V [m^3/s]	D_a [m]	D_0 [m]	L [m]	H [m]	B [m]	F_K [m^2]
2 * 115	2.24	2.60	8.0	5.5	9.0	12.7

- V: Volumenstrom
 D_a : Durchmesser eines Ventilatorlaufrades
 D_0 : Aussendurchmesser eines Ventilators
L: Länge eines Ventilators mit Übergangsstück
H: Mindesthöhe des Betriebsraumes mit Krananlage
B: Mindestbreite des Betriebsraumes bei zwei Ventilatoren ohne Abstellfläche für Reparaturarbeiten
 F_K : Kaminquerschnitt (Auslegung auf 18 m/s , s. Abschnitt 6.3)

Tabelle 10.1: Angaben zum Raumbedarf der Ventilatoren in der Mittelzentrale

Die Skizze einer möglichen Anordnung der Axialventilatoren in der Lüftungszentrale ist in den Abbildungen in Anhang H gegeben. In der Skizze wird angenommen, dass die Ventilato-

ren von unten in die Lüftungszentrale eingebracht werden. Die Montageöffnungen befinden sich direkt unter den Ventilatoren, wodurch die benötigte Fläche im Ventilatorraum minimiert ist. Da die Lüftungszentrale im rechten Winkel zur Tunnelachse liegt, befinden sich die Montageöffnungen nicht über der Fahrbahn, sondern in einem seitlichen Stollen. Damit ist die Lüftungszentrale bei einem Brand nicht unmittelbar durch hohe Temperaturen gefährdet.

Der Aussendurchmesser der Ventilatoren wird mit 2.60 m angenommen. Wird der Platz der Ventilatoren mit diesem Durchmesser bestimmt, steht genügend Raum für die Befestigung von Diffusor und Einlauftrichter zur Verfügung.

Die Schalldämpfer werden als Kulissenschalldämpfer ausgeführt. Der Durchgang von der Zentrale in den Abluftkanal kann durch eine bewegliche Kulisse im Schalldämpfer erfolgen. Die Kulisse kann entfernt werden, womit der Durchgang frei wird. Einfacher ist der Durchgang, wenn der Schalldämpfer in einem seitlichen Gang umgangen werden kann. Gerade die Wartung der Klappen macht eine regelmässige Begehung des Abluftkanals notwendig.

Die Diffusoren können nicht als Einzelteile durch die Montageöffnung in den Ventilatorraum gebracht werden. Eine Aufteilung der Diffusoren in zwei Ringelemente ist unproblematisch.

Der Abluftschacht führt über eine Höhe von etwa 90 m an die Oberfläche, wo die Abluft durch einen Kamin ausgeblasen wird. Bei Baumbestand in der Nähe des Kamins soll der Kamin mindestens 2 m über die Baumwipfel hinausragen. Bei Gebäuden in der Umgebung des Kamins sollte die Kaminhöhe die Traufhöhe der Gebäude um 2 m übersteigen. Die Kaminhöhe soll eine genügende Verdünnung der mit Schadstoffen belasteten Tunnelabluft gewährleisten.

10.3.2 Portalzentrale

Zugunsten der Betriebssicherheit bei Rauchabsaugung sind auch bei der Portalzentrale zwei Ventilatoren vorzusehen. Wir empfehlen, die Portalzentrale mit zwei Ventilatoren mit einem Laufraddurchmesser von 2.00 m und einer Fördermenge von jeweils 85 m³/s weiterzuführen. Für die baulichen Belange bildet wiederum der Laufraddurchmesser D_a die Grundgrösse der Dimensionierung. Tabelle 10.1 gibt den Platzbedarf der Ventilatoren mit Schalldämpfern in der Lüftungszentrale an.

V [m ³ /s]	D_a [m]	D_0 [m]	L [m]	H [m]	B [m]	F_K [m ²]
2 * 85	2.00	2.30	7.0	5.0	8.0	10.5

- V: Volumenstrom
 D_a : Durchmesser eines Ventilatorlaufrades
 D_0 : Aussendurchmesser eines Ventilators
L: Länge eines Ventilators mit Übergangsstück
H: Mindesthöhe des Betriebsraumes mit Krananlage
B: Mindestbreite des Betriebsraumes bei zwei Ventilatoren ohne Abstellfläche für Reparaturarbeiten
 F_K : Kaminquerschnitt

Tabelle 10.2: Angaben zum Raumbedarf der Ventilatoren in der Portalzentrale

Die Skizze einer möglichen Anordnung der Axialventilatoren in der Lüftungszentrale ist in den Abbildungen in Anhang B gegeben. Die Lüftungszentrale wird im Tagbau erstellt. In der

Skizze ist angenommen, dass sie sich direkt über dem Tunnel befindet. Die Montageluke kann von einer Haltebucht aus dem Tunnel genutzt werden.

Da die Rauchabsaugung nur im Brandfall und kurzzeitig zu Testzwecken betrieben wird, gehen wir davon aus, dass auf Schalldämpfer verzichtet werden kann. Dies ist vom Lärmgutachter gegebenenfalls noch zu prüfen. Ein Verzicht auf die Schalldämpfer ermöglicht eine deutliche Verkürzung des Bauwerks und eine entsprechende Verminderung der Investitionskosten.

10.4 Leistungsbedarf der Abluftventilatoren

Für die Berechnung des gesamten Druckverlustes und der Leistung der Ventilatoren sind die Druckverluste beim Durchströmen der Lüftungszentrale zu bestimmen. Grundlage der Schätzung des Druckverlusts sind die Skizzen der Anordnung in Anhang B. Für die Mittelzentrale ergibt sich bei Absaugung von $230 \text{ m}^3/\text{s}$ ein Druckabfall in der Zentrale und im Abluftschacht von etwa $1'100 \text{ Pa}$.

Bei Absaugung von $165 \text{ m}^3/\text{s}$ am Ventilator ist Fehlluft durch Undichtigkeit des Abluftkanals enthalten, so dass die Absaugung von $160 \text{ m}^3/\text{s}$ am Brandort erreicht wird. Bei Absaugung von $165 \text{ m}^3/\text{s}$ sinkt der Druckverlust der Mittelzentrale auf etwa 500 Pa . Bei der Portalzentrale gehen wir bei Absaugung von $165 \text{ m}^3/\text{s}$ von 600 Pa Druckverlust aus. Hinzu kommen die Druckverluste in den Abluftklappen und im Abluftkanal. Wir gehen für Ventilator und Antrieb von einem Gesamtwirkungsgrad von 0.7 aus.

Die Gesamtdruckverluste sowie der Bedarf an elektrischer Leistung für drei Betriebssituationen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Betriebsfall	Volumenstrom	Druckdifferenz (Kanal + Zentrale)	El. Leistung
Mittenabsaugung $230 \text{ m}^3/\text{s}$	$230 \text{ m}^3/\text{s}$	$500 \text{ Pa} + 1100 \text{ Pa}$	530 kW
Brandabluf $165 \text{ m}^3/\text{s}$ Mittelzentrale	$165 \text{ m}^3/\text{s}$	$900 \text{ Pa} + 500 \text{ Pa}$	330 kW
Brandabluf $230 \text{ m}^3/\text{s}$ Mittelzentrale	$230 \text{ m}^3/\text{s}$	$1400 \text{ Pa} + 1100 \text{ Pa}$	830 kW
Brandabluf $165 \text{ m}^3/\text{s}$ Portalzentrale	$165 \text{ m}^3/\text{s}$	$1500 \text{ Pa} + 600 \text{ Pa}$	500 kW

Tabelle 10.3: Angaben zum Leistungsbedarf der Axialventilatoren

Für die Mittelzentrale empfehlen wir eine Auslegung der Energieversorgung der Abluftventilatoren auf 530 kW . Mit dieser Leistung kann eine Absaugmenge im Brandfall von etwa $190 \text{ m}^3/\text{s}$ erreicht werden. Der tatsächliche Betriebspunkt der Rauchabsaugung kann erst nach der Auswahl der Ventilatoren bestimmt werden. Die Abluftmenge im Brandfall soll mindestens $165 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen (etwa $160 \text{ m}^3/\text{s}$ am Brandort), eine grössere Menge ist anzustreben. Für die Portalzentrale genügt eine Auslegung der Energieversorgung der Abluftventilatoren auf 500 kW .

Da das Hochfahren der Ventilatoren im Brandfall möglichst schnell erfolgen muss, sollte eine Leistungsreserve für den Anfahrvorgang zur Verfügung stehen.

Da die Strahlventilatoren auch im Brandfall zur Unterstützung der Absaugung eingesetzt werden, ist davon auszugehen, dass der maximale Leistungsbedarf der Axialventilatoren und der Leistungsbedarf aller Strahlventilatoren gleichzeitig aufzubringen ist. Mit der Leistung der

Axialventilatoren und vier Strahlventilatoren à 22 kW ergibt sich die Gesamtleistung mit 618 kW (Mittelzentrale) bzw. 588 kW (Portalzentrale).

10.5 Nachrüstung

Als Variante zur sofortigen vollständigen Ausrüstung der Mittelzentrale besteht die Möglichkeit einer Teilausstattung als reine Brandlüftung mit der Möglichkeit einer Nachrüstung der Mittenabsaugung zur Vermeidung der Portalabluft. Für die Beurteilung gehen wir von der vollständigen Ausrüstung aus und ermitteln mögliche Einsparungen. Die baulichen Randbedingungen für die vollständige Ausstattung sollten bereits geschaffen sein, damit die Nachrüstung möglichst ohne Unterbrechung des Verkehrs erfolgen kann.

- Die Brandlüftung ist nur im Ausnahmefall und zu Testzwecken in Betrieb. Die Schalldämpfer können damit zunächst eingespart werden. Es ergibt sich ein Einsparpotential von € 100'000.-. Die Einsparung erfolgt unter Vorbehalt der Beurteilung der Lärmsituation.
- Für die Mittenabsaugung sind zumindest zwei zusätzliche Rauchabsaugklappen in der Zwischendecke erforderlich. Diese können eventuell nachbestellt werden. Es ergibt sich ein Einsparpotential von bis zu € 22'000.- zuzüglich Verkabelung. Die Nachrüstung ist jedoch relativ aufwendig. Die Aussparungen in der Zwischendecke müssten vorbereitet werden.
- Eine Auslegung der Abluftventilatoren auf zunächst nur 165 m³/s und der Energieversorgung auf 300 kW hätte den kompletten Austausch bei der nachträglichen Ausstattung für 230 m³/s und 530 kW zur Folge. Die Mehrkosten von € 600'000.- stehen in keinem günstigen Verhältnis zur möglichen Einsparung von etwa € 100'000.- (jeweils nur Ventilatoren ohne Energieversorgung).

Die Möglichkeiten für Einsparungen bei den Investitionskosten durch eine Teil-Ausstattung der Mittelzentrale sind begrenzt. Wenn aufgrund der Immissionsprognose nicht definitiv entschieden werden kann, ob die Portalabluft frei ausgeblasen werden kann, empfehlen wir daher eine Auslegung der Mittelzentrale für die Vermeidung von Portalabluft, wie in Abschnitt 8 angegeben. Es sollte geprüft werden, ob auf Schalldämpfer in der Mittelzentrale verzichtet werden kann.

11 Kostenschätzung

11.1 Investitionskosten

In der folgenden Tabelle sind die Investitionskosten für die Tunnellüftung zusammengestellt. Preisbasis ist Dezember 2001. Die Mehrwertsteuer ist in den angegebenen Preisen eingeschlossen.

Die Kostenschätzung umfasst die elektromechanischen Einrichtungen der Lüftungsanlage ohne Energieversorgung, Verkabelung und Schaltschränke. Hinzu kommen einige Nebenanlagen der Lüftungszentrale.

Element	Anzahl	Preis	Gesamt
Strahlventilatoren 90R	4	€ 15'000.-	€ 60'000.-
Verkabelung, Schaltschränke	4	€ 15'000.-	€ 60'000.-
Abluftventilatoren	2	€ 350'000.-	€ 700'000.-
Frequenzumformer	2	€ 40'000.-	€ 80'000.-
Montagedeckel	2	€ 20'000.-	€ 40'000.-
Schalldämpfer	2	€ 50'000.-	€ 100'000.-
Rauchabsaugklappen	18	€ 11'000.-	€ 198'000.-
Verkabelung	18	€ 11'000.-	€ 198'000.-
Strömungsmessungen	4	€ 10'000.-	€ 40'000.-
CO- und Sichttrübungsmessung	4	€ 13'000.-	€ 52'000.-
Krananlage	1	€ 35'000.-	€ 35'000.-
Gesamtsumme			€ 1'563'000.-

Tabelle 11.1: Kostenschätzung IK_0 für Lüftungseinrichtungen (Mittelzentrale)

Element	Anzahl	Preis	Gesamt
Strahlventilatoren 90R	4	€ 15'000.-	€ 60'000.-
Verkabelung, Schaltschränke	4	€ 15'000.-	€ 60'000.-
Abluftventilatoren	2	€ 300'000.-	€ 600'000.-
Montagedeckel	1	€ 20'000.-	€ 20'000.-
Rauchabsaugklappen	16	€ 11'000.-	€ 176'000.-
Verkabelung	16	€ 11'000.-	€ 176'000.-
Strömungsmessungen	4	€ 10'000.-	€ 40'000.-
CO- und Sichttrübungsmessung	3	€ 13'000.-	€ 39'000.-
Krananlage	1	€ 35'000.-	€ 35'000.-
Gesamtsumme			€ 1'206'000.-

Tabelle 11.2: Kostenschätzung IK_0 für Lüftungseinrichtungen (Portalzentrale)

Die Ventilatoren der Portalzentrale werden nur im Brandfall und kurzzeitig zu Testzwecken betrieben. Wir gehen davon aus, dass auf die Anordnung von Schalldämpfern verzichtet werden kann. Dies ist vom Lärmgutachter zu prüfen.

In Tunneln unterhalb 800 m Meereshöhe kann nach dem Entwurf der neuen RABT [25] auf die CO-Messung verzichtet werden. Wir empfehlen dennoch, zumindest Vorkehrungen für die Nachrüstung der Messung eines weiteren Schadstoffes zusätzlich zur Sichttrübung vorzusehen.

11.2 Betriebskosten

11.2.1 Mit Vermeidung von Portalabluft

Zur Abschätzung der Energiekosten für den Lüftungsbetrieb gehen wir davon aus, dass die Mittenabsaugung zur Verminderung von Portalimmissionen mit maximaler Leistung während 12 Stunden pro Tag und an 365 Tagen im Jahr in Betrieb ist. Der tatsächliche Bedarf für die Mittenabsaugung richtet sich nach der Belastung in der Umgebung der Tunnelportale. Die Strahlventilatoren werden nur kurzzeitig zu Testzwecken betrieben. Ausgehend von einem Energiepreis von € 0,13/kWh ergeben sich die jährlichen Energiekosten der Lüftung mit

$$365 \times 12 \text{ h} \times 530 \text{ kW} = \underline{2'321'400 \text{ kWh}}$$

$$\text{Energiekosten/Jahr } \text{€ } 0,13/\text{kWh} \times 2'321'400 \text{ kWh} = \text{€ } 301'782.-$$

Bei reduziertem Betrieb der Mittenabsaugung aufgrund verminderter Schadstoffbelastung in den Portalzonen vermindern sich die Energiekosten. Sie sind proportional zur tatsächlichen Betriebsdauer.

Für die laufenden Kosten von Bedeutung ist auch der Aufwand für den Unterhalt der Messgeräte, Ventilatoren und Klappen. Die jährlichen Unterhaltskosten werden mit 3% der Investitionskosten abgeschätzt. Daraus ergeben sich jährliche Unterhaltskosten von € 46'890.-

11.2.2 Mit freier Portalabluft

Zur Abschätzung der Energiekosten für den Lüftungsbetrieb gehen wir davon aus, dass während 3 Stunden pro Tag und an 300 Tagen im Jahr zwei Strahlventilatoren in Betrieb sind. Die Strahlventilatoren werden während acht Stunden jährlich zu Testzwecken betrieben. Ausgehend von einem Energiepreis von € 0,13/kWh ergeben sich die jährlichen Energiekosten der Lüftung mit

$$\begin{array}{r} 300 \times 3 \text{ h} \times 2 \times 44 \text{ kW} = 39'600 \text{ kWh} \\ 8 \text{ h} \times 500 \text{ kW} = \underline{4'000 \text{ kWh}} \\ \text{Gesamt} \qquad \qquad \qquad 43'600 \text{ kWh} \end{array}$$

$$\text{Energiekosten/Jahr } \text{€ } 0,13/\text{kWh} \times 43'600 \text{ kWh} = \text{€ } 5'668.-$$

Für die laufenden Kosten von Bedeutung ist auch der Aufwand für den Unterhalt der Messgeräte, Ventilatoren und Klappen. Die jährlichen Unterhaltskosten werden mit 3% der Investitionskosten abgeschätzt. Daraus ergeben sich jährliche Unterhaltskosten von € 36'180.-

12 Zusammenfassung und Empfehlung

Zur Auswahl des Lüftungskonzeptes für den Entlastungstunnel Starnberg stehen grundsätzlich zwei Systeme: Die durchgehende Längslüftung mit Strahlventilatoren und die Längslüftung mit Absaugung in Tunnelmitte. Grundsätzlich unterscheiden sich die Systeme indem bei der Mittenabsaugung die Möglichkeit besteht, den Austritt von Tunnelabluft aus den Portalen zu minimieren.

Beide Lüftungskonzepte beinhalten eine lokale Rauchabsaugung im Brandfall. Die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel wird durch den Einsatz von Strahlventilatoren kontrolliert. Im vorliegenden Bericht wurden beide Systeme untersucht. Im folgenden werden die grundlegenden Eigenschaften der Lüftungssysteme zusammengestellt.

12.1 Durchgehende Längslüftung

Die Abluftmenge der Rauchabsaugung wird auf $165 \text{ m}^3/\text{s}$ an den zwei parallel angeordneten Abluftventilatoren festgelegt. Aus der Dimensionierung der Längslüftung ergibt sich, dass vier Strahlventilatoren mit Laufraddurchmesser 900 mm für die Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit bei einem 30 MW-Brand notwendig sind. Zwei Ventilatorgruppen können in der Nähe des Nordportals im bergmännischen Tunnelprofil angeordnet werden. Die Strahlventilatoren haben eine Nennleistung von jeweils 22 kW. Mit den vier Strahlventilatoren lassen sich auch die Anforderungen an die Luftqualität im Normalbetrieb erfüllen. Eine schematische Darstellung des Lüftungskonzeptes ist in Abbildung 12.1 gegeben.

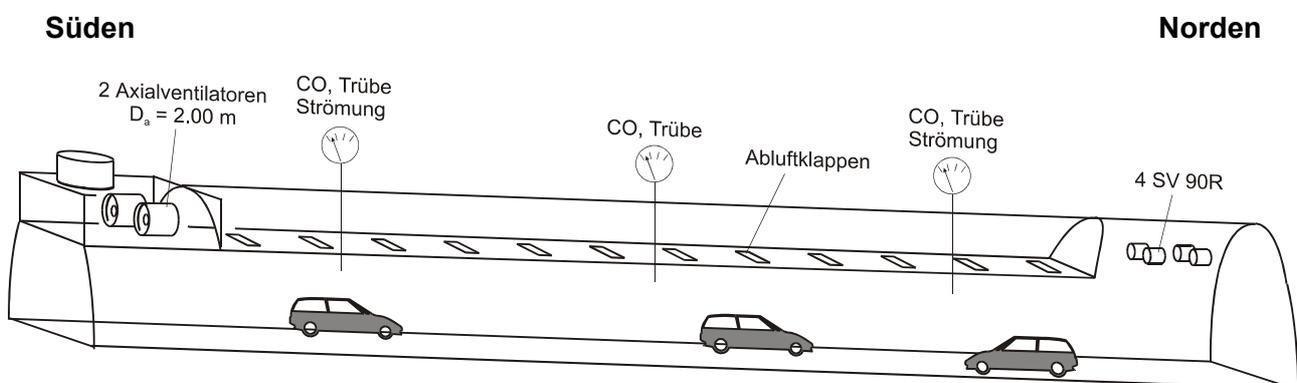


Abbildung 12.1: Schematische Darstellung des Lüftungskonzeptes mit durchgehender Längslüftung für den Tunnel Starnberg

12.2 Mittenabsaugung

Die Abluftmenge wird durch den Betrieb der Mittenabsaugung bestimmt. Sie wird auf $230 \text{ m}^3/\text{s}$ an den zwei parallel angeordneten Abluftventilatoren festgelegt. Im Brandfall müssen die Ventilatoren mit $165 \text{ m}^3/\text{s}$ einen geringeren Volumenstrom fördern. Man wird jedoch versuchen, bei einem Tunnelbrand eine höhere Lüftungsleistung zu erreichen. Aus der Dimensionierung der Längslüftung ergibt sich, dass vier reversible Strahlventilatoren mit Laufraddurchmesser 900 mm für die Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit notwendig sind. Zwei Ventilatorgruppen können voraussichtlich im bergmännischen Tunnelprofil ohne Zwi-

schendecke in der Nähe des Nordportals angeordnet werden. Die Strahlventilatoren haben eine Nennleistung von jeweils 22 kW. Eine schematische Darstellung des Lüftungskonzepts ist in Abbildung 12.2 gegeben.

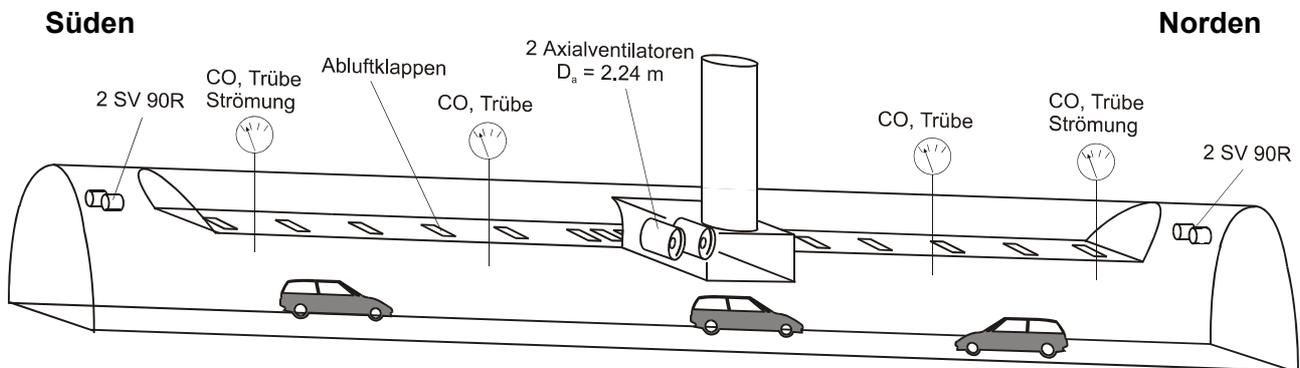


Abbildung 12.2: Schematische Darstellung des Lüftungskonzept Mittenabsaugung für den Tunnel Starnberg

12.3 Empfehlung

Für die Beurteilung, ob eine Absaugung der Portalabluft empfehlenswert ist, sind die Ergebnisse der Immissionsberechnungen zu betrachten. Zusätzlich gehen die Abschätzungen des Energieaufwandes und der Kosten für die Einrichtung und den Betrieb einer solchen Anlage in die Beurteilung ein.

Der Entlastungstunnel Starnberg bringt eine Entlastung vom Oberflächenverkehr auf Kosten von Mehrbelastungen an den Portalen. Der Einflussbereich der Portalabluft liegt zwar zum grössten Teil im unmittelbaren Strassenbereich. Die Immissionsprognose zeigt jedoch, dass die Schadstoffkonzentrationen an einigen Punkten auch an der Bebauung sehr nahe am Beurteilungswert liegen. Im Hinblick auf die Genauigkeit einer Prognose (siehe Abschnitte 3.2 und 4.2) wird daher aus Sicht der Lufthygiene die Ausführung der Variante

Längslüftung mit Absaugung in Tunnelmitte

empfohlen, wie sie in Abbildung 12.2 skizziert ist. Die Betriebsdauer der Absaugung für den Immissionsschutz sollte jedoch nicht bereits im Genehmigungsverfahren festgelegt werden. Hingegen sollte der Betrieb der Lüftung aufgrund von Immissionsmessungen in der Umgebung der Tunnelportale angepasst werden. Es ist damit zu rechnen, dass die Betriebsdauer in den Jahren nach Tunneleröffnung entsprechend der Emissionsminderung der Fahrzeuge reduziert werden kann.

13 Literatur

- [1] A. Haerter, P. Martos, F. Zumsteg, P. Kündig: B2 München-Weilheim, Entlastungstunnel Starnberg, Tunnellüftungs- und Immissionsgutachten Stand 1996, Bericht HBI 89-201-04, Oktober 1996
- [2] I. Riess, P. Martos: B2 Entlastungstunnel Starnberg, Vorgutachten zur Tunnellüftung, Bericht HBI 89-201-05, Februar 2001
- [3] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Merkblatt über Luftverunreinigungen an Strassen, Teil: Strassen ohne oder mit lockerer Randbebauung, Ausgabe 1992, geänderte Fassung 1996
- [4] R. Beier: Berechnung zu erwartender Luftqualitätsparameter bei bekannter Vor- und Zusatzbelastung, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 59 Nr. 4, April 1999
- [5] NABEL: Luftbelastung 2000, Schriftenreihe Umwelt Nr. 330, Bern, 2001
- [6] M. Karrer, Ch. Monn: Chemische Analyse atembare Staubpartikel (PM10) und Quellenidentifikation, Schlussbericht COST 615 CITAIR, 1998
- [7] Umweltbundesamt: Elektronisches Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA V1.2, 1999
- [8] Umweltbundesamt, Statistisches Bundesamt: Umweltdaten Deutschland: 1996, 1998
- [9] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Lufthygienischer Jahresbericht 2000, Kurzfassung, September 2001
- [10] I. Düring, A. Lohmeyer: Validierung von PM10-Immissionsberechnungen im Nahbereich von Strassen und Quantifizierung der Feinstaubbildung von Strassen, Karlsruhe und Dresden, Juni 2001
- [11] W. Petersen: HIWAY-2 (A HIWAY Air Pollution Model), United States Environmental Protection Agency, Bericht PB 80 227 556, 1980
- [12] I. Yoshizawa et al.: Atmospheric Dispersion Characteristics of Polluted Air from the Portal of an Urban Road Tunnel, bHr Symposium Liverpool, 1994
- [13] M. Vanderheyde et al.: Physical Modelling of Dispersion of a Tunnel Portal Exhaust Plume, bHr Symposium Liverpool, 1994
- [14] F. Zumsteg, A. Haerter: Messungen am Gubrist Nordportal und Modellierung von Portalabluftquellen für Stickoxid-Immissionsberechnungen, SHB 89-103-01, August 1990
- [15] F. Zumsteg, E. Graf: Bestimmung von Emissionen und Immissionen in Portalzonen (Messkampagne Baregg 1992), HBI 92-104-3, August 1993
- [16] F. Zumsteg: Mittlerer Ring München, Petuelring Tunnel, Auswertung der Windkanalmessungen im Bereich Ostportal, HBI 96-212, Mai 1997
- [17] F. Zumsteg: Immissionsprognosen in der Umgebung von Tunnelportalen, Vortrag Arbeitsgruppe Cercl'Air, HBI 97-I-02, November 1997
- [18] E. Romberg et al., NO-NO₂-Umwendlungsmodell für die Anwendung bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase, Reinhaltung der Luft, 215-218, 1996
- [19] J. Eichhorn: MISKAM – Handbuch zur DOS Version, Oktober 1988
- [20] R. Röckle, C.J. Richter: Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen. Modellrechnungen. Forschungszentrum Karlsruhe, PEF-Projekt "Europäisches Forschungszentrum für Massnahmen zur Luftreinhaltung" Forschungsbericht FZKA-PEF 136. Oktober 1995

- [21] G. Schädler, W. Bächlin, A. Lohmeyer, Tr. Van Wees: Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle. Forschungszentrum Karlsruhe, PEF-Projekt "Europäisches Forschungszentrum für Massnahmen zur Luftreinhaltung" Forschungsbericht FZKA-PEF 138, Januar 1996
- [22] SFI GmbH: WinMISKAM – MISKAM für Windows – Handbuch, Januar 1999
- [23] K. Bigalke: Zur statistischen Auswertung mikroskaliger Immissionsprognosen. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, Bd. 58 Nr. 6, Juni 1998
- [24] I. Riess: Überprüfung der Bemessungsgrundlagen für die Be- und Entlüftung von Strassentunneln im Hinblick auf die Verringerung der Schadstoffemissionen bei Kraftfahrzeugen, Bericht HBI 00-202-01, August 2001
als Kurzfassung: Schreiben BMVBW S27/38.75.50/3Va2001 Anhang 2 vom 26. Januar 2001
- [25] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV: Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln RABT, Ausgabe 2002, Entwurf vom 1. März 2002
- [26] Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten: Projektierungsrichtlinien Lüftungsanlagen RVS 9.262, Wien, April 1997

Anhang

A: Verkehrsdaten

Abbildung A.1: Verkehrsprognose 2010 Starnberg

Abbildung A.2: Verkehrsprognose 2010 Innenstadt

Abbildung A.3: Tagesgang des Gesamtverkehrs und des Lastwagenanteils im Untersuchungsgebiet

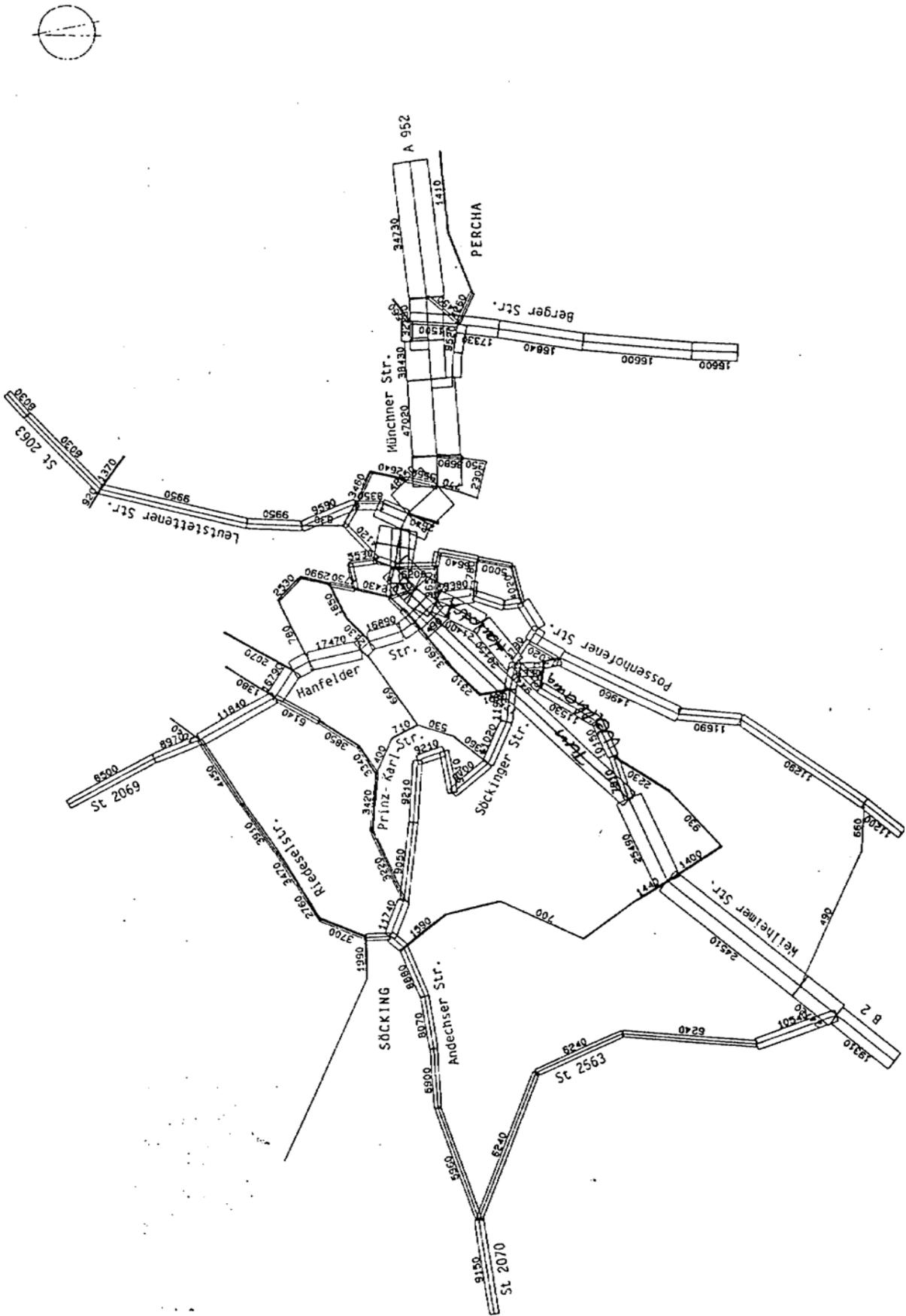


Abbildung A.1: Verkehrsprognose 2010 Starnberg

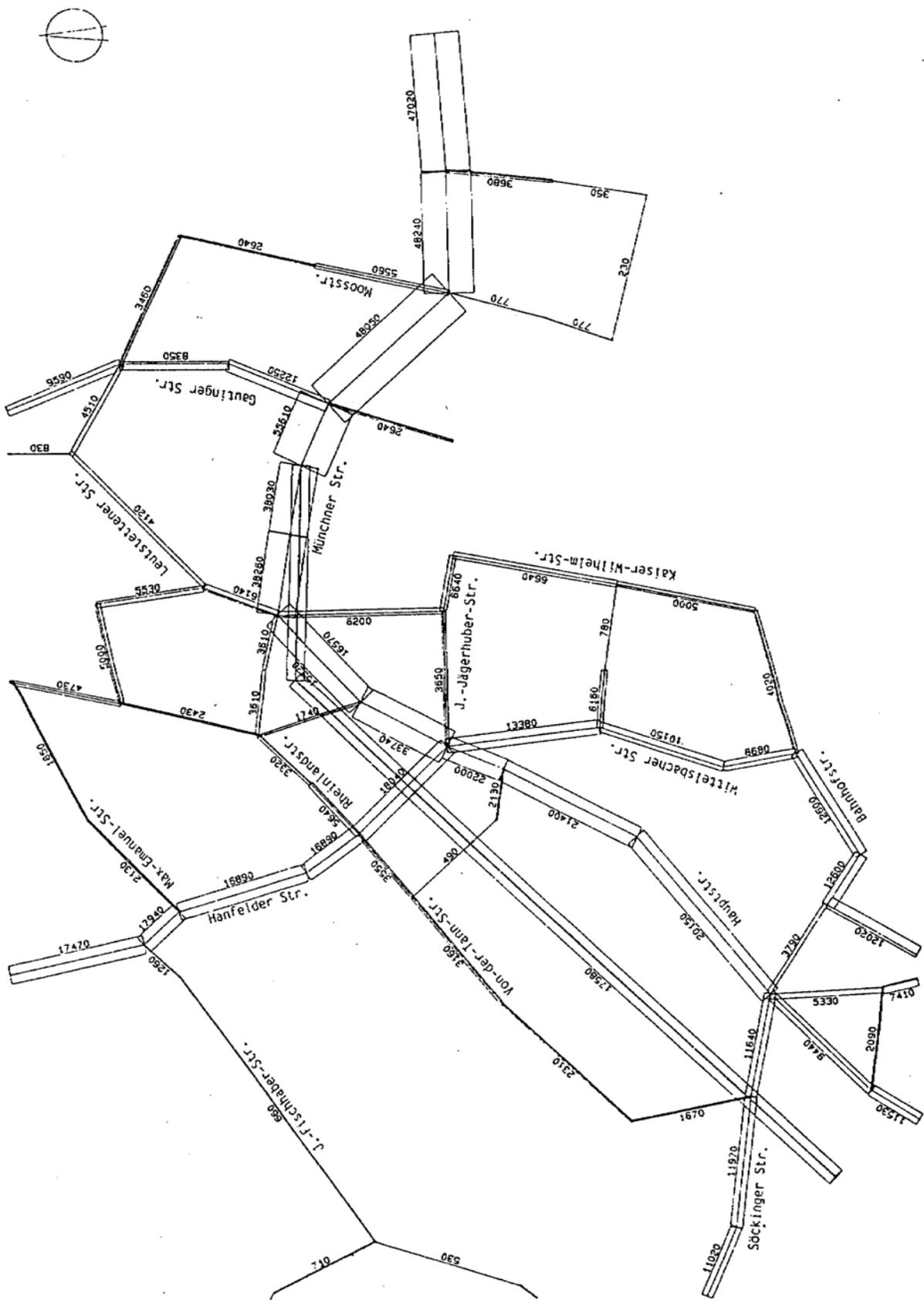


Abbildung A.2: Verkehrsprognose 2010 Innenstadt

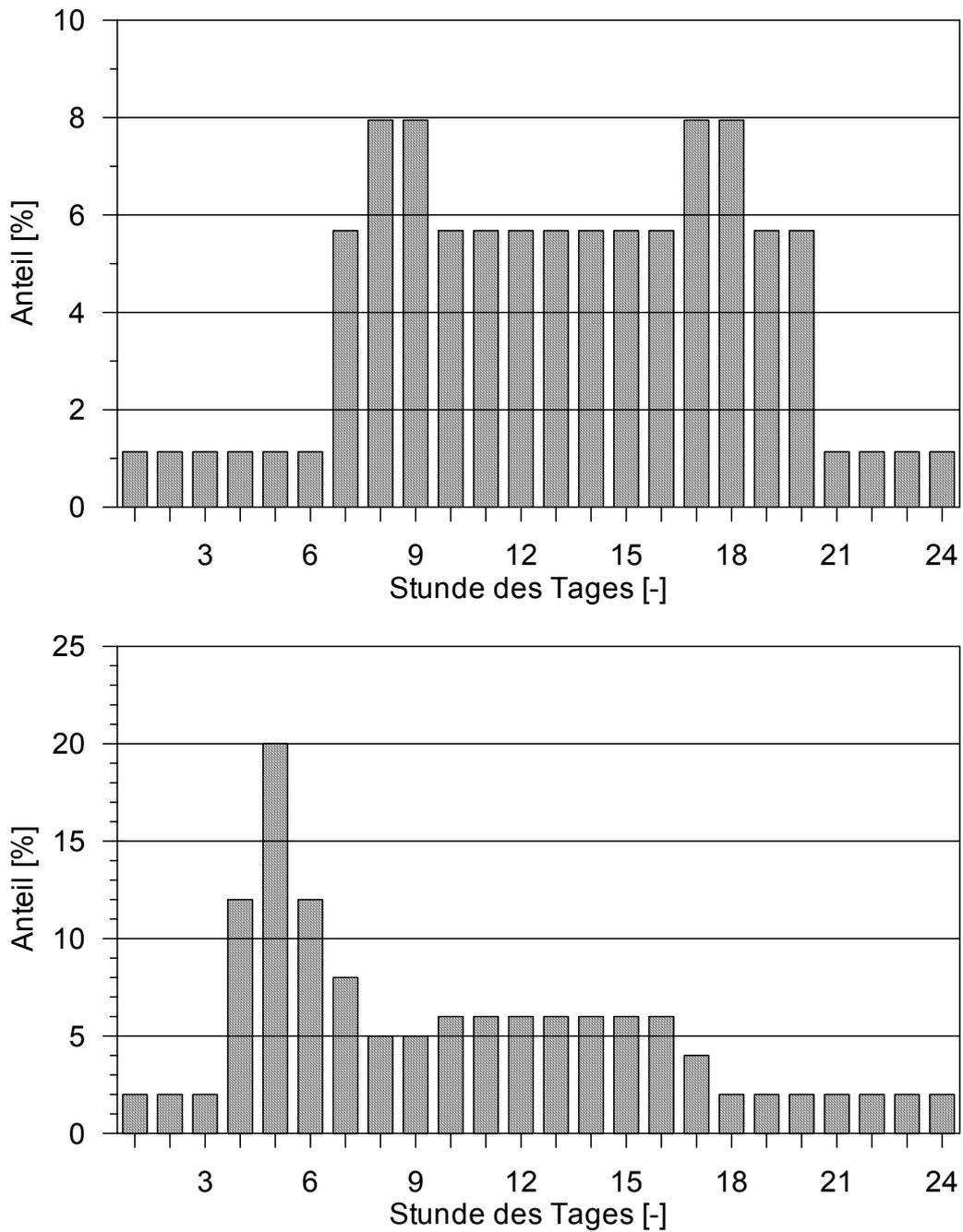


Abbildung A.3: Tagesgang des Gesamtverkehrs und des Lastwagenanteils im Untersuchungsgebiet

B: Winddaten

Abbildung B.1: Windverteilung Starnberg Münchnerstrasse 0 bis 24 Uhr, repräsentativ für das Nordportal

Abbildung B.2: Windverteilung Starnberg Weilheimer Strasse 0 bis 24 Uhr, repräsentativ für das Südportal

Abbildung B.3: Windverteilung Starnberg Schlossberg 7 bis 19 Uhr, repräsentativ für die Umgebung des Abluftkamins

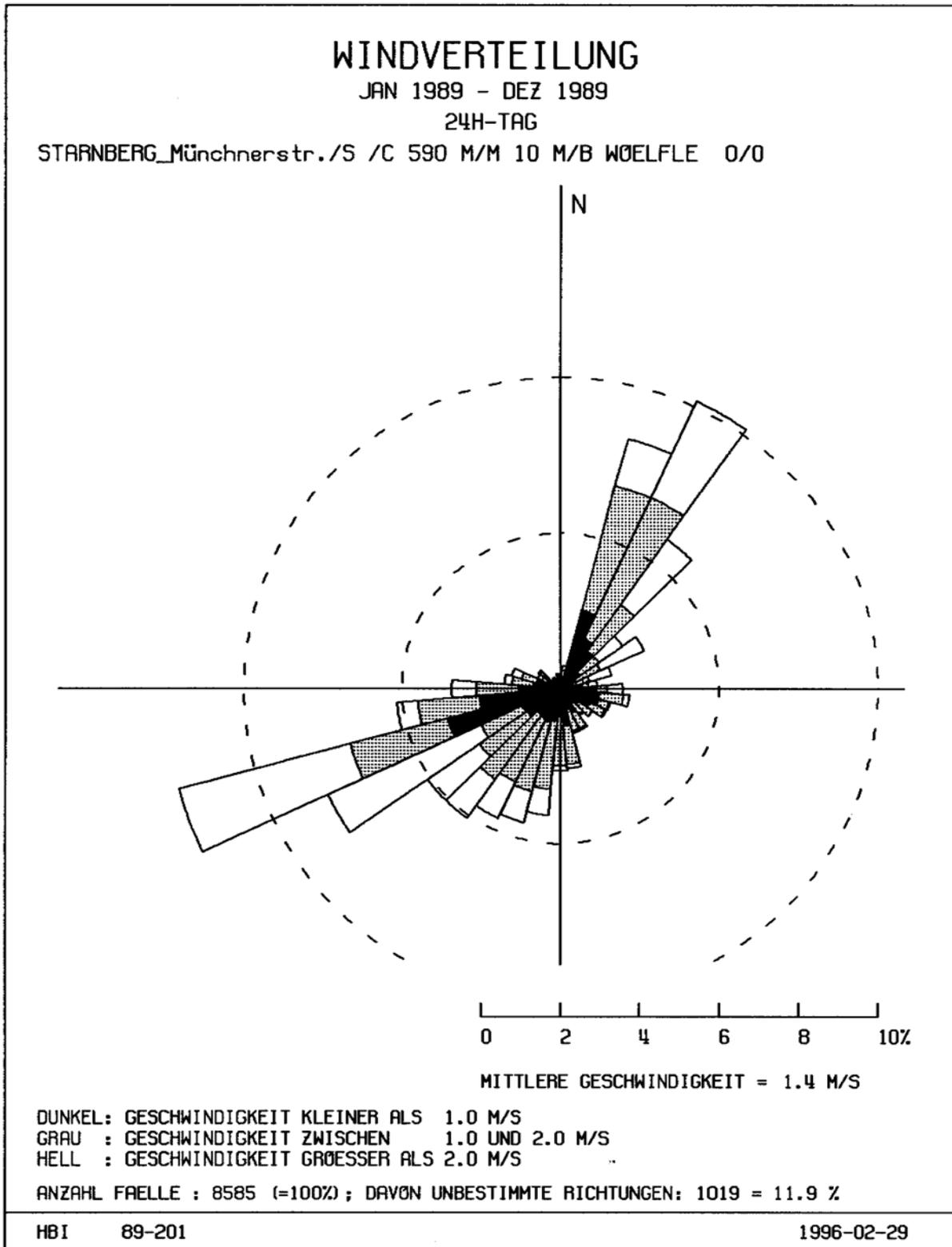


Abbildung B.1: Windverteilung Starnberg Münchenstrasse 0 bis 24 Uhr, repräsentativ für das Nordportal

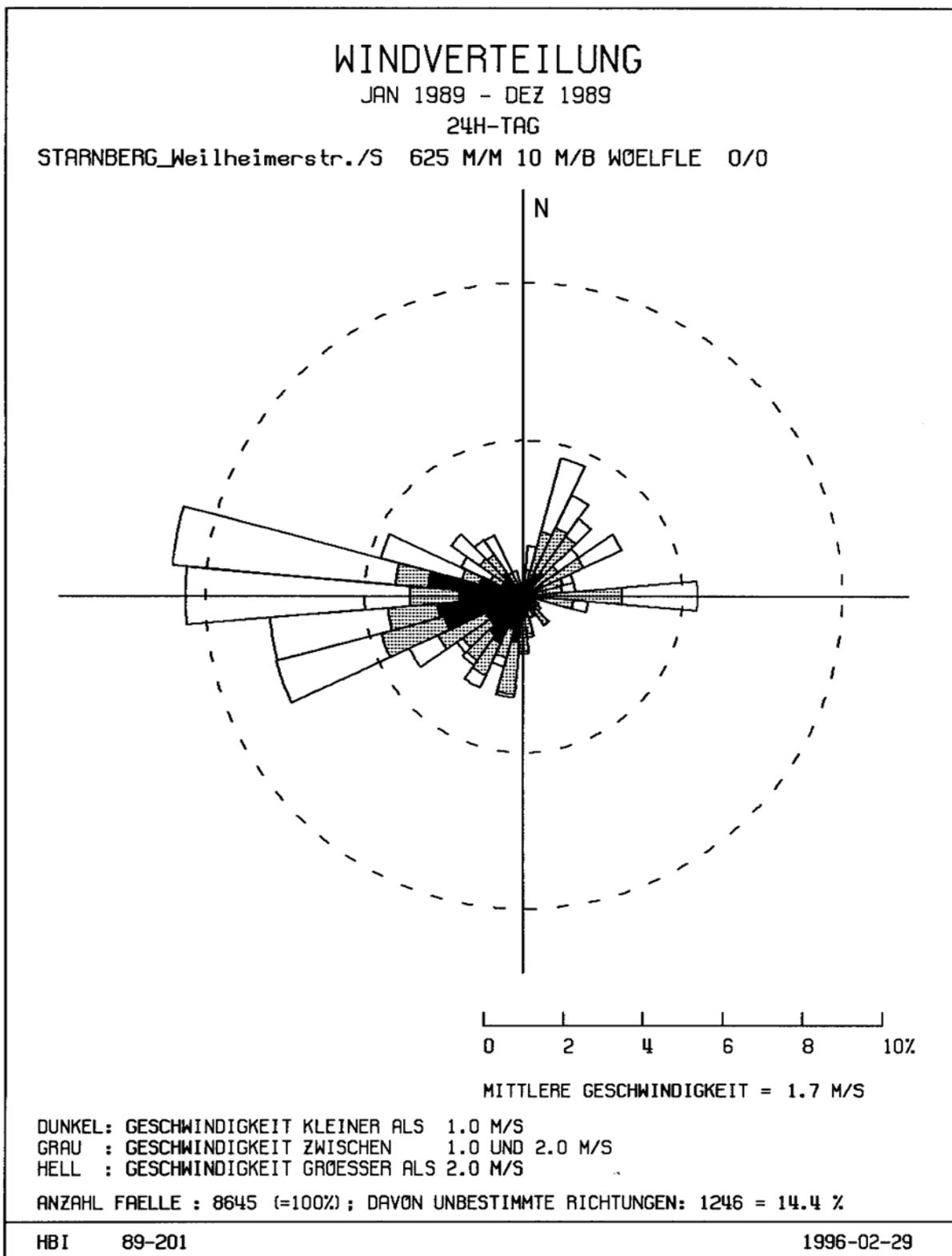


Abbildung B.2: Windverteilung Starnberg Weilheimer Strasse 0 bis 24 Uhr, repräsentativ für das Südportal

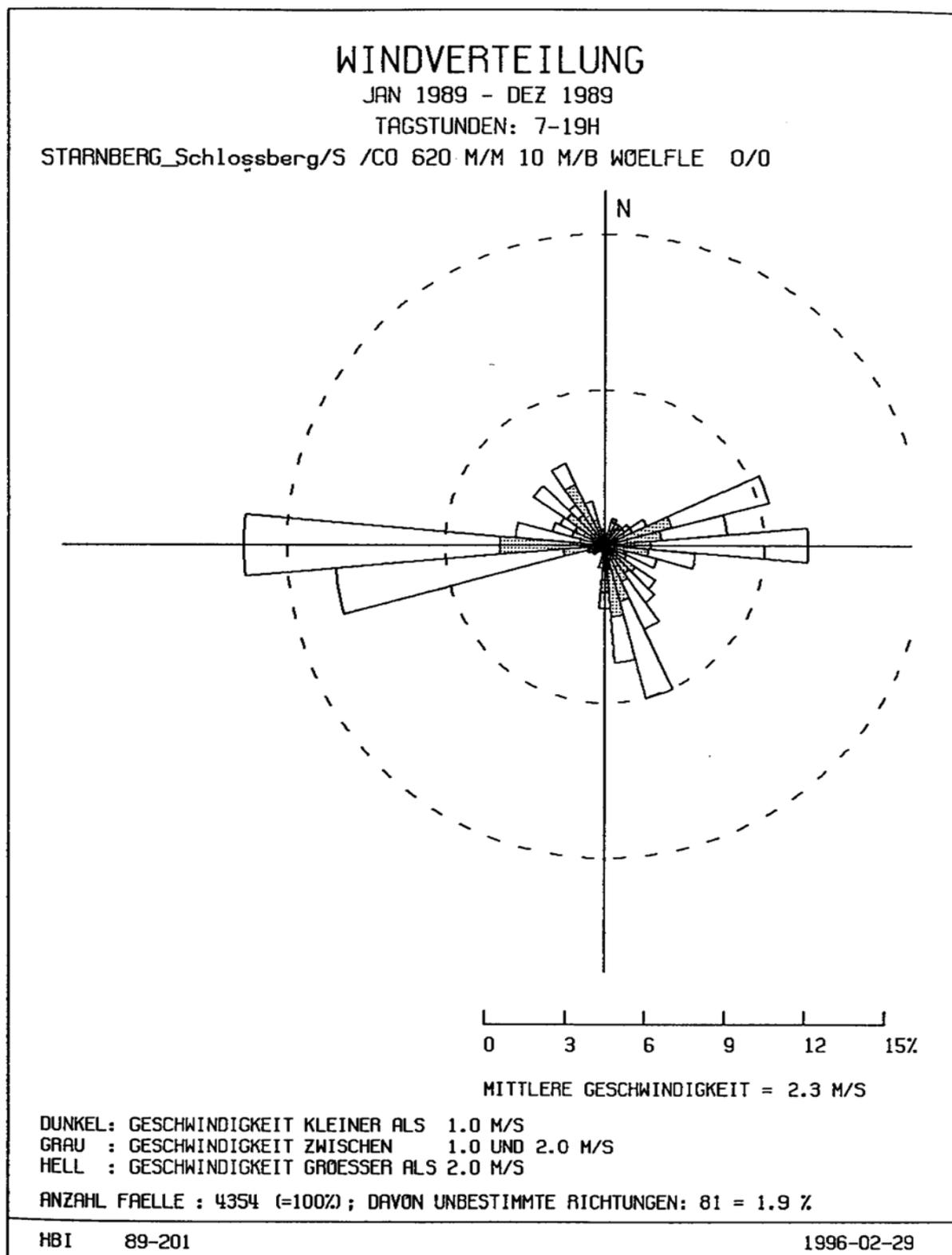


Abbildung B.3: Windverteilung Starnberg Schlossberg 7 bis 19 Uhr, repräsentativ für die Umgebung des Abluftkamins

C: Modellierung

Abbildung C.1: Modellierte Quellen HIWAY - Nordportal

Abbildung C.2: Modellierte Quellen HIWAY - Südportal

Abbildung C.3: Modellierte Quellen MISKAM - Nordportal

Abbildung C.4: Modellierte Quellen MISKAM - Südportal

Tabelle C.1: Portalemissionen

Tabelle C.2: Rechengitter für die MISKAM-Ausbreitungsrechnungen

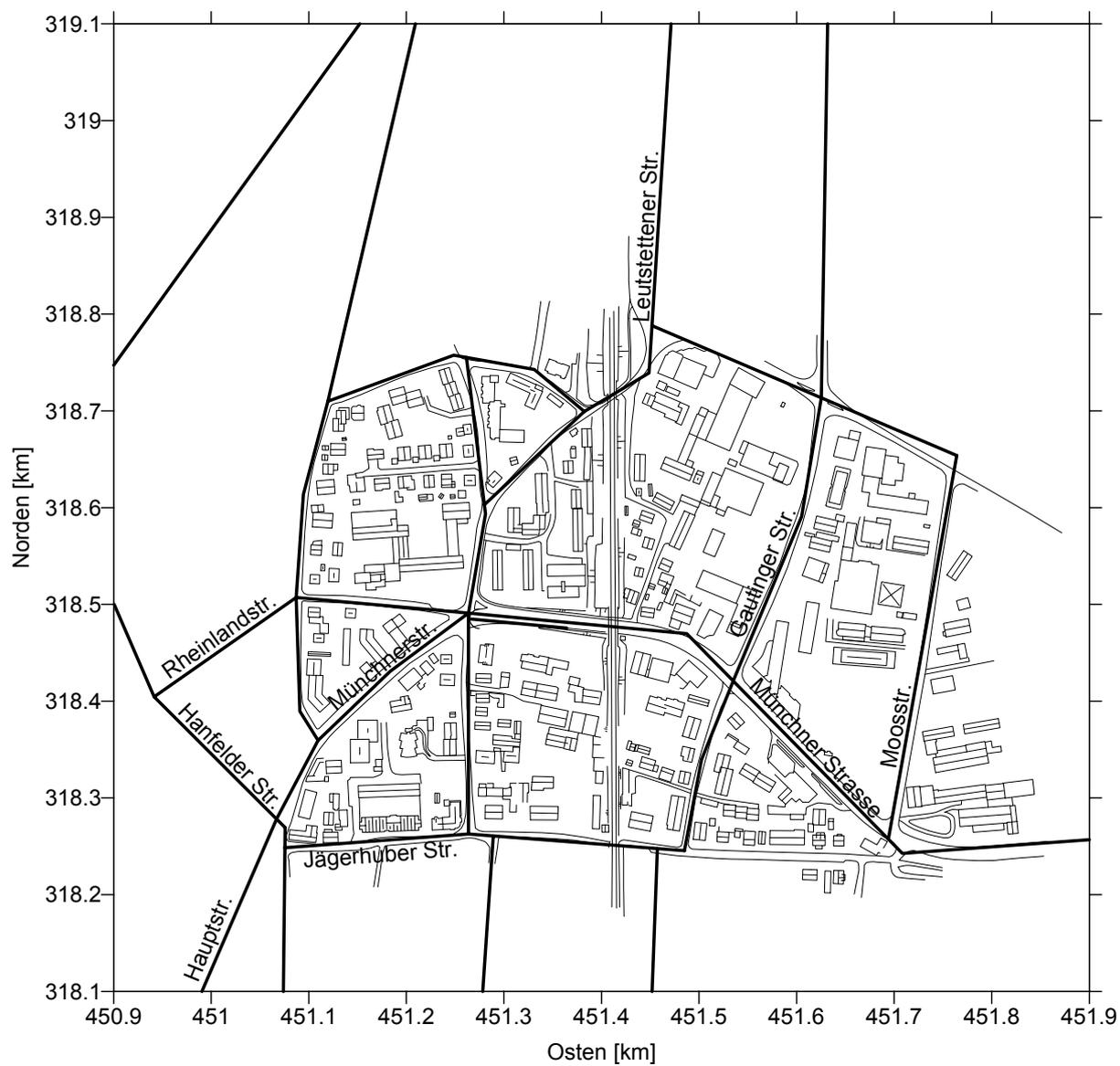


Abbildung C.1: Modellierte Quellen HIWAY - Nordportal

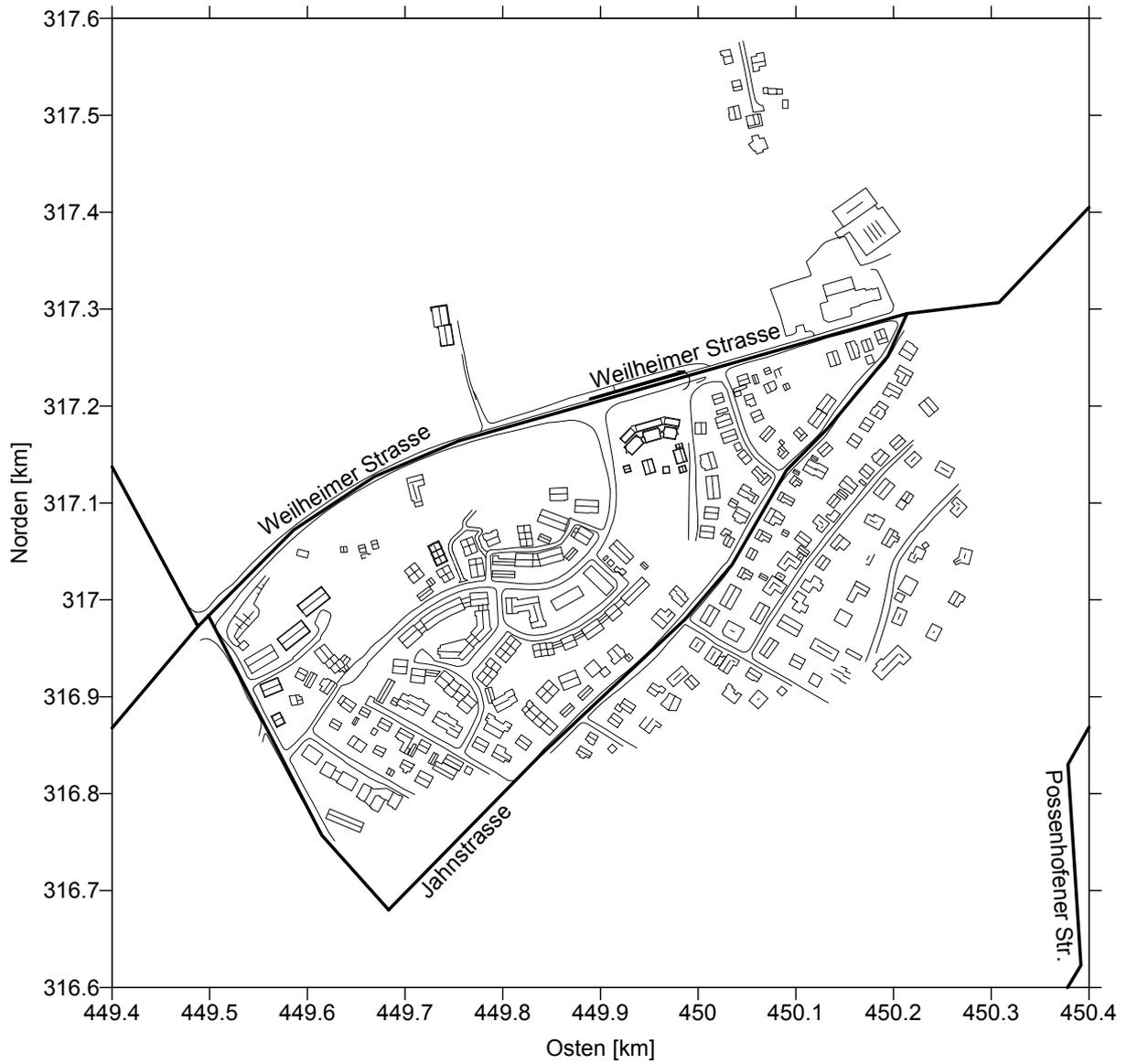


Abbildung C.2: Modellerte Quellen HIWAY - Südportal

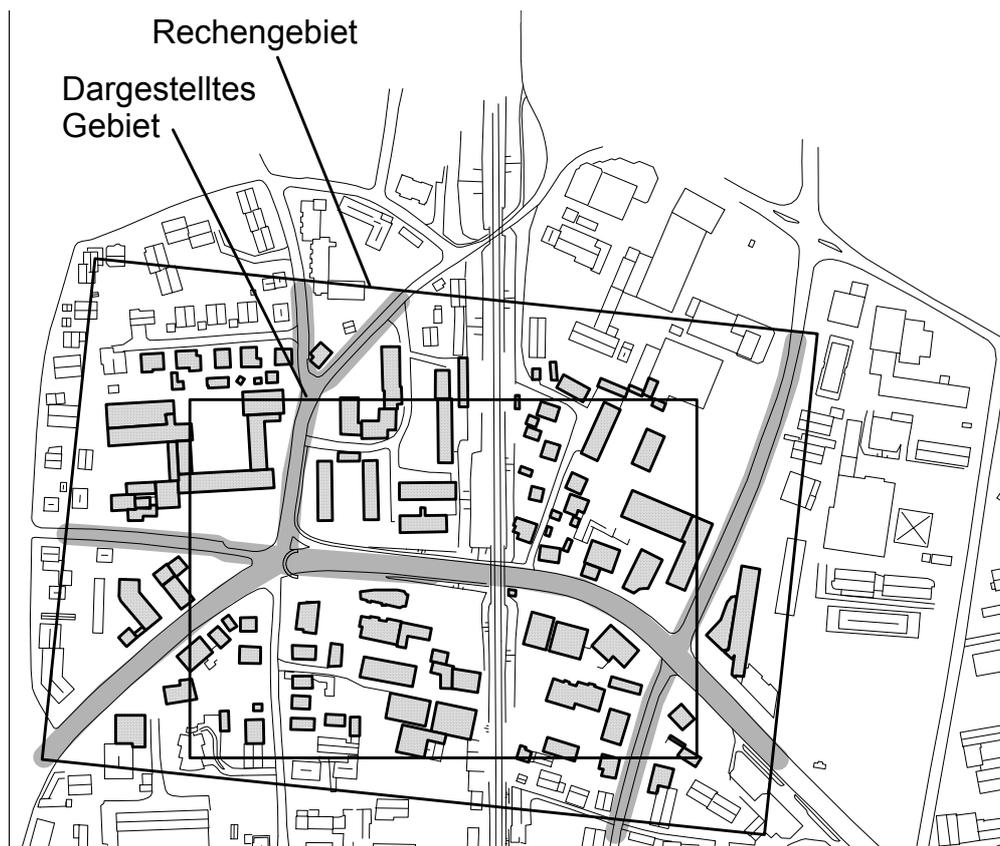


Abbildung C.3: Modellierte Quellen MISKAM – Nordportal

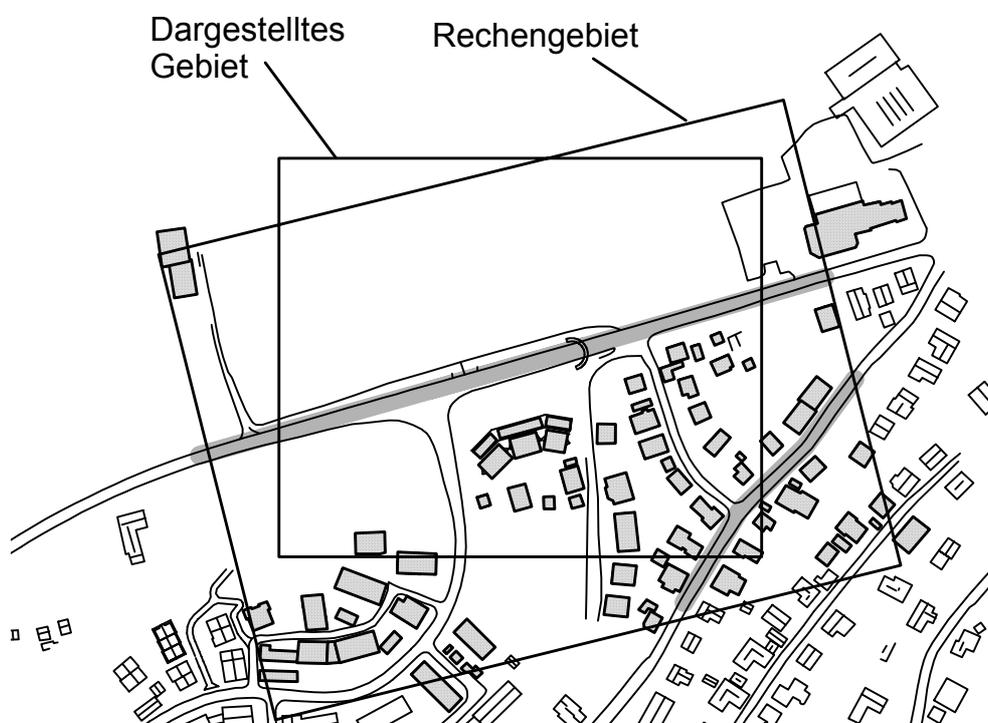


Abbildung C.4: Modellierte Quellen MISKAM – Südportal

Portal	Schadstoff	Quellstärke [g/Tag]
Nordportal	NO _x	5663
	PM10	1049
Südportal	NO _x	5663
	PM10	1049

Tabelle C.1: Portalemissionen

Portalzone	Ausdehnung [m] x [m] x [m]	Anzahl Zellen	Zellen Gesamt
Nordportal	500 x 350 x 84	100 x 70 x 25	175'000
Südportal	400 x 300 x 84	100 x 75 x 25	187'500

Tabelle C.2: Rechengitter für die MISKAM-Ausbreitungsrechnungen

D: Belastungskarten der Schadstoffimmissionen

Abbildung D.1: Nordportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 100% Portalabluft

Abbildung D.2: Nordportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 20% Portalabluft

Abbildung D.3: Nordportal – Belastungsminderung wegen Absaugung in Tunnelmitte

Abbildung D.4: Südportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 100% Portalabluft

Abbildung D.5: Südportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 20% Portalabluft

Abbildung D.6: Südportal – Belastungsminderung wegen Absaugung in Tunnelmitte

Abbildung D.7: Nordportal - Jahresmittelwert der PM₁₀-Belastung, 100% Portalabluft

Abbildung D.8: Nordportal - Jahresmittelwert der PM₁₀-Belastung, 20% Portalabluft

Abbildung D.9: Südportal - Jahresmittelwert der PM₁₀-Belastung, 100% Portalabluft

Abbildung D.10: Südportal - Jahresmittelwert der PM₁₀-Belastung, 20% Portalabluft

Die Immissionskarten in diesem Abschnitt wurden mit dem Programm HIWAY-2+ errechnet. Die Kurven konstanter Konzentration wurden durch Interpolation über ein Punktraster von 50m × 50m gebildet. Die Darstellung erfolgt für eine Beurteilung des gesamten Projekts im weiteren Umfeld, nicht lokaler (punktuelle) Belastungen.

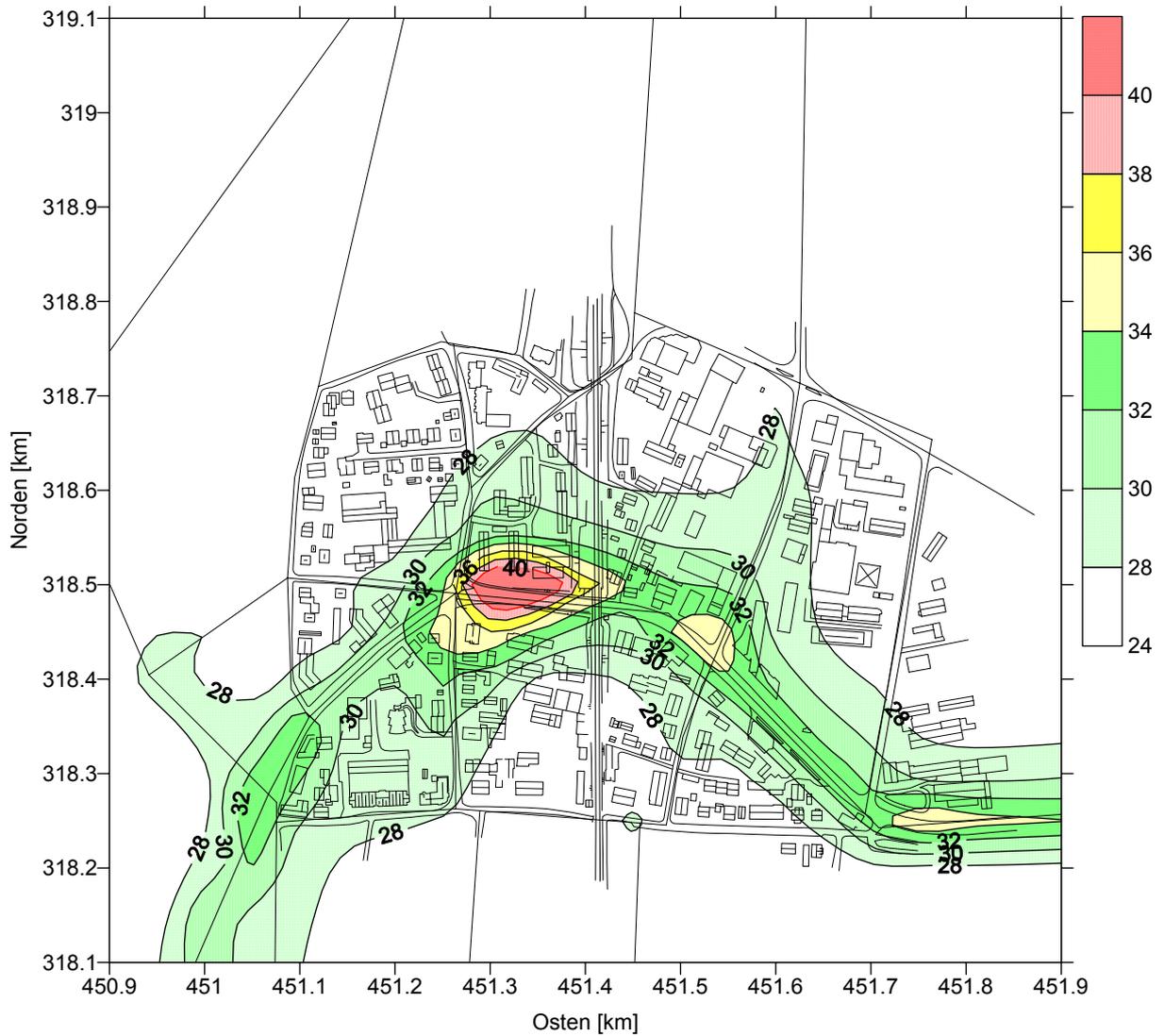


Abbildung D.1: Nordportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 100% Portalabluft

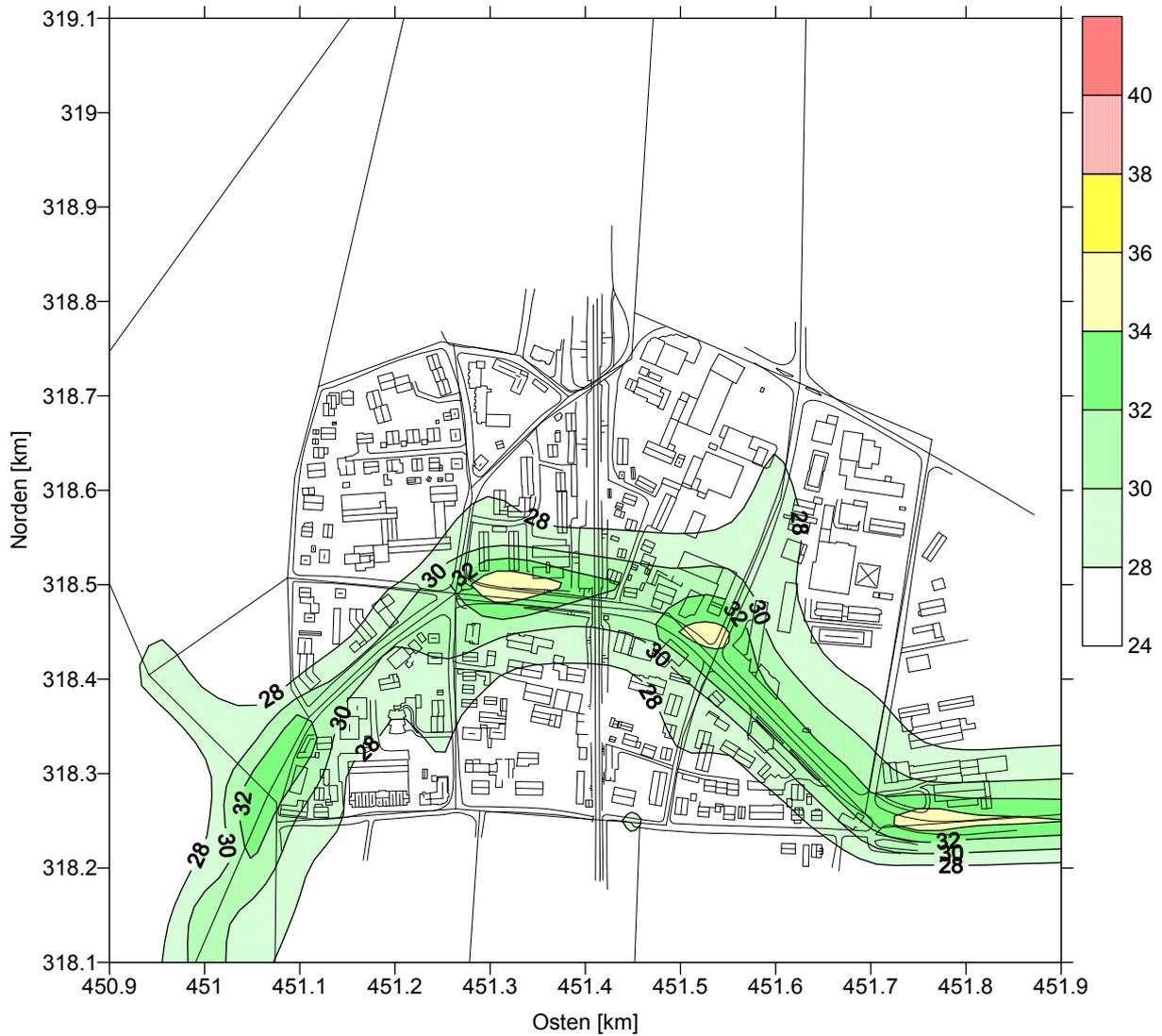


Abbildung D.2: Nordportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 20% Portalabluft

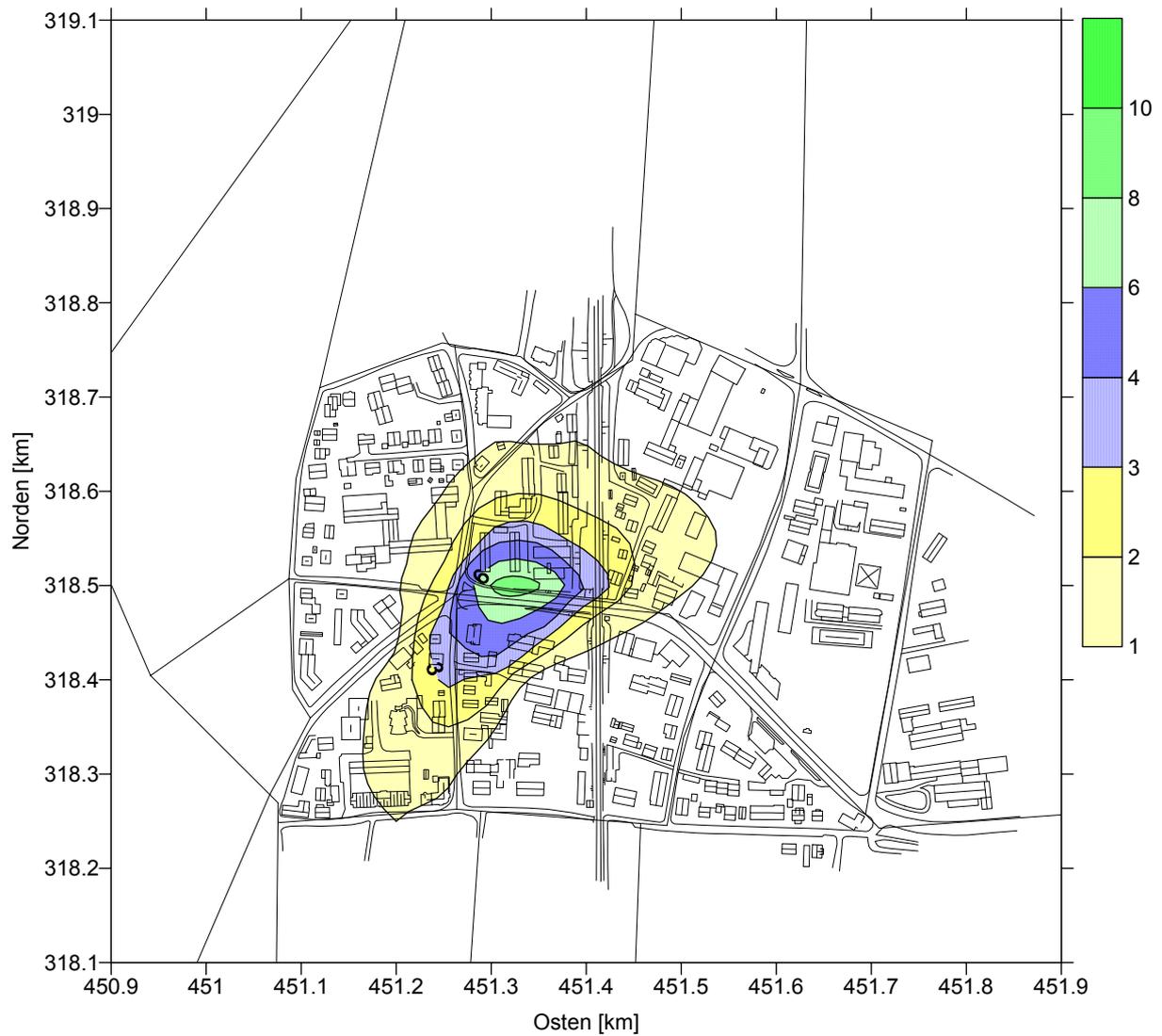


Abbildung D.3: Nordportal – Belastungsminderung wegen Absaugung in Tunnelmitte

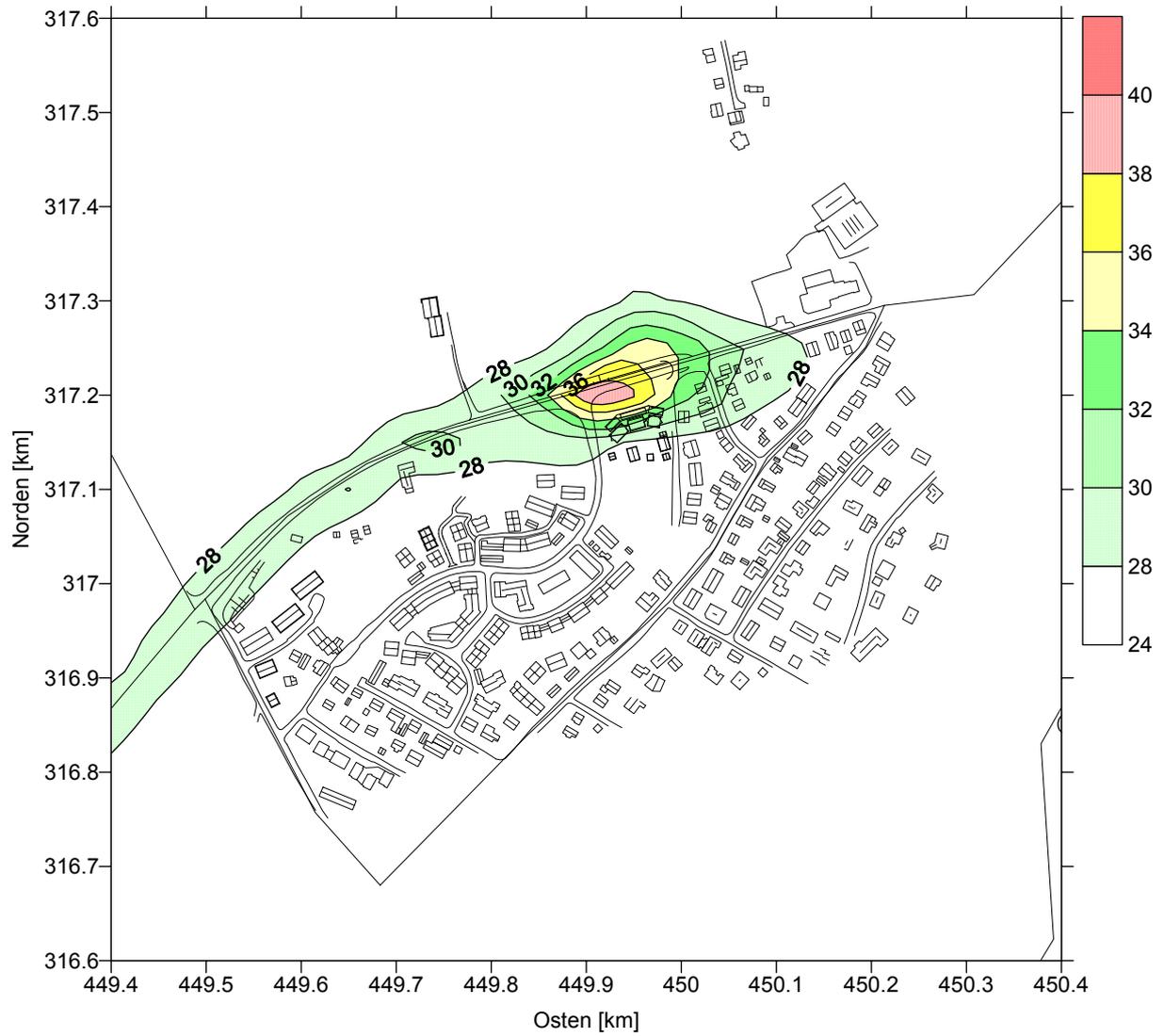


Abbildung D.4: Südportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 100% Portalabluft

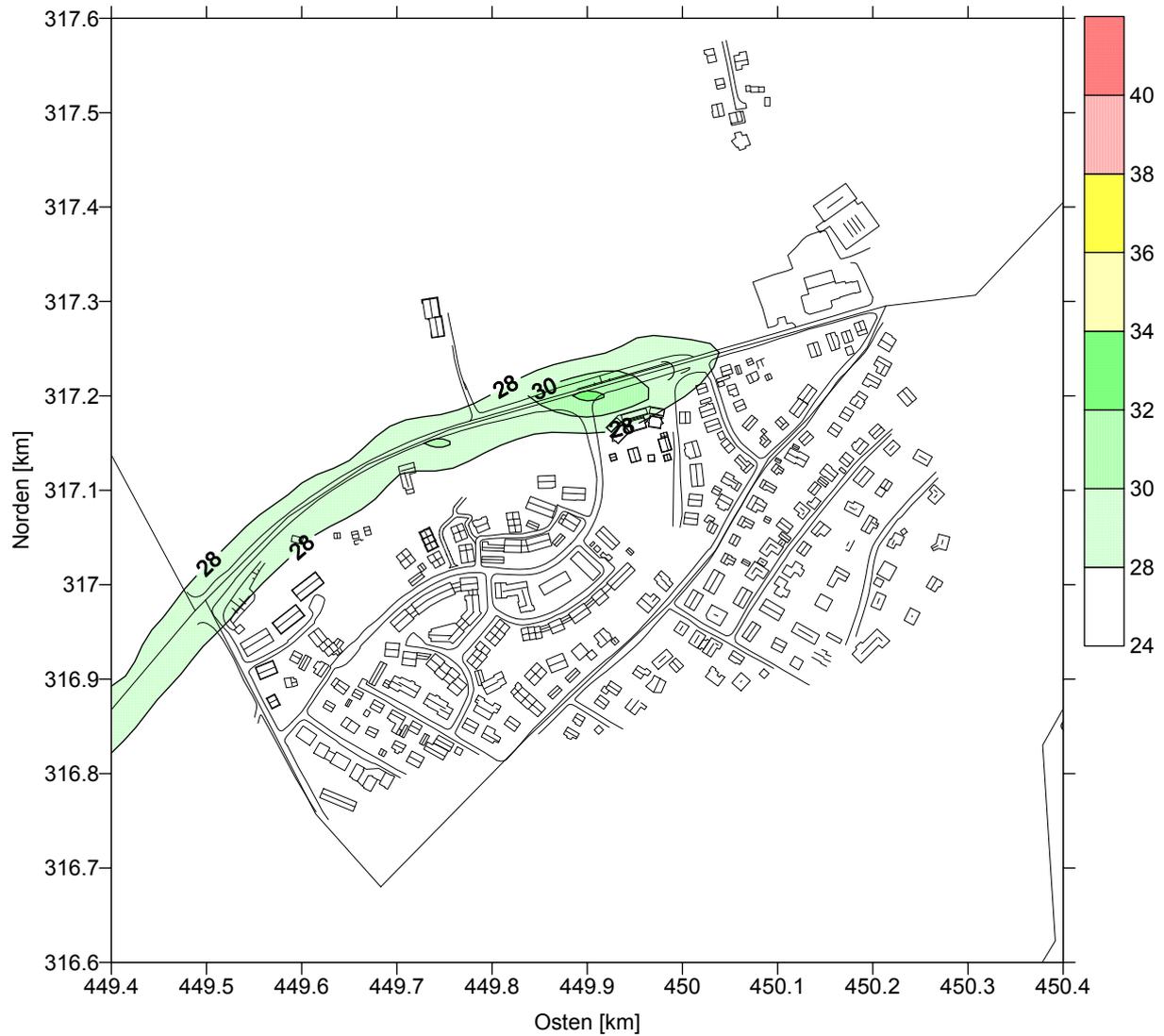


Abbildung D.5: Südportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 20% Portalabluft

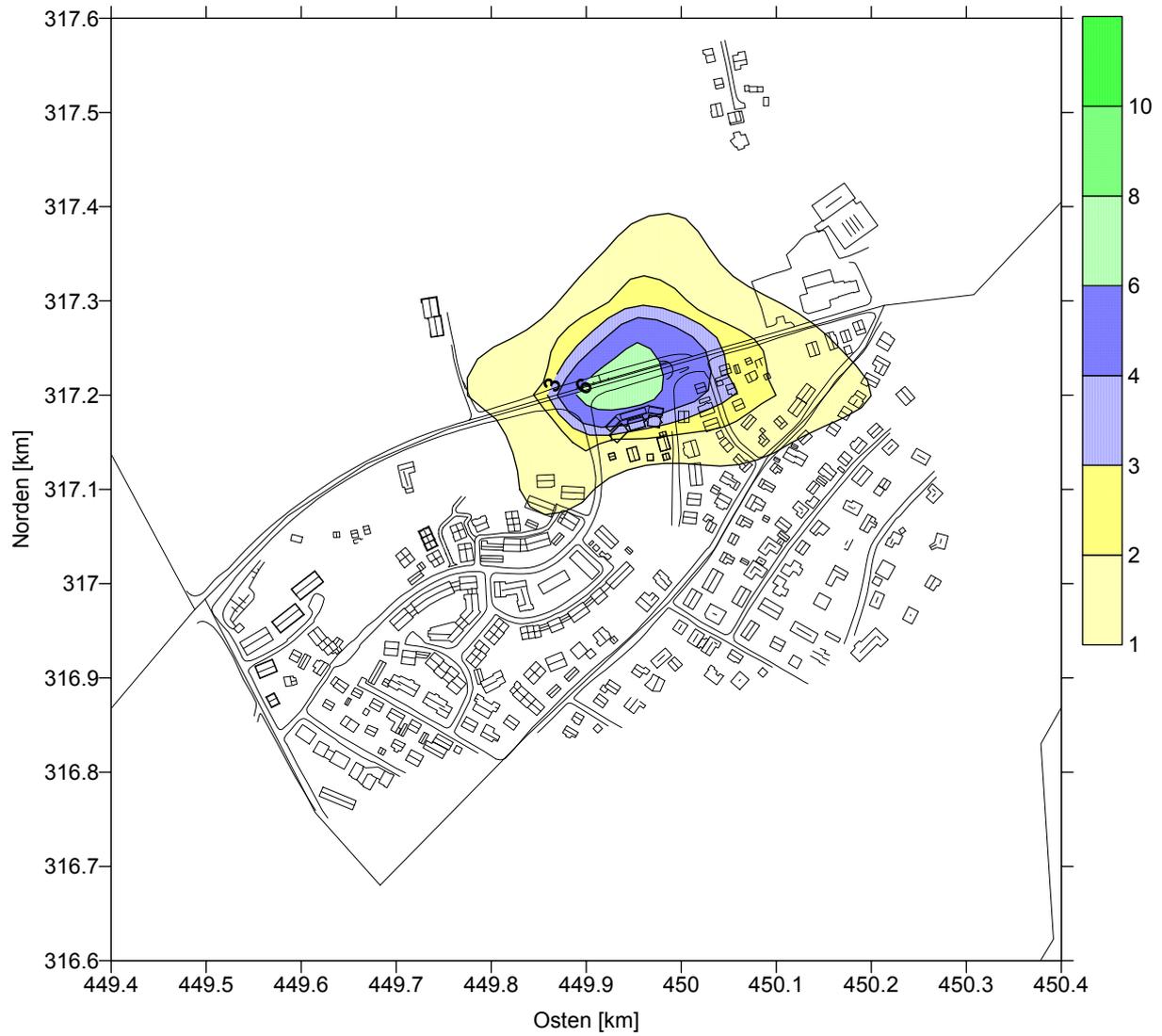


Abbildung D.6: Südportal – Belastungsminderung wegen Absaugung in Tunnelmitte

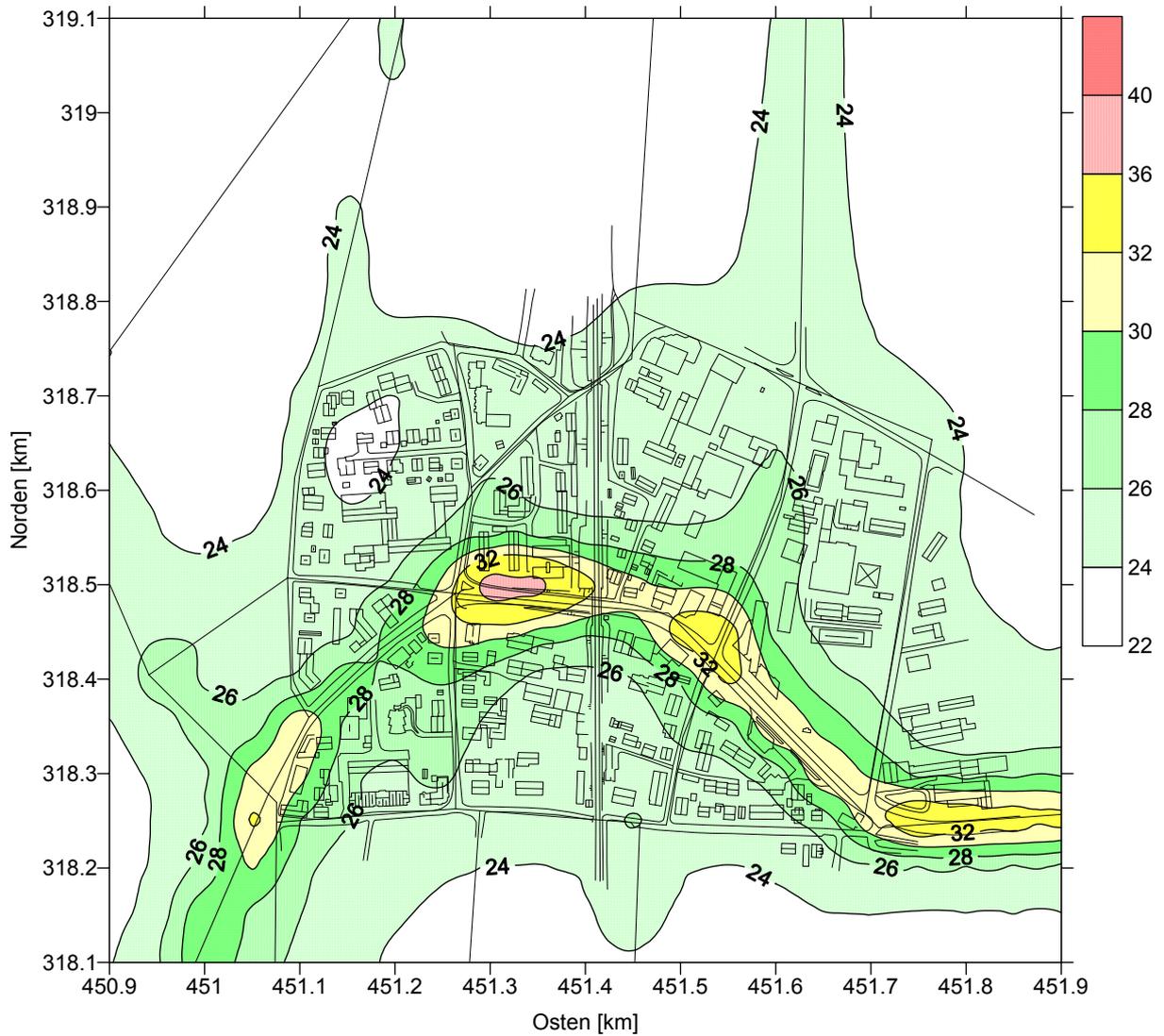


Abbildung D.7: Nordportal - Jahresmittelwert der PM10-Belastung, 100% Portalabluft

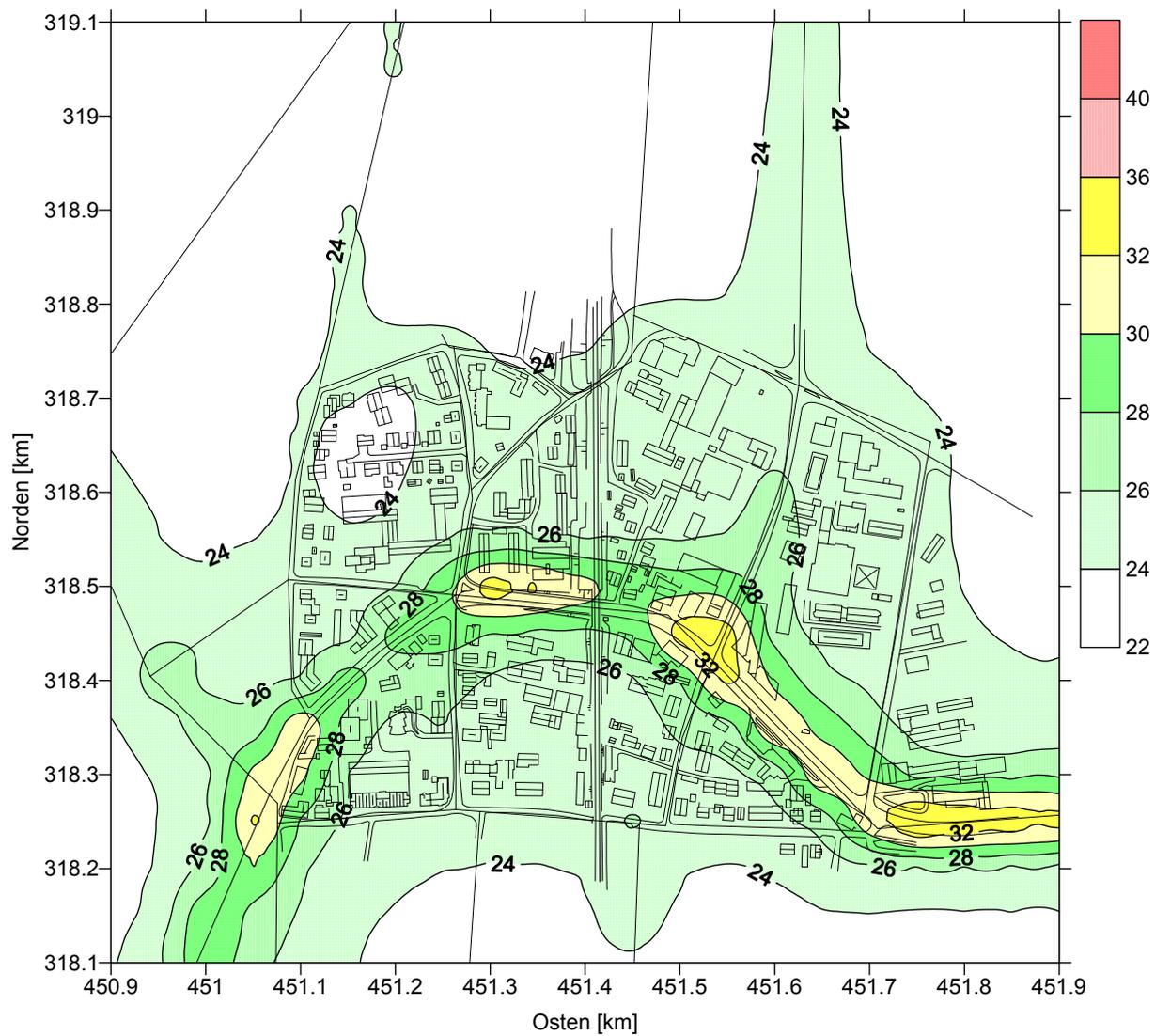


Abbildung D.8: Nordportal - Jahresmittelwert der PM10-Belastung, 20% Portalabluft

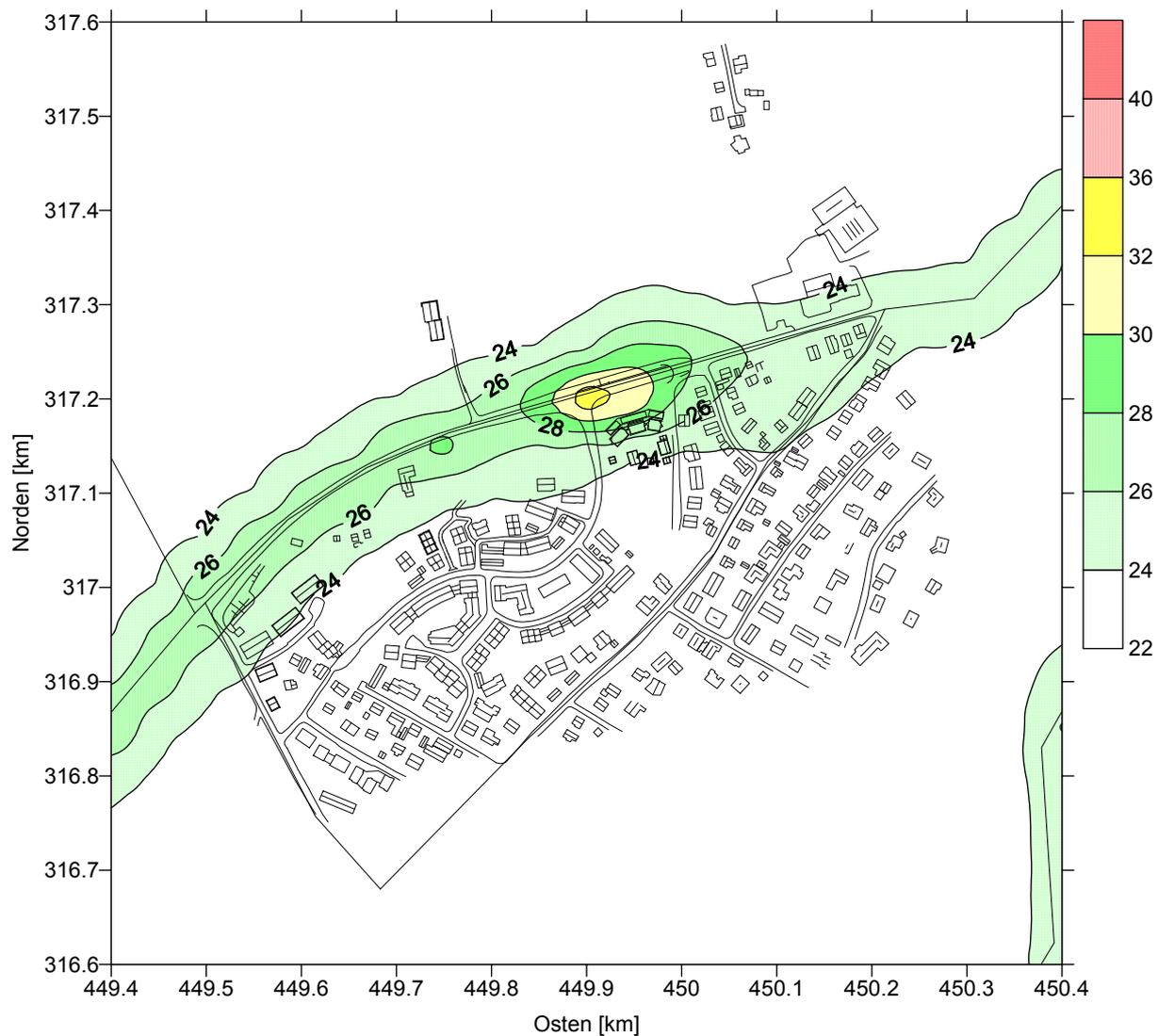


Abbildung D.9: Südportal - Jahresmittelwert der PM10-Belastung, 100% Portalabluft

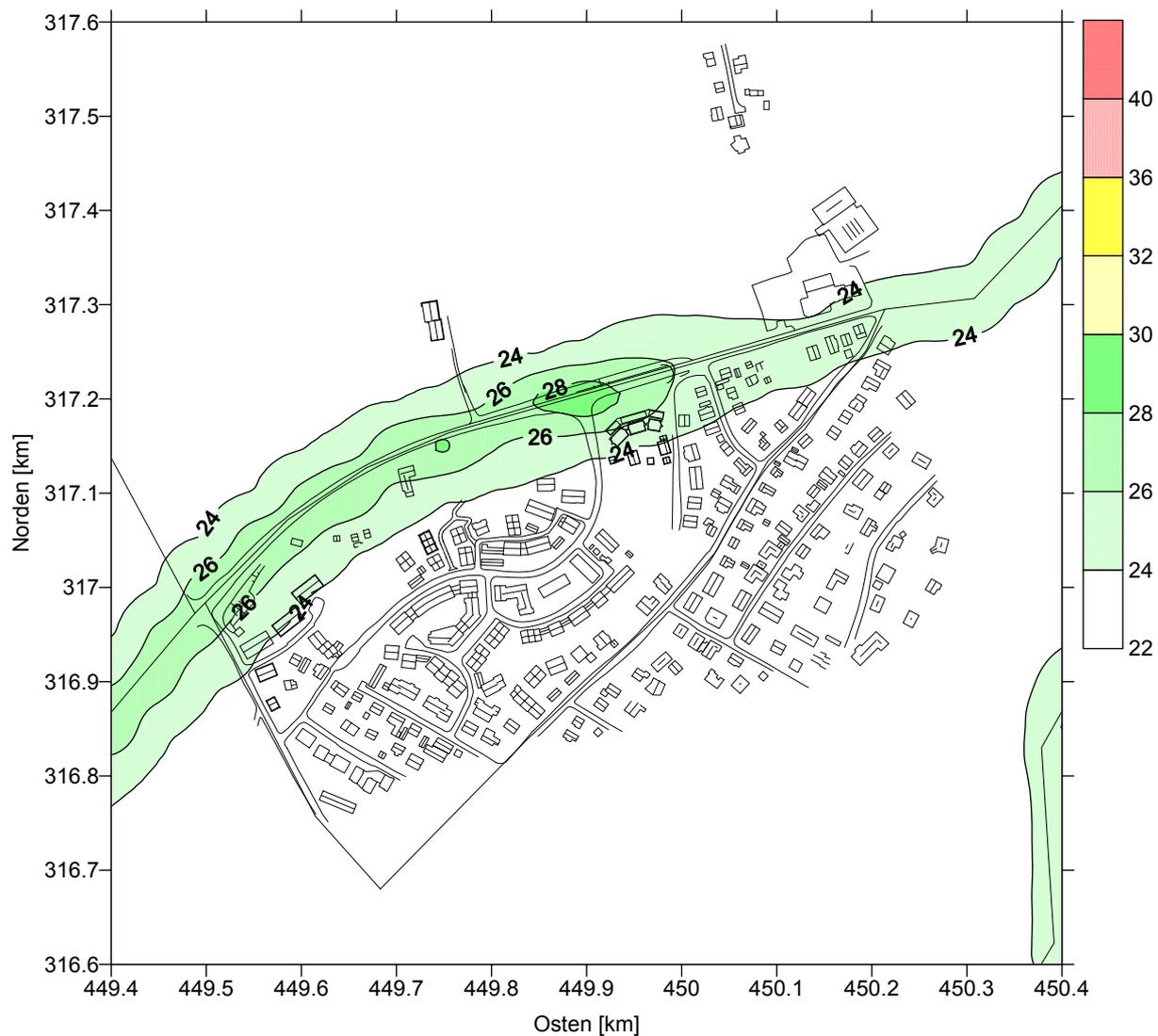


Abbildung D.10: Südportal - Jahresmittelwert der PM10-Belastung, 20% Portalabluft

E: Belastungskarten der Schadstoffimmissionen der Portalzonen

Abbildung E.1: Nordportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 100% Portalabluft

Abbildung E.2: Südportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 100% Portalabluft

Abbildung E.3: Nordportal - Jahresmittelwert der PM10-Belastung, 100% Portalabluft

Abbildung E.4: Südportal - Jahresmittelwert der PM10-Belastung, 100% Portalabluft

Die Immissionskarten in diesem Abschnitt wurden mit dem Programm MISKAM errechnet. Die Kurven konstanter Konzentration werden durch Interpolation über ein sehr dichtes Punktraster gebildet. Die Darstellung erfolgt für die Beurteilung lokaler Belastungen ausserhalb des unmittelbaren Strassenbereichs.

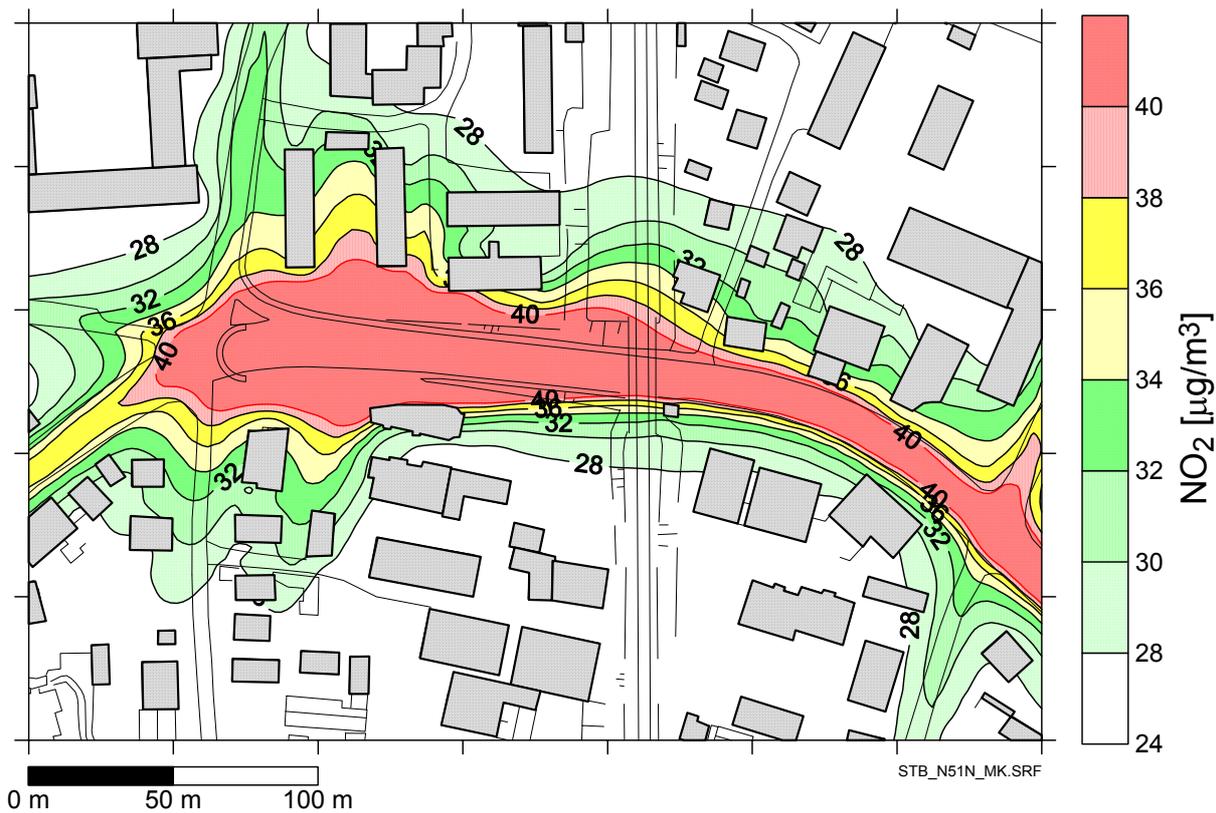


Abbildung E.1: Nordportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 100% Portalabluft

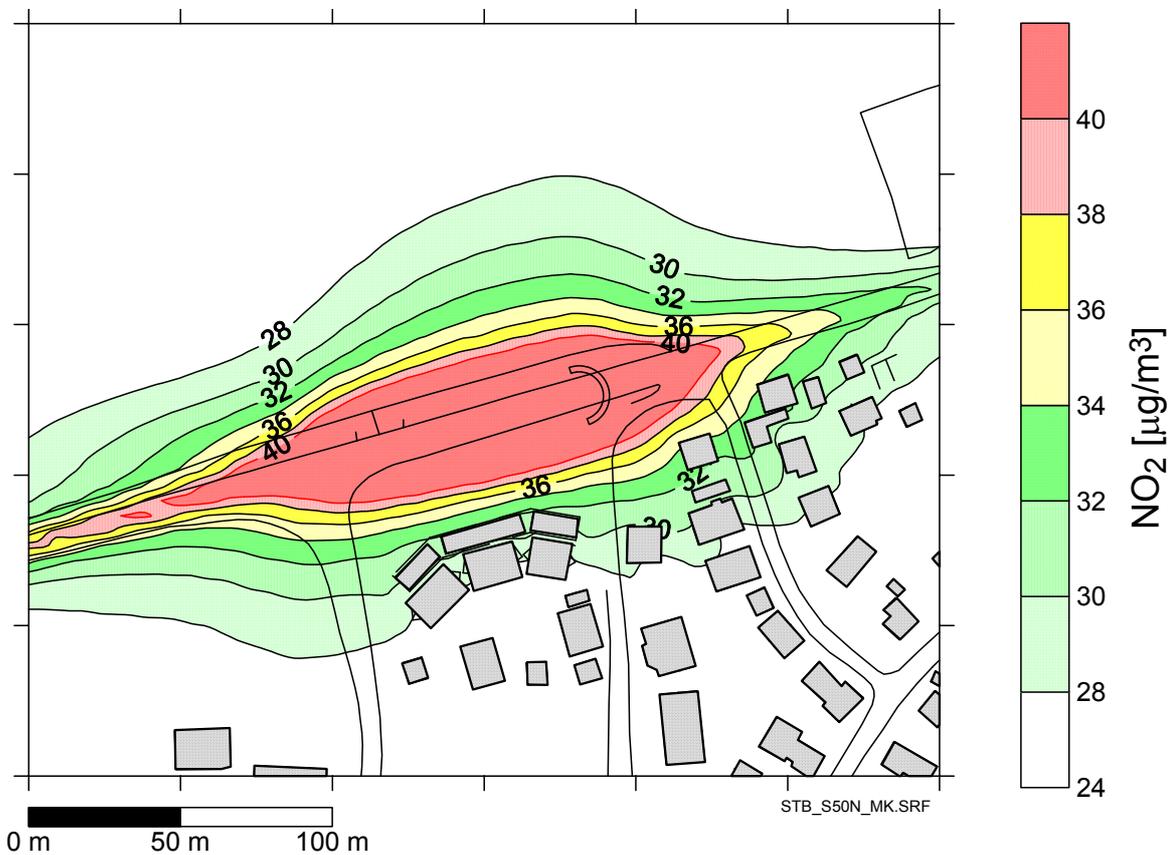


Abbildung E.2: Südportal – Jahresmittelwert der NO₂-Belastung, 100% Portalabluft

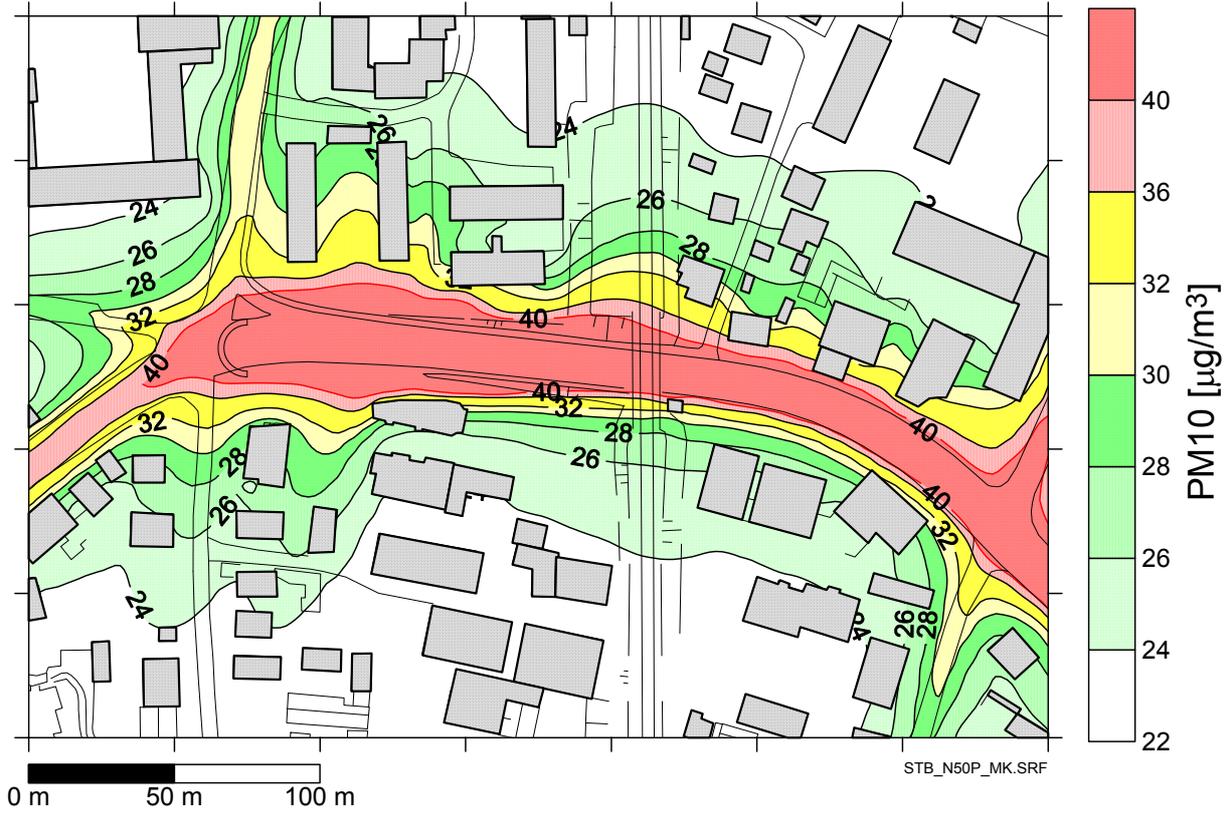


Abbildung E.3: Nordportal - Jahresmittelwert der PM10-Belastung, 100% Portalabluft

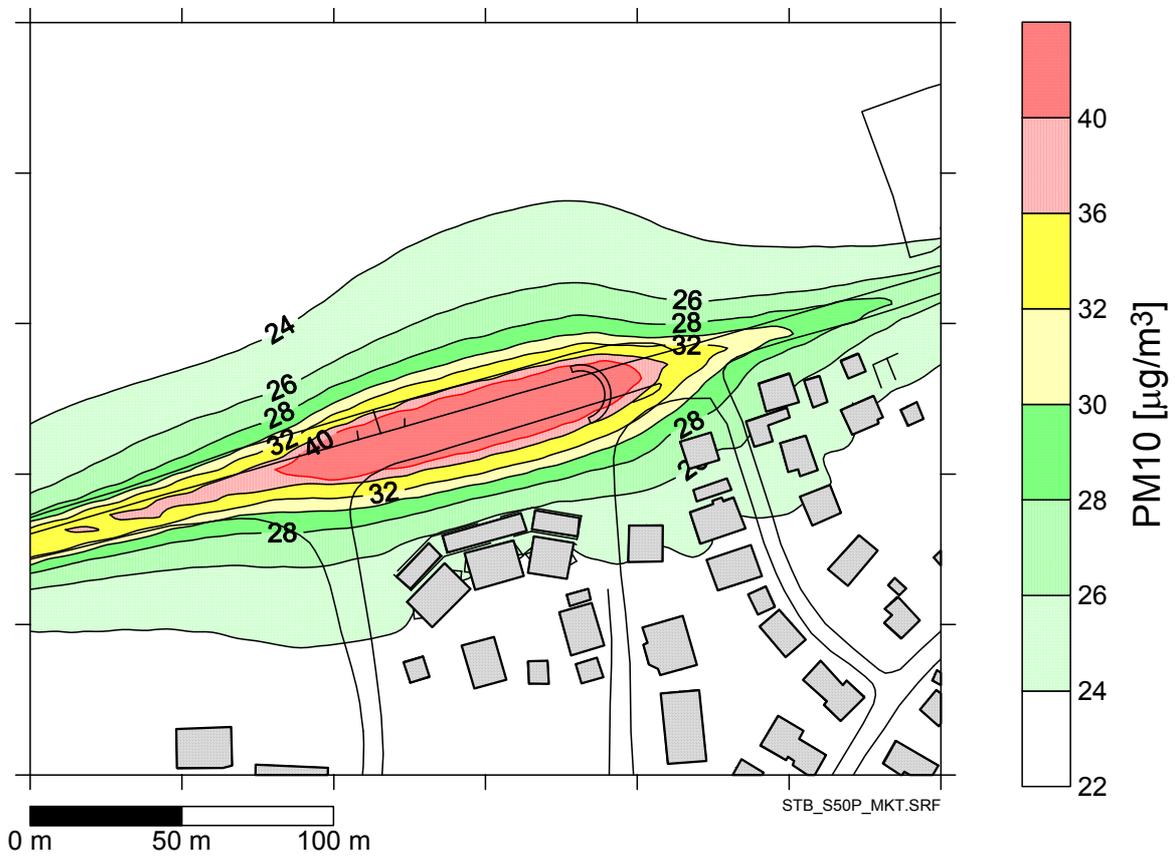


Abbildung E.4: Südportal - Jahresmittelwert der PM10-Belastung, 100% Portalabluft

F: Zusatzbelastung aus Kaminabluft

Abbildung F.1: Jahresmittelwert der Zusatzbelastung 2010 durch NO₂ und PM10 in [µg/m³] bei Kaminbetrieb 7 bis 19 Uhr, Ausblasgeschwindigkeit 10 m/s

Abbildung F.2: Jahresmittelwert der Zusatzbelastung 2010 durch NO₂ und PM10 in [µg/m³] bei Kaminbetrieb 7 bis 19 Uhr, Ausblasgeschwindigkeit 12 m/s

Abbildung F.3: Jahresmittelwert der Zusatzbelastung 2010 durch NO₂ und PM10 in [µg/m³] bei Kaminbetrieb 7 bis 19 Uhr, Ausblasgeschwindigkeit 15 m/s

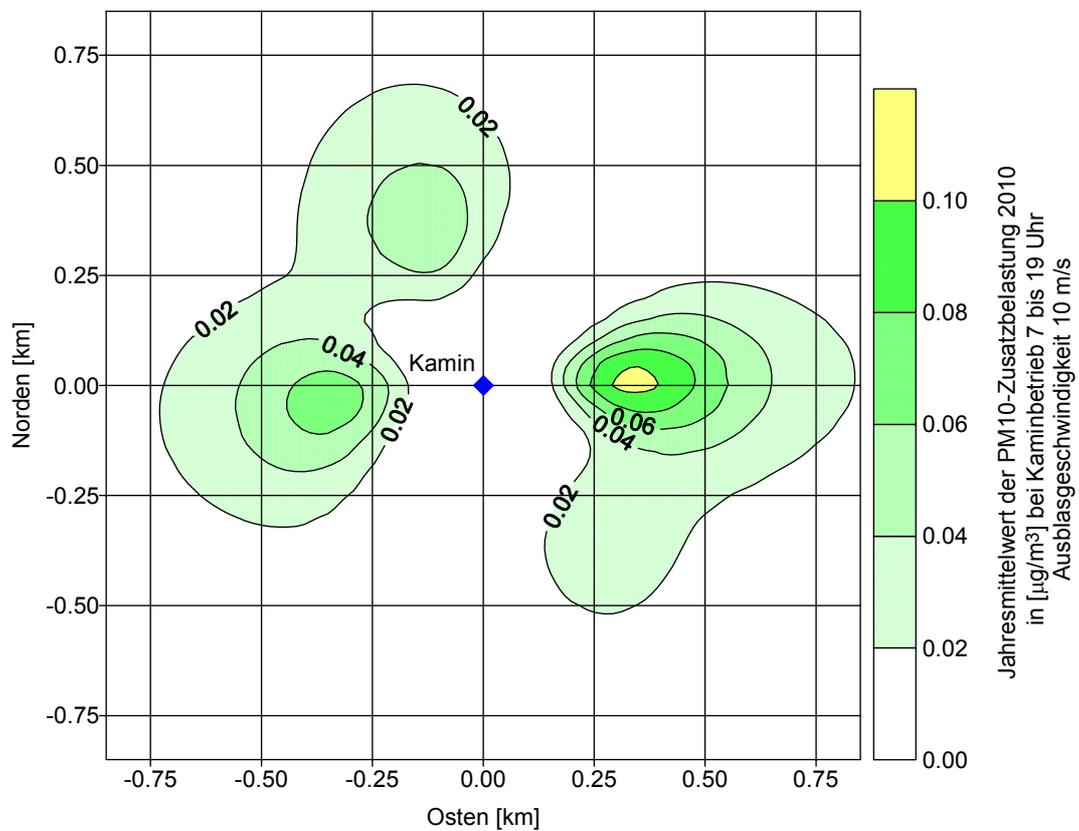
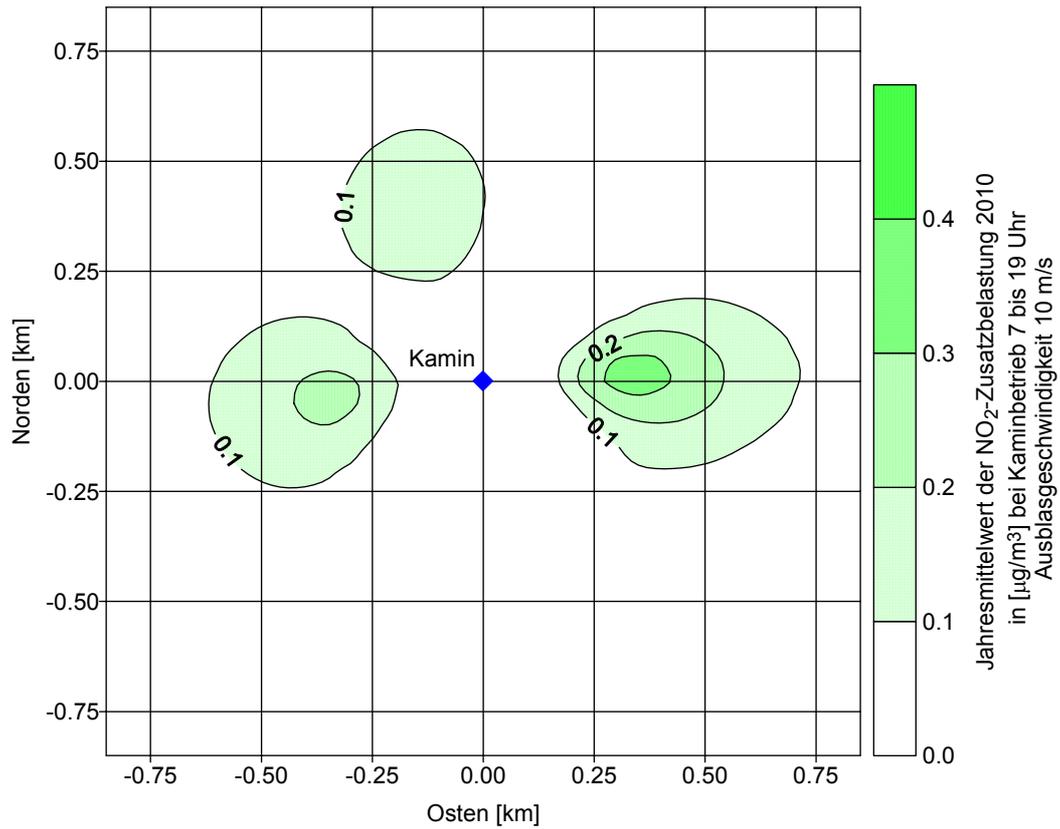


Abbildung F.1: Jahresmittelwert der Zusatzbelastung 2010 durch NO₂ und PM₁₀ in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Kaminbetrieb 7 bis 19 Uhr, Ausblasgeschwindigkeit 10 m/s

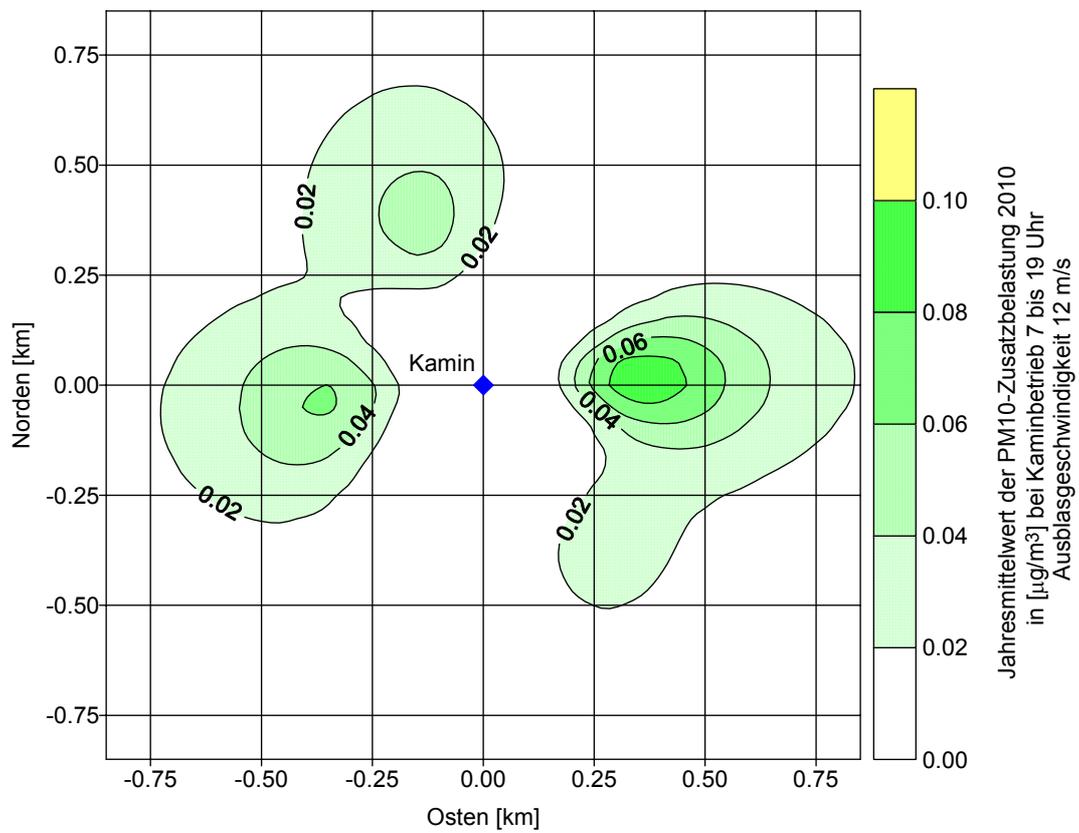
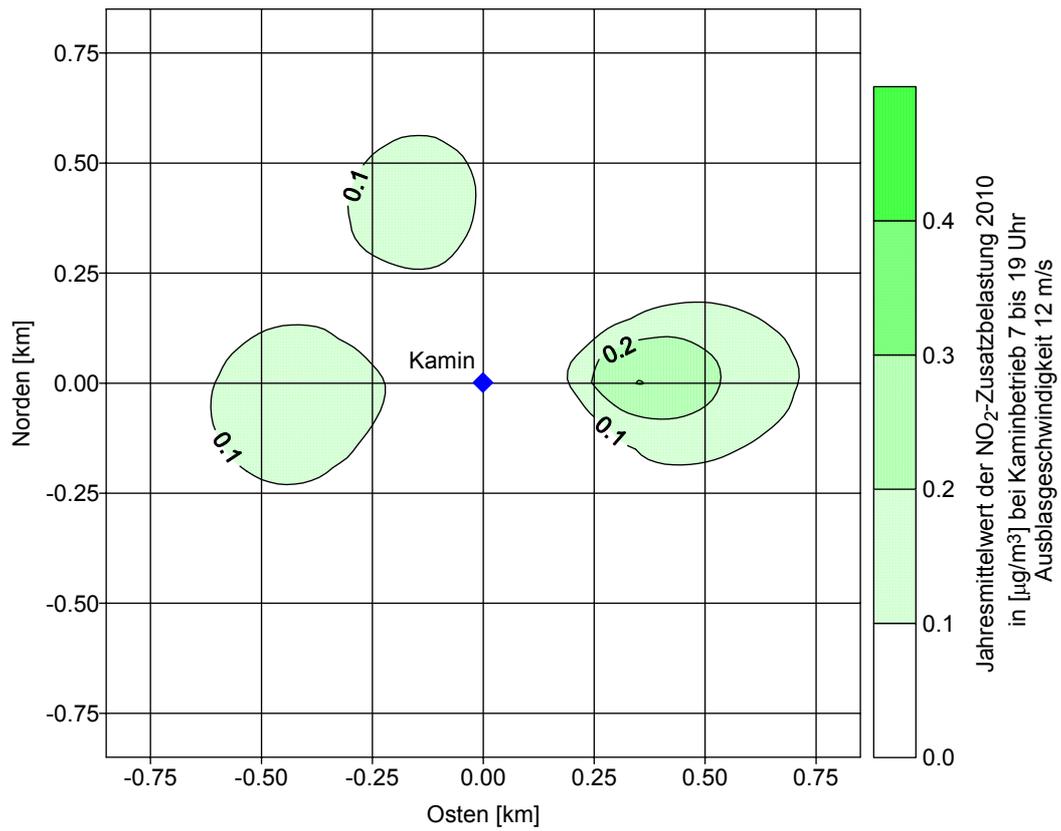


Abbildung F.2: Jahresmittelwert der Zusatzbelastung 2010 durch NO₂ und PM₁₀ in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Kaminbetrieb 7 bis 19 Uhr, Ausblasgeschwindigkeit 12 m/s

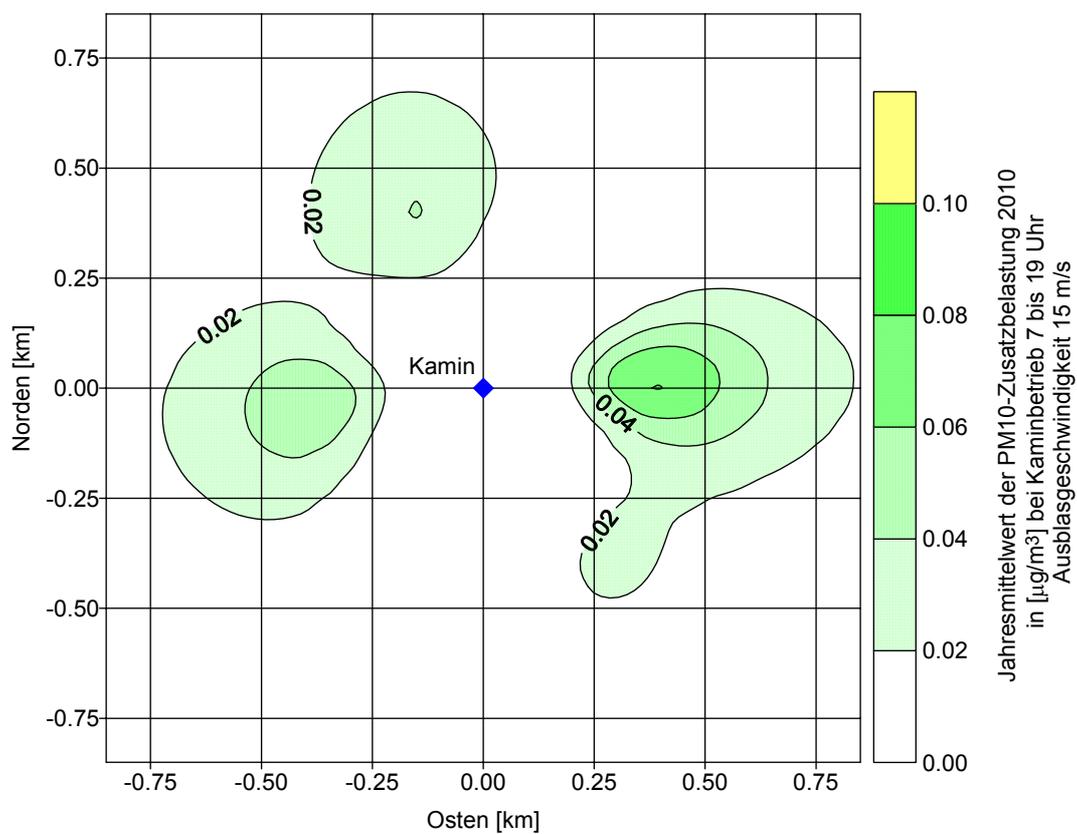
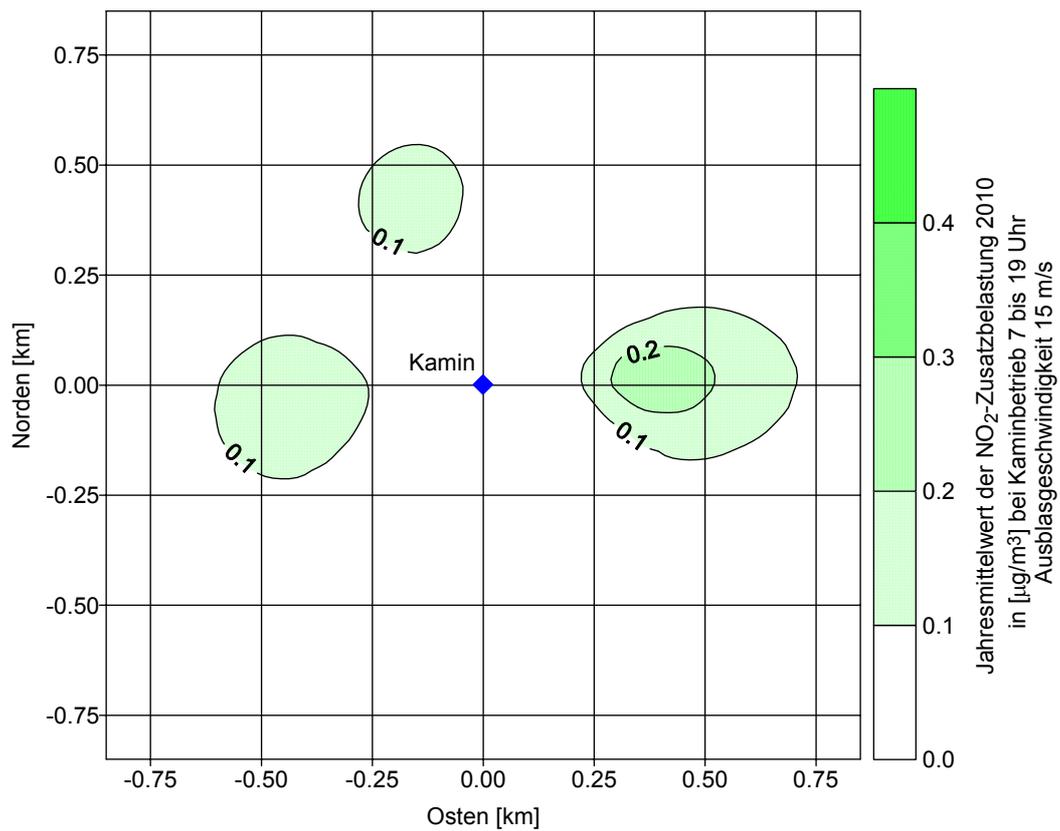


Abbildung F.3: Jahresmittelwert der Zusatzbelastung 2010 durch NO₂ und PM₁₀ in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Kaminbetrieb 7 bis 19 Uhr, Ausblasgeschwindigkeit 15 m/s

G: Berechnung des Frischluftbedarfs

Tabelle G.1: Frischluftbedarf und Selbstlüftung im Tunnel Starnberg für die ausgewählten Verkehrsfälle, Bezugsjahr 2010

Tabelle G.2: Frischluftbedarf und Selbstlüftung im Tunnel Starnberg für die ausgewählten Verkehrsfälle, Bezugsjahr 2015

FLB Version NT1.6 19.06.2001

CH:RL2001, D:RABT-00, A:RVS97, F:PIARC91, I:Italia99

Projekt: TUNNEL STARNBERG

File: d:\prog_t\data\STARN03.OUT

12/12/2001 10:01:53

Land: D Bezugsjahr: 2010

Tunnelnennungen				Luftdaten				
Gesamtlänge	Ltot =	1910 [m]	Höhe	H =	590 [müM]	Temperatur	T =	280 [K]
Hydr. Durchmesser	Dh =	6.40 [m]	Querschnitt	FT =	46.0 [m2]	Druck	P =	94453 [Pa]
Wandrauhigkeit	Ks =	2.00 [mm]	Reibungskoeff.	Lambda =	0.0151 [-]	Dichte	ro =	1.177 [kg/m3]
Einströmverluste	zetaA =	0.6 [-]		zetaB =	0.6 [-]	Zähigkeit	nue =	.1487 [cm2/s]
Portaldrücke	PA =	0 [Pa]		PB =	0 [Pa]			

Abschnitt	Länge L [m]	Steigung i [%]	Vf_LW_lim [km/h]
1	1460	-3.50	79
2	450	3.50	58

Fahrzeugdaten

Pw-Gewicht = 1.2 [t]	cW*FF_Pw = 0.9 [m2]	Herkunft ausländ. Fahrzeuge: D
LW-Gewicht = 22.0 [t]	cW*FF_LW = 5.0 [m2]	Anteil ausländ. Pw an ges. Pw-Zahl: 0.0 [%]
Anteil Pw mit Diesel-Motoren: 20.0 [%]		Anteil ausländ. LW an ges. LW-Zahl: 0.0 [%]

Strahlventilator-Typ

VOITH 90, Typ R	Qs-netto = 20.0 [m3/s]
k-Wand = 1.2	Vs-netto = 26.7 [m/s]

Verkehrsfall	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spur 1	nPw [Pw/h]	334	667	1003	1338	334	667	1003	1338	950	0
	nLw [LW/h]	18	35	53	70	18	35	53	70	50	0
	Art, Vf [km/h]	B 60	B 60	B 60	B 60	B 30	B 30	B 30	B 30	F -10	F 0
Spur 2	nPw [Pw/h]	1338	1003	667	334	1338	1003	667	334	0	142
	nLw [LW/h]	70	53	35	18	70	53	35	18	0	8
	Art, Vf [km/h]	B -60	B -60	B -60	B -60	B -30	B -30	B -30	B -30	F 0	F 0

Für Vf = 0 [km/h] Anzahl in [Fz/km]; Vf = 1.0 * Vf_zul

Zulässige Konzentrationen

COmax [ppm]	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	30.0	30.0
Kmax [1/m]	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0030	0.0030

Resultate											
CO-Emission [m3/h]	3.1	2.8	2.5	2.2	4.0	3.8	3.6	3.4	4.5	2.8	
Trübe-Emission [m2/h]	364.0	346.1	327.9	310.5	421.0	405.1	388.9	373.4	424.7	383.5	
Qsoll CO [m3/s]	12.2	11.1	9.9	8.8	16.0	15.2	14.4	13.6	14.4	26.1	
Qsoll Trübe [m3/s]	20.2	19.2	18.2	17.2	23.4	22.5	21.6	20.7	39.3	35.5	
u_soll [m/s]	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.9	0.8	
Selbstlüftung											
Q_SL +:A-->B [m3/s]	-157.3	-61.4	+66.3	+160.9	-94.3	-35.1	+35.0	+94.3	-58.4	+0.0	
u_SL +:A-->B [m/s]	-3.4	-1.3	+1.4	+3.5	-2.1	-0.8	+0.8	+2.0	-1.3	+0.0	
Notwendiger Schub											
Schub +:A-->B [kN]	+6.44	+2.46	-1.59	-5.56	+3.70	+1.66	-0.41	-2.45	+1.82	+0.22	
Schub +:B-->A [kN]	-5.30	-1.38	+2.61	+6.53	-2.37	-0.39	+1.64	+3.62	-0.29	+0.22	
Anzahl Strahlventilatoren											
n_SV +:A-->B [-]	+12.5	+4.8	-3.0	-10.5	+7.2	+3.2	-0.8	-4.6	+3.6	+0.4	
n_SV +:B-->A [-]	-10.0	-2.6	+5.1	+12.7	-4.5	-0.7	+3.2	+7.0	-0.5	+0.4	

Angaben für emissionsunabhängige, vorgegebene Strömung

uWahl [m/s]	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5
-------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Notwendiger Schub

Schub +:A-->B [kN]	+8.13	+4.15	+0.10	-3.88	+5.34	+3.26	+1.16	-0.91	+2.66	+0.82	
Schub +:B-->A [kN]	-3.70	+0.27	+4.32	+8.30	-0.91	+1.16	+3.26	+5.34	+0.19	+0.82	

Anzahl Strahlventilatoren

n_SV +:A-->B [-]	+16.5	+8.4	+0.2	-7.0	+10.8	+6.6	+2.3	-1.7	+5.4	+1.7	
n_SV +:B-->A [-]	-6.7	+0.6	+8.8	+16.8	-1.7	+2.3	+6.6	+10.8	+0.4	+1.7	

Tabelle G.1: Frischluftbedarf und Selbstlüftung im Tunnel Starnberg für die ausgewählten Verkehrsfälle nach Tabelle 7.1, Bezugsjahr 2010

FLB Version NT1.6 19.06.2001

CH:RL2001, D:RABT-00, A:RVS97, F:PIARC91, I:Italia99

Projekt: TUNNEL STARNBERG

File: d:\prog_t\data\STARN04.OUT

12/12/2001 10:06:13

Land: D Bezugsjahr: 2015

Tunnelnennungen				Luftdaten				
Gesamtlänge	Ltot =	1910 [m]	Höhe	H =	590 [müM]	Temperatur	T =	280 [K]
Hydr. Durchmesser	Dh =	6.40 [m]	Querschnitt	FT =	46.0 [m2]	Druck	P =	94453 [Pa]
Wandrauhigkeit	Ks =	2.00 [mm]	Reibungskoeff.	Lambda =	0.0151 [-]	Dichte	ro =	1.177 [kg/m3]
Einströmverluste	zetaA =	0.6 [-]		zetaB =	0.6 [-]	Zähigkeit	nue =	.1487 [cm2/s]
Portaldrücke	PA =	0 [Pa]		PB =	0 [Pa]			

Abschnitt	Länge L [m]	Steigung i [%]	Vf_LW_lim [km/h]
1	1460	-3.50	79
2	450	3.50	58

Fahrzeugdaten		Herkunft ausländ. Fahrzeuge: D	
Pw-Gewicht =	1.2 [t]	cW*FF_Pw =	0.9 [m2]
LW-Gewicht =	22.0 [t]	cW*FF_LW =	5.0 [m2]
Anteil Pw mit Diesel-Motoren:	20.0 [%]	Anteil ausländ. Pw an ges. Pw-Zahl:	0.0 [%]
		Anteil ausländ. LW an ges. LW-Zahl:	0.0 [%]

Strahlventilator-Typ		Qs-netto =	20.0 [m3/s]
VOITH 90, Typ R		Vs-netto =	26.7 [m/s]
k-Wand =	1.2		

Verkehrsfall	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Spur 1 nPw	[Pw/h]	336	673	1009	1345	336	673	1009	1345	950	0
nLw	[LW/h]	18	36	53	71	18	36	53	71	50	0
Art, Vf	[km/h]	B 60	B 60	B 60	B 60	B 30	B 30	B 30	B 30	F -10	F 0
Spur 2 nPw	[Pw/h]	1345	1009	673	336	1345	1009	673	336	0	142
nLw	[LW/h]	71	53	36	18	71	53	36	18	0	8
Art, Vf	[km/h]	B -60	B -60	B -60	B -60	B -30	B -30	B -30	B -30	F 0	F 0

Für Vf = 0 [km/h] Anzahl in [Fz/km]; Vf = 1.0 * Vf_zul

Zulässige Konzentrationen		70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	30.0	30.0
COmax	[ppm]										
Kmax	[1/m]	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.0030	0.0030

Resultate											
CO-Emission	[m3/h]	2.7	2.5	2.2	2.0	3.6	3.4	3.2	3.0	3.9	2.5
Trübe-Emission	[m2/h]	272.7	261.4	250.3	238.8	300.7	290.8	281.1	271.1	304.8	297.4
Qsoll CO	[m3/s]	10.8	9.8	8.8	7.8	14.2	13.5	12.7	12.0	36.3	22.8
Qsoll Trübe	[m3/s]	15.2	14.5	13.9	13.3	16.7	16.2	15.6	15.1	28.2	27.5
u_soll	[m/s]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.8	0.6
Selbstlüftung											
Q_SL +:A-->B	[m3/s]	-157.8	-60.3	+65.3	+161.3	-94.6	-34.5	+34.4	+94.5	-58.4	+0.0
u_SL +:A-->B	[m/s]	-3.4	-1.3	+1.4	+3.5	-2.1	-0.7	+0.7	+2.1	-1.3	+0.0
Notwendiger Schub											
Schub +:A-->B	[kN]	+6.34	+2.30	-1.68	-5.72	+3.53	+1.46	-0.57	-2.64	+1.69	+0.13
Schub +:B-->A	[kN]	-5.49	-1.49	+2.46	+6.46	-2.59	-0.56	+1.45	+3.48	-0.38	+0.13
Anzahl Strahlventilatoren											
n_SV +:A-->B	[-]	+12.3	+4.4	-3.2	-10.8	+6.8	+2.8	-1.1	-5.0	+3.3	+0.3
n_SV +:B-->A	[-]	-10.4	-2.8	+4.8	+12.5	-4.9	-1.0	+2.8	+6.7	-0.7	+0.3

Angaben für emissionsunabhängige, vorgegebene Strömung		+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5
uWahl	[m/s]										

Notwendiger Schub		+8.19	+4.14	+0.14	-3.92	+5.38	+3.27	+1.19	-0.93	+2.66	+0.82
Schub +:A-->B	[kN]										
Schub +:B-->A	[kN]	-3.74	+0.32	+4.31	+8.37	-0.93	+1.19	+3.27	+5.38	+0.19	+0.82

Anzahl Strahlventilatoren		+16.6	+8.4	+0.3	-7.1	+10.9	+6.6	+2.4	-1.7	+5.4	+1.7
n_SV +:A-->B	[-]										
n_SV +:B-->A	[-]	-6.8	+0.6	+8.7	+17.0	-1.7	+2.4	+6.6	+10.9	+0.4	+1.7

Tabelle G.2: Frischluftbedarf und Selbstlüftung im Tunnel Starnberg für die ausgewählten Verkehrsfälle nach Tabelle 7.1, Bezugsjahr 2015

H: Layout der Lüftungszentrale

Abbildung H.1: Mittelzentrale für den Tunnel Starnberg, Längsschnitt

Abbildung H.2: Mittelzentrale für den Tunnel Starnberg, Grundriss

Abbildung H.3: Portalzentrale für den Tunnel Starnberg, Längsschnitt

Abbildung H.4: Portalzentrale für den Tunnel Starnberg, Grundriss

Kamin
~12.7m²

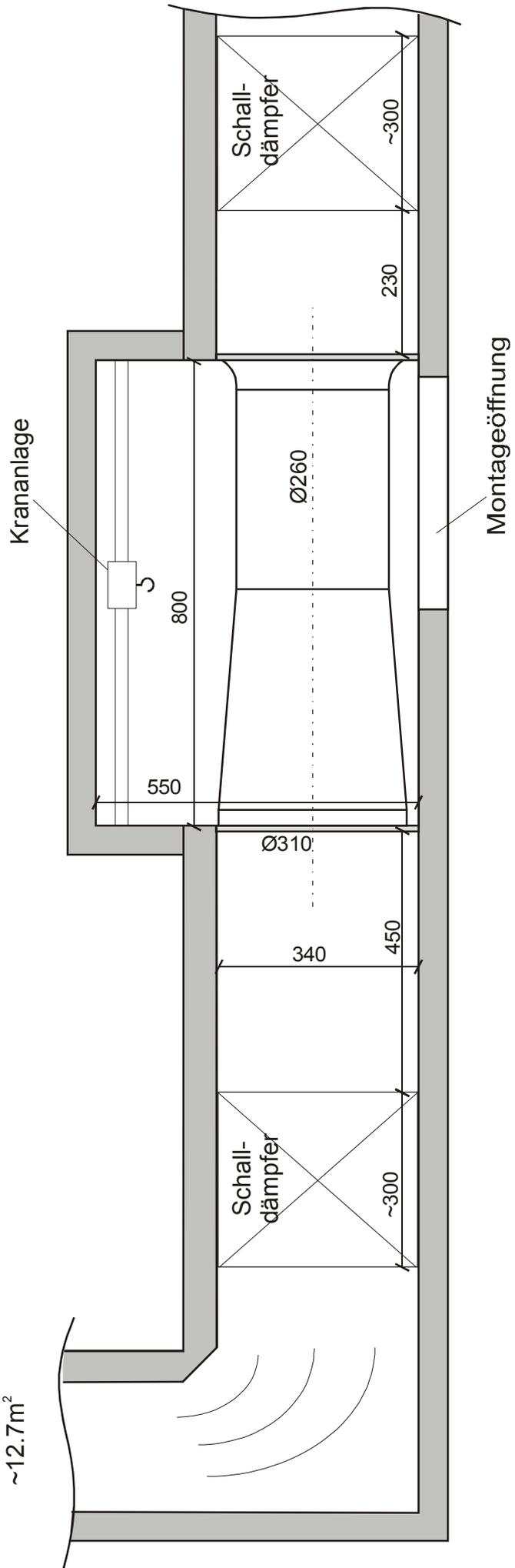


Abbildung H.1: Mittelzentrale für den Tunnel Starnberg, Längsschnitt

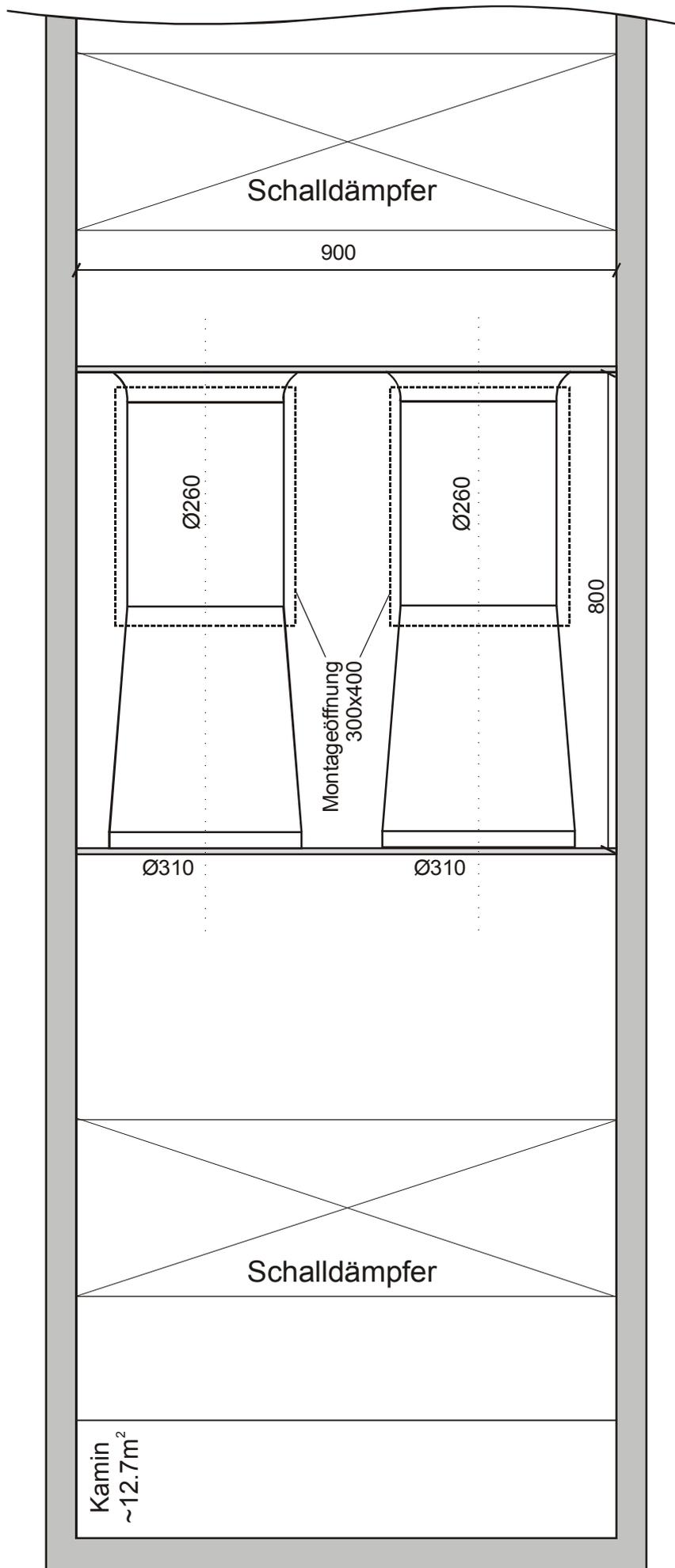


Abbildung H.2: Mittelzentrale für den Tunnel Starnberg, Grundriss

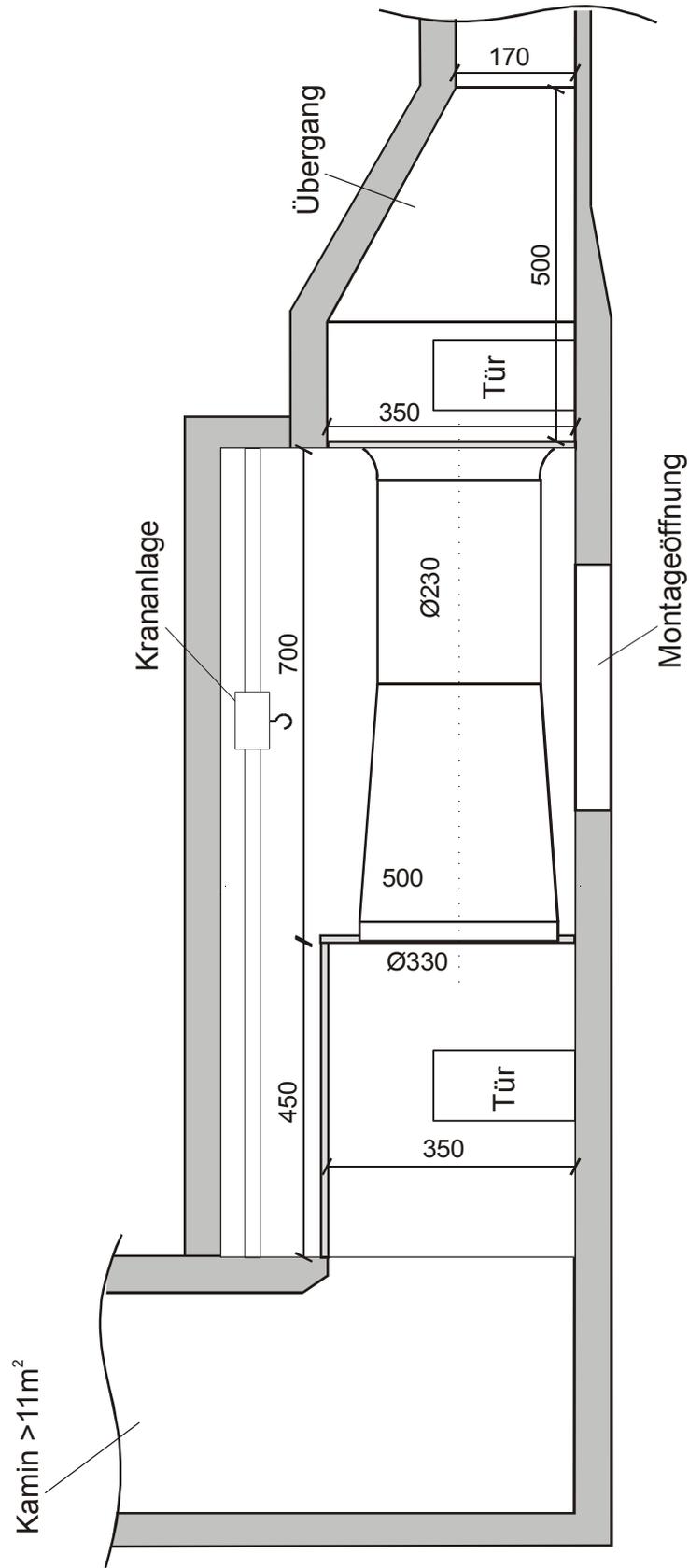


Abbildung H.3: Portalzentrale für den Tunnel Starnberg, Längsschnitt

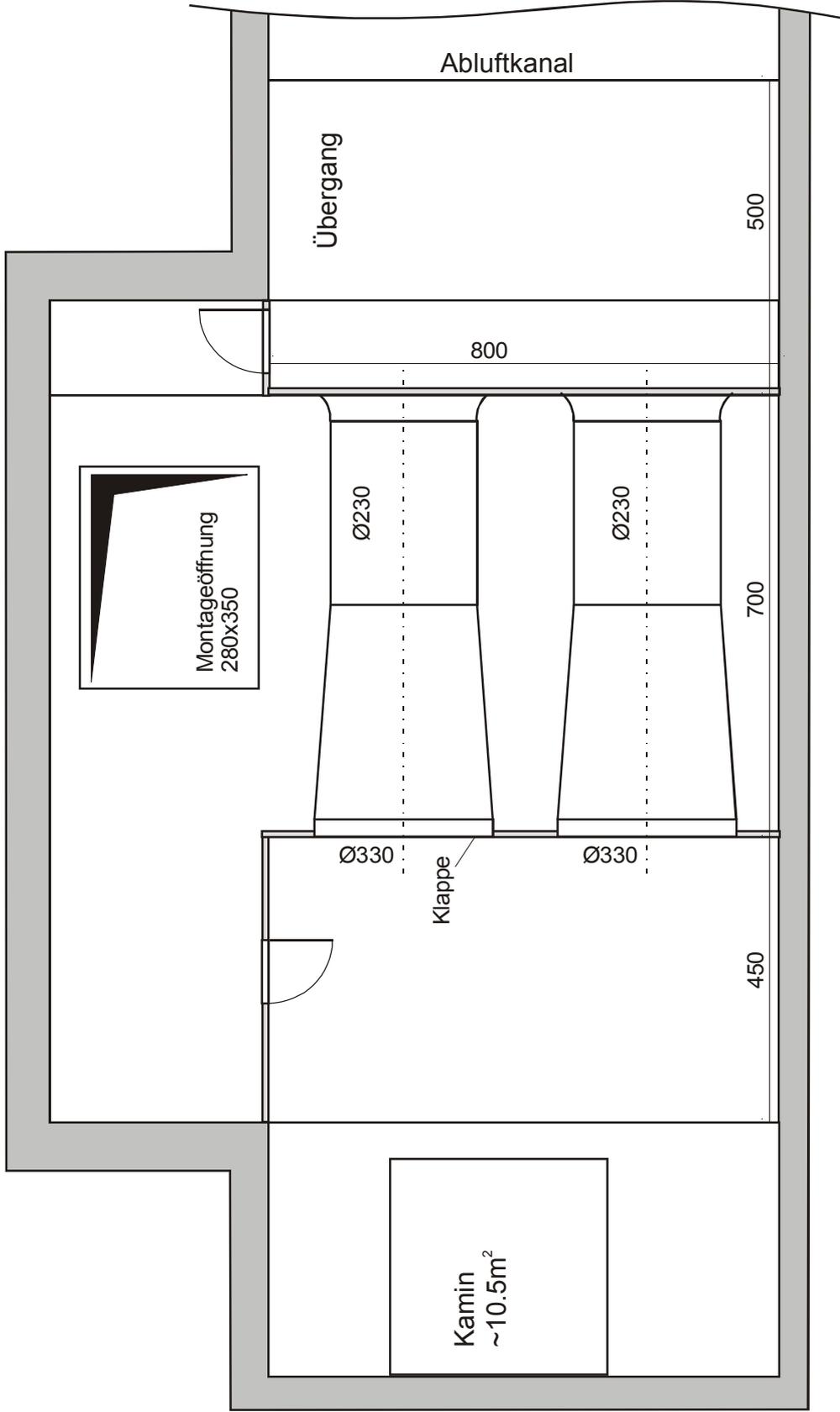


Abbildung H.4: Portalzentrale für den Tunnel Starnberg, Grundriss