

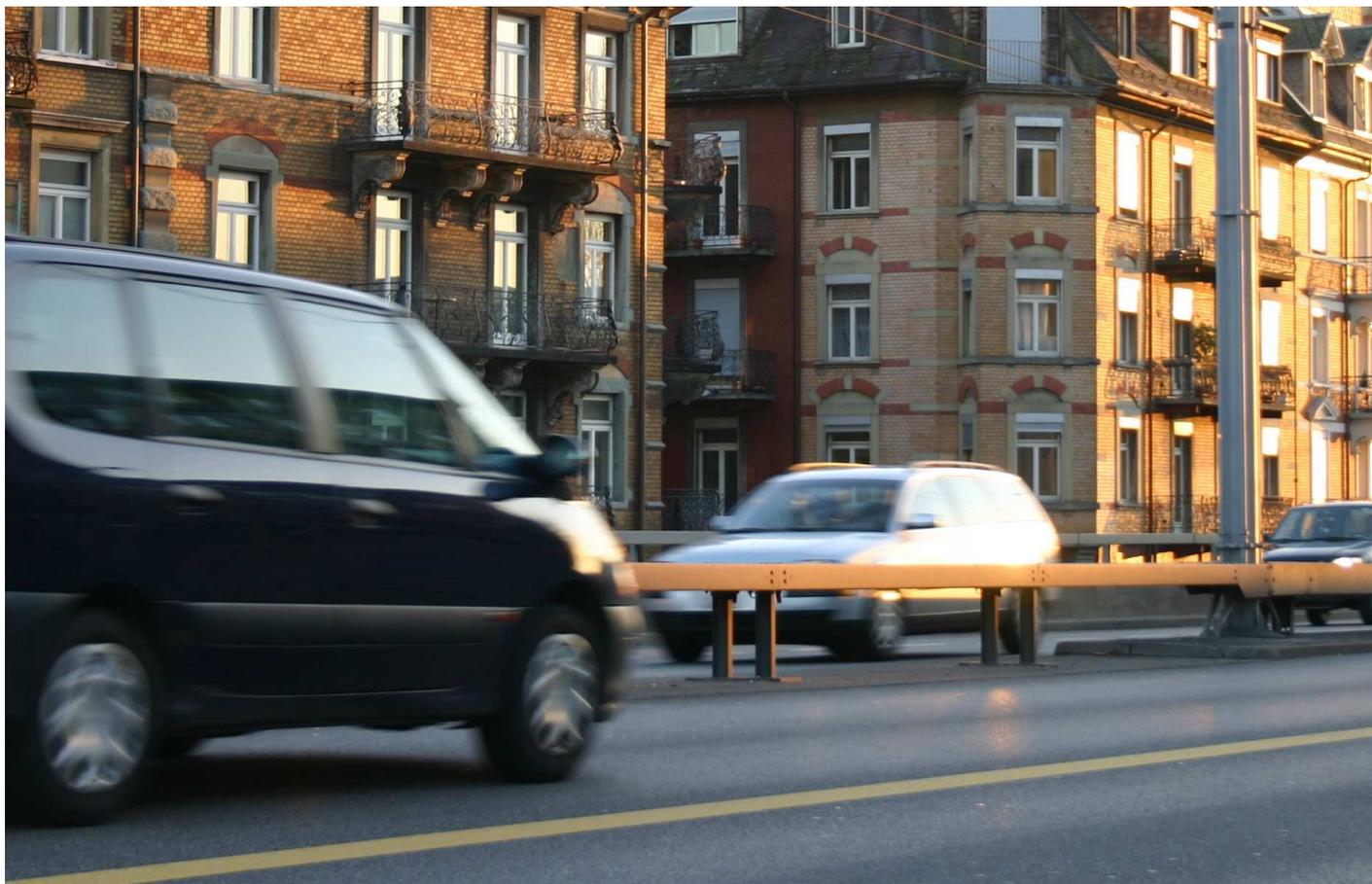
Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 69 93
www.empa.ch



sonROAD18

Modello di calcolo per il rumore stradale - versione ridotta

Empa-Nr. 5214.010948
2018-07-09



Su incarico dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)

Nota editoriale

Committente: Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Divisione Rumore e RNI, CH-3003 Berna
L'UFAM è un ufficio del Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC).

Incaricato: Empa, settore acustica / riduzione del rumore, CH-8600 Dübendorf

Autore/Autrice: Kurt Heutschi, Barbara Locher

Accompagnamento UFAM: Michael Gerber

Avvertenza: Questo rapporto è stato redatto su incarico dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM). L'aggiudicatario è l'unico responsabile del contenuto.

Indicazione bibliografica

Heutschi K, Locher B, 2018: sonROAD18 - Modello di calcolo per il rumore stradale - Versione ridotta.

Traduzione

Vincenza Barbaro, Enrico Guglielmini und Paolo Muscionico, IFEC ingegneria SA, Rivera.

Download PDF

La presente versione ridotta si focalizza sui capitoli principali del rapporto conclusivo sonROAD18 ed è disponibile in lingua tedesca, francese e italiana. È scaricabile, assieme al rapporto conclusivo completo in versione tedesca, dalla pagina web dell'UFAM (www.bafu.admin.ch).

Non può essere richiesta una versione stampata.

Indice

1	Sommario	7
2	Incarico e team di progetto	8
3	sonROAD18 struttura e ipotesi del modello	9
3.1	Introduzione	9
3.2	Integrazione nel modello CNOSSOS	9
3.3	Classificazione dei veicoli	10
3.4	Altezza della fonte - Effetto del terreno	10
4	Analisi dei dati MFM-U	12
5	Ulteriori misurazioni di eventi singoli e Leq	12
6	Caratteristica di irradiazione sonora verticale	12
7	Dati sulle emissioni di veicoli elettrici e ibridi	12
8	Misure di studio sulla combinabilità degli effetti del pneumatico e della pavimentazione	13
9	Stima dei coefficienti del modello	13
10	Formulazione del modello di emissione di sonROAD18	14
10.1	Condizioni di riferimento	14
10.2	Altezza della sorgente	14
10.3	Dati di input del modello	14
10.4	Categorie di veicoli	14
10.5	Potenza sonora irradiata	16
10.6	Rumore del motore e rumore dovuto al rotolamento in livello A in funzione della velocità	22
10.7	Pneumatici estivi e invernali	24
10.8	Situazioni di coda	24
10.9	Variazione di emissione per singolo veicolo	26
10.10	Stima di Leq a 1 m di distanza	26
11	Convertitore SWISS10	28
11.1	Introduzione	28
11.2	Classificazione delle strade	28
11.3	Database	29
11.4	Analisi	29
11.5	Funzione di densità di probabilità degli intervalli di tempo	30
12	Validazione del modello	32
12.1	Misurazioni di validazione	32
12.2	Calcolo del livello energetico medio Leq	33
12.3	Risultati della validazione	34

13 Incertezza del modello	37
13.1 Errori del modello	37
13.2 Errore nei dati di input	37
14 Esempi di calcolo	39
15 Caratterizzazione della pavimentazione tramite misurazioni SPB	40
15.1 Concetto	40
15.2 Documentazione	40
15.3 Analisi	41
16 Caratterizzazione della pavimentazione tramite misurazioni SEM	42
16.1 Concetto	42
16.2 Documentazione	42
16.3 Analisi	42
17 Caratterizzazione della pavimentazione tramite misurazioni CPX	44
18 Misurazione di nuovi tipi di veicoli	45
19 Interfaccia con i modelli di propagazione	45
20 Confronto con StL-86+	46
20.1 Dipendenza delle emissioni delle automobili dalla velocità	46
20.2 Calcolo degli scenari	46
21 Stima del livello massimo sonoro del passaggio con ponderazione A	49
21.1 Basi	49
21.2 Analisi dei dati	49
Bibliografia	51
A Panoramica degli allegati della relazione finale	54

1 Sommario

Al fine di considerare i più recenti cambiamenti del parco veicoli in circolazione e di aumentare il grado di dettaglio nella descrizione delle fonti di rumore, l'Empa ha sviluppato, su incarico dell'UFAM, il nuovo modello di calcolo del rumore stradale sonROAD18. Esso si basa in buona parte sui contenuti del modello europeo CNOSSOS, tuttavia fa capo alle categorie di veicoli SWISS10 in uso in Svizzera ed integra inoltre i veicoli a propulsione elettrica rispettivamente ibrida. Per le categorie di veicoli speciali viene inoltre proposta una procedura per la determinazione sperimentale dei parametri del modello. Diversamente da CNOSSOS, sonROAD18 è formulato in bande di terzi d'ottava e considera una modalità di propagazione verticale non circolare. Il modello descrive la potenza acustica emessa da un veicolo rappresentativo della rispettiva categoria in funzione della velocità. Tra gli altri fattori che influenzano le emissioni vengono considerate la pavimentazione, la pendenza longitudinale della strada e la temperatura dell'aria.

La calibrazione dei parametri del modello è stata eseguita sulla base di un vasto campione di misurazioni di singoli passaggi lungo le autostrade ed è stata completata da misurazioni per la fascia di velocità compresa tra i 30 e gli 80 km/h. Per la caratterizzazione acustica dei veicoli è stato utilizzato il livello sonoro del singolo passaggio. La ripartizione in rumore del motore e rumore dovuto al rotolamento è avvenuta automaticamente nel processo di ottimizzazione dei parametri tramite applicazione a priori delle seguenti ipotesi: a) il fattore di correzione per la pavimentazione da applicare al rumore dovuto a rotolamento è indipendente dalla velocità e dalla categoria dei veicoli; b) il rumore del motore è influenzato unicamente dalla velocità e dalla pendenza della strada. L'analisi mostra come il rumore di rotolamento risulti essere dominante al di sopra dei 20-30 km/h per i veicoli leggeri, al di sopra dei 40-50 km/h per i veicoli pesanti e al di sopra dei 60 km/h per le motociclette.

Dalla validazione risulta, nel caso di conoscenza completa dei dati di partenza, una deviazione standard tra modello e misurazione pari a 1.5 dB(A). Il fattore d'incertezza maggiore risulta essere il fattore di correzione della pavimentazione il quale, dati di misurazione alla mano, può mostrare delle variazioni di 1 dB(A) a parità di tipologia di pavimentazione.

La formulazione di un'interfaccia con i modelli di propagazione del rumore ISO 9613-2 e sonX permette un'integrazione semplice di sonROAD18 nei modelli di calcolo delle immissioni. In caso di utilizzo di dati di partenza con basso grado di dettaglio, è disponibile un convertitore SWISS10 il quale, sulla base della tipologia di strada e del traffico giornaliero medio (TGM) diurno e notturno, stima il volume di traffico in categorie SWISS10.

Caratteristiche principali di sonROAD18:

- corrisponde allo stato dell'arte / rispecchia le conoscenze attuali
- considera la flotta di autoveicoli, compresi i relativi pneumatici, attualmente in circolazione in Svizzera
- l'efficacia di provvedimenti alla fonte è quantificabile con più precisione
- la composizione modulare permette l'utilizzo di diversi modelli di propagazione del rumore
- considera una categorizzazione dettagliata dei veicoli secondo SWISS10 estendibile a veicoli ibridi ed elettrici
- fattore di correzione spettrale per la pavimentazione indipendente dalla velocità e dalla categoria dei veicoli
- risoluzione della frequenza in bande di terzi d'ottava per una considerazione più precisa dell'attenuazione dovuta alla distanza
- permette una valutazione basata sulle velocità effettive (per categoria di veicoli)
- permette la simulazione di accelerazioni
- è compatibile in larga misura con il modello europeo CNOSSOS

2 Incarico e team di progetto

L'UFAM, Divisione Rumore e RNI, ha incaricato tramite contratto del 5 ottobre 2015, l'Empa, settore acustica / riduzione del rumore, di sviluppare un nuovo modello di calcolo delle emissioni del rumore stradale. Questo modello deve consentire la determinazione delle emissioni acustiche dei veicoli ammessi sulla rete stradale svizzera considerando una valutazione secondo l'ordinanza contro l'inquinamento fonico OIF.

Per l'elaborazione del modello di propagazione del rumore e l'analisi di domande particolari ci si è potuti avvalere di una vasta quantità di dati esterni. Come dati di base per l'analisi sono stati utilizzati i valori MFM-U del monitoraggio del rumore stradale del 2015 rilevati in alta definizione temporale. Questi sono stati integrati con dati dell'USTRA, del TCS, dei Cantoni Argovia, Grigioni e Zurigo, della città di Zurigo, degli studi d'ingegneria Basler & Hofmann AG, Grolimund + Partner AG e IFEC ingegneria SA e sono stati completati con ulteriori misurazioni effettuate dall'Empa.

La direzione del progetto era composta come segue:

UFAM

Committente: UFAM, Urs Walker, Divisione Rumore e RNI

Capo progetto: Michael Gerber, Divisione Rumore e RNI

Empa

Capo progetto: Kurt Heutschi

Team di progetto: Barbara Locher e Katja Henz

Ulteriore aggiudicatario integrato nel progetto: Grolimund + Partner AG, CH-3006 Berna, valutazione della banca dati di recenti misurazioni SPB per la validazione del modello.

L'UFAM ha costituito un gruppo di accompagnamento composto dai seguenti membri:

Urs Walker, UFAM, Divisione Rumore e RNI, presidenza

Dario Bozzolo, IFEC, IFEC ingegneria SA

Andreas Catillaz, UFAM, Divisione Rumore e RNI

Hans-Peter Gloor, Ct. AG, Departement Bau, Verkehr und Umwelt

Sophie Hoehn, UFAM, Divisione Rumore e RNI

Dominique Luy, Ct. VD, Direction générale de l'environnement

Yves Pillonel, USTRA, Standard e sicurezza infrastrutture

Stefanie Rüttener, Città di Zurigo, Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich UGZ

Marco Steiger, Ct. TI, Dipartimento del territorio

Georg Thomann, Ct. GR, Ufficio per la natura e l'ambiente

I membri del gruppo di accompagnamento del progetto sonROAD18 hanno assunto in particolare i seguenti compiti:

- accompagnamento specialistico nell'ottica della verifica della qualità
- portare le proprie esperienze maturate con i modelli di calcolo del rumore stradale in uso sin ora
- servizio di consulenza per l'UFAM in relazione a dati di base mancanti o insufficienti
- servizio di consulenza per l'UFAM in merito ai requisiti delle implementazioni nel modello sonROAD18

3 sonROAD18 struttura e ipotesi del modello

3.1 Introduzione

Secondo l'ordinanza contro l'inquinamento fonico OIF [1], allegato 2, l'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM) raccomanda alle autorità esecutive l'utilizzo di metodi di calcolo idonei e che rispecchino lo stato dell'arte. Attualmente per il calcolo del rumore stradale in Svizzera sono disponibili i modelli di calcolo StL86+ [2] e sonRoad [3]. Il modello StL86+ è ampiamente diffuso e, grazie alla sua semplicità d'uso e alla sua precisione relativamente buona in situazioni standard, gode di un elevato consenso. Il modello di calcolo del rumore stradale sonRoad, sviluppato dall'Empa, è stato emanato nel 2004. Nella prassi è stato impiegato poco siccome necessita di dati di base che spesso non erano disponibili.

Il modello StL86+ avrà presto trent'anni ed anche la pubblicazione di sonRoad risale ormai a più di dieci anni fa. Entrambi i modelli non rispecchiano più lo stato dell'arte e delle conoscenze attuali. Provvedimenti alla fonte come riduzioni della velocità nelle zone a velocità ridotta, pavimentazioni a bassa emissività e pneumatici silenziosi non possono essere modellati, o solo in minima parte, nei modelli di calcolo del rumore stradale esistenti.

Il modello sonROAD18 ha l'obiettivo di permettere una determinazione precisa delle emissioni foniche prodotte dai veicoli ammessi sulla rete stradale svizzera considerando una valutazione secondo l'ordinanza contro l'inquinamento fonico OIF, allegato 3. SonROAD18 tiene conto del più recente sviluppo della flotta di veicoli in circolazione sulle strade svizzere e considera anche il grado di dettaglio più elevato delle informazioni di traffico disponibili.

In un paragone diretto con StL-86+, sonROAD18 presenta i seguenti vantaggi:

- ambito di validità della velocità ampliato, in particolare al di sotto dei 50 km/h
- valori d'emissione disponibili per tutte le categorie SWISS10 e basati sulla flotta di veicoli attuale
- ripartizione delle emissioni nelle componenti: rumore del motore e rumore dovuto al rotolamento, al fine di modellare più precisamente le correzioni della pendenza stradale e della pavimentazione, in particolare a basse velocità
- possibilità di calcolo di scenari ampliate considerevolmente; per esempio per la valutazione degli effetti di pneumatici silenziosi, della mobilità elettrica o di limiti di velocità differenti per singole categorie di veicoli.

3.2 Integrazione nel modello CNOSSOS

La valutazione delle emissioni in sonROAD18 si orienta al modello europeo CNOSSOS [4] e utilizza la potenza sonora emessa da un veicolo quale valore caratteristico di interfaccia con il modello di propagazione del rumore. Ci si discosta dal modello CNOSSOS nei seguenti aspetti:

- Nell'impostazione delle categorie di veicoli in quanto sonROAD18 si basa sulle categorie SWISS10. In questo modo si rende possibile un collegamento diretto con i dati rilevati dai contatori automatici.
- Nella rappresentazione spettrale, in quanto sonROAD18 ipotizza un grado di dettaglio in bande di terzi d'ottava. In questo modo è possibile avere un'interfaccia con i modelli di calcolo della propagazione del rumore che si basano sulla formulazione in bande di terzi d'ottava.

- Nella caratteristica di irradiazione, in quanto sonROAD18 ipotizza una direttività non circolare nella propagazione verticale. In questo modo si considera un fenomeno sistematico che porta a differenze di immissioni importanti in corrispondenza di opere di protezione fonica prossime alla strada oppure presso ricettori in posizione sopraelevata.
- Nella formulazione dell'effetto della pavimentazione, in quanto sonROAD18 applica la correzione per la pavimentazione unicamente al rumore dovuto al rotolamento. Essa viene in seguito adottata in modo identico per tutte le categorie di veicoli indipendentemente dalla velocità. In questo modo si ottiene una semplificazione nell'approccio, la quale tuttavia non ha un influsso di rilievo nell'ambito della precisione raggiungibile.
- Nella determinazione della temperatura di riferimento, la quale in sonROAD18 viene assunta pari a 10 °C. Tale temperatura corrisponde approssimativamente alla media annuale rilevata sull'altipiano svizzero¹; in questo modo, per calcoli su base annua, non è necessario apportare alcuna correzione della temperatura.
- Nella correzione dovuta all'accelerazione nei pressi di incroci provvisti di impianti semaforici oppure rotatorie. In sonROAD18 la correzione utilizzata in CNOSSOS viene trascurata rispettivamente, in caso di applicazioni particolari, sostituita da una simulazione del processo di accelerazione riconducibile ad una pendenza stradale equivalente.

3.3 Classificazione dei veicoli

I veicoli che transitano in Svizzera da considerare nel calcolo del rumore stradale vengono classificati per quanto possibile secondo lo schema di classificazione SWISS10 [5], completato dalle categorie con sistemi di propulsione alternativi.

Cat. SWISS10	Descrizione	CNOSSOS Cl.	Descrizione
1	Bus	3	Veicoli pesanti
1b	Bus con trazione ibrida/elettrica		
2	Moto	4b	Moto
3	Autovetture	1	Veicoli leggeri
3b	Autovetture con motore ibrido		
3c	Autovetture con motore elettrico		
4	Autovetture con rimorchio	1	Veicoli leggeri
5	Furgoni fino a 3.5t	1	Veicoli leggeri
6	Furgoni fino a 3.5t con rimorchio	1	Veicoli leggeri
7	Furgoni fino a 3.5t con semirimorchio	1	Veicoli leggeri
8	Camion	3	Veicoli pesanti
9	Autotreni	3	Veicoli pesanti
10	Semirimorchi	3	Veicoli pesanti
11	Camion con trazione elettrica		

Tabella 3.1: Categorie SWISS10 (ampliate) e rispettive classi CNOSSOS.

L'emissione dei tram (veicoli su rotaia) non viene specificata in sonROAD18 bensì in sonTRAM.

3.4 Altezza della fonte - Effetto del terreno

CNOSSOS modella tutti i veicoli, indipendentemente dalla categoria, come sorgente puntiforme posta ad un'altezza di 0.05 m sopra al manto stradale. Nel corrispettivo calcolo del modello di interferenza tra rumore diretto e rumore riflesso dal terreno risulta, considerando una geometria di riferimento con un punto di misurazione posto ad una distanza di 7.5 m dal centro corsia e ad un'altezza di 1.2 m dal terreno, un effetto del terreno stesso che, fino a frequenze elevate, amplifica il rumore. Tuttavia all'aumento dell'altezza del ricettore,

¹Media annuale del 2017 per il nord delle alpi al di sotto dei 1000 m s.l.m.: 9.7 °C, Fonte: MeteoSvizzera, Begert M., Frei C., Area-mean temperatures of Switzerland. DOI: 10.18751/Climate/Timeseries/CHTM/1.0, 10.02.2018.

il primo minimo di interferenza si sposta verso frequenze più basse, cosicché in prossimità della fonte, l'effetto del terreno porta ad una forte dipendenza dell'immissione dalla geometria (Figura 3.1).

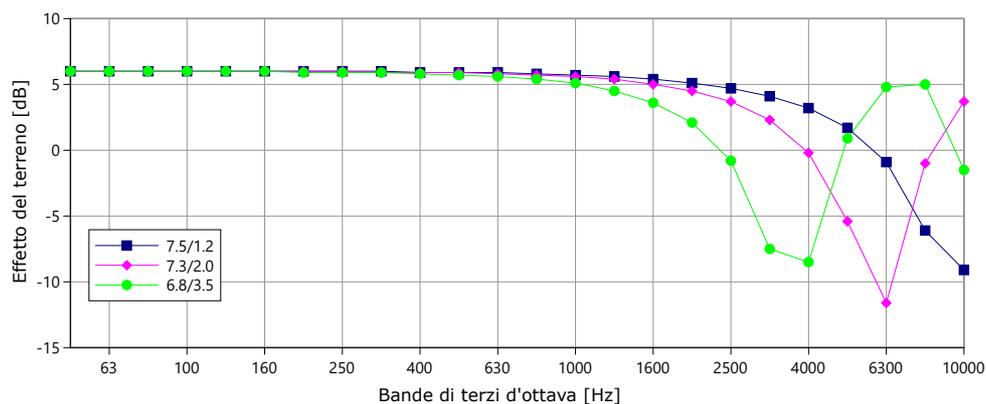


Figura 3.1: effetto del terreno in funzione della frequenza per una sorgente puntiforme posta a 0.05 m dal suolo e per un ricevitore posto a diverse altezze, ma a distanza costante dalla fonte.

La tabella 3.2 mostra l'incremento del livello sonoro causato dall'effetto del terreno considerando un passaggio veicolare completo ed un ricevitore ubicato in diverse posizioni. Per il calcolo è stato adottato quale sorgente uno spettro per autovetture in transito a 80 km/h, secondo CNOSSOS, a condizioni di riferimento.

h_q	h_m	d_h	d	D_{gr}
0.05	1.2 m	7.5 m	7.6 m	5.4 dB(A)
0.05	2.0 m	7.3 m	7.6 m	5.0 dB(A)
0.05	3.5 m	6.8 m	7.6 m	3.9 dB(A)
0.05	5.0 m	5.7 m	7.6 m	2.6 dB(A)
0.45	1.2 m	7.5 m	7.6 m	1.3 dB(A)

Tabella 3.2: effetto del terreno D_{gr} in dB(A) per un passaggio veicolare completo di una sorgente puntiforme omnidirezionale posta ad un'altezza h_q di 0.05 m rispettivamente 0.45 m (sonRoad [3]) e diverse altezze del microfono h_m nonché diverse distanze orizzontali d_h , corrispondenti ad una distanza effettiva pari a $d = 7.6$ m.

Per eliminare la forte dipendenza dalla geometria, come riscontrato in tabella 3.2 è stato deciso di considerare l'effetto delle riflessioni sulla superficie stradale in modo sommario ed indipendentemente dalla frequenza, e di conseguenza di seguire la definizione della fonte di rumore di CNOSSOS, ossia considerare l'ipotesi di una *fonte puntiforme posta ad un'altezza di 0.05 m a condizioni di campo libero emisferico*. Questo equivale ad ipotizzare un effetto del terreno pari a +3 dB e deve essere opportunamente considerato nella formulazione di un'interfaccia con un modello di propagazione del rumore.

4 Analisi dei dati MFM-U

Per ulteriori informazioni consultare il rapporto finale completo di sonROAD18 nel quale è raccolta la documentazione utilizzata per lo sviluppo del modello, con i dati di base raccolti presso le postazioni MFM-U di Camignolo, Moleno, Reiden e Rothenbrunnen. È inoltre descritta la strategia di analisi per la determinazione dell'energia dell'evento (passaggio di un singolo veicolo) e la relativa potenza sonora irradiata.

5 Ulteriori misurazioni di eventi singoli e Leq

Per ulteriori informazioni consultare il rapporto finale completo di sonROAD18 nel quale sono descritte le misurazioni supplementari delle emissioni acustiche stradali eseguite dall'Empa a basse rispettivamente medie velocità per l'adattamento e la validazione dei parametri del modello.

6 Caratteristica di irradiazione sonora verticale

Per ulteriori informazioni consultare il rapporto finale completo di sonROAD18 nel quale è raccolta la documentazione relativa alle misurazioni effettuate dall'Empa per studiare le caratteristiche di irradiazione sonora verticale dei veicoli stradali e l'elaborazione di una relazione volta a descrivere la diminuzione del livello sonoro in funzione della frequenza all'aumentare dell'angolo di elevazione.

7 Dati sulle emissioni di veicoli elettrici e ibridi

Per ulteriori informazioni consultare il rapporto finale completo di sonROAD18 nel quale è riportato uno studio sull'emissione acustica di veicoli elettrici basato sulla letteratura disponibile. È inoltre riportato un riassunto di un'indagine condotta presso produttori/importatori di automobili sulla possibile particolarità del primo set di pneumatici montati sulle autovetture ad azionamento elettrico.

8 Misure di studio sulla combinabilità degli effetti del pneumatico e della pavimentazione

Per ulteriori informazioni consultare il rapporto finale completo di sonROAD18 nel quale sono riportate la descrizione e l'analisi delle misurazioni effettuate dall'Empa su quattro pavimentazioni diverse con veicolo identico, ma dotato di quattro tipi di pneumatici differenti per chiarire l'effetto cumulativo della riduzione del livello sonoro con pavimentazioni fonoassorbenti e pneumatici silenziosi.

9 Stima dei coefficienti del modello

Si riporta la descrizione delle ipotesi formulate e della strategia di curve fitting per la determinazione dei coefficienti del modello, nonché un elenco delle campagne di misurazione. Per ulteriori informazioni consultare il rapporto finale completo di sonROAD18.

10 Formulazione del modello di emissione di sonROAD18

Il presente capitolo riprende le ipotesi formulate nel capitolo 3 e descrive in modo completo il modello di emissione sonROAD18 come pure l'impostazione dei parametri.

10.1 Condizioni di riferimento

sonROAD18 si basa sulle seguenti condizioni di riferimento:

- corsia asciutta, orizzontale e con una pavimentazione ACMR8 o SDA8-12
- temperatura dell'aria di 10°
- velocità costante del veicolo di 70 km/h
- pneumatici tipici in uso al momento dello sviluppo del modello

10.2 Altezza della sorgente

L'altezza della sorgente è fissata a 0.05 m al di sopra della superficie stradale per tutte le categorie di veicoli e tutte le componenti di rumore.

10.3 Dati di input del modello

Per calcolare le emissioni acustiche della strada occorre conoscere i seguenti dati per corsia o per direzione di marcia:

- il volume di traffico orario medio $N[c]$ per tutte le categorie c dei veicoli SWISS10
- la velocità $v[c]$ per tutte le categorie dei veicoli SWISS10, dove però la validità del modello è limitata a $20 \text{ km/h} \leq v \leq 130 \text{ km/h}$
- il tipo rispettivamente l'influenza spettrale della pavimentazione $\Delta L_{W,R,road}[i]$
- la pendenza della strada (dipendente dal segno)
- la temperatura dell'aria

Nei casi in cui non sono disponibili informazioni dettagliate sui volumi di traffico specifici per classe di veicolo, questi dati di input possono essere stimati utilizzando un convertitore SWISS10 (cfr. capitolo 11).

Il modello offre anche la possibilità di considerare una correzione del rumore di rotolamento specifica dello pneumatico e dipendente dalla pavimentazione. Questa possibilità verrà però aggiunta in una fase successiva perchè al momento non ci sono dati disponibili.

10.4 Categorie di veicoli

Per caratterizzare i veicoli che transitano su una strada, vengono utilizzate le categorie c mostrate nella tabella 10.1. Esse si basano su SWISS10 secondo [5] e sono state ampliate con ulteriori quattro categorie di sistemi di propulsione speciale.

I coefficienti del modello A e B sono stati determinati per tutte le categorie di veicoli diffuse e acusticamente rilevanti al momento dello sviluppo del modello. Va notato che la categoria 1 (bus) rappresenta principalmente gli autobus da viaggio. Si rimanda al capitolo 18 per la determinazione dei coefficienti del modello dei veicoli di trasporto urbano e delle categorie 1b, 3b, 3c e 11 e di altre categorie di veicoli speciali.

cat. c SWISS10	Descrizione
1	bus
1b	bus con trazione ibrida / elettrica
2	moto
3	autovetture
3b	autovetture con trazione ibrida
3c	autovetture con trazione elettrica
4	autovetture con rimorchio
5	furgoni fino a 3.5t
6	furgoni fino a 3.5t con rimorchio
7	furgoni fino a 3.5t con semirimorchio
8	camion
9	autotreni
10	semirimorchi
11	camion con trazione elettrica

Tabella 10.1: Categorie SWISS10 (ampliate).

10.5 Potenza sonora irradiata

10.5.1 Rumore totale

La potenza $L_W[c, i]$ irradiata acusticamente da un veicolo di categoria c nella banda di terzi d'ottava con indice i - supponendo che nel calcolo della propagazione si tenga conto della riflessione del terreno in prossimità della sorgente di +3 dB - è formata dalla somma energetica del rumore del motore ($L_{W,P[c,i]}$), del rumore dovuto al rotolamento ($L_{W,R[c,i]}$) e da una correzione per la caratteristica di irradiazione verticale $\Delta L_{W,\theta}[c, i]$:

$$L_W[c, i] = 10 \lg (10^{0.1L_{W,P[c,i]}} + 10^{0.1L_{W,R[c,i]}}) + \Delta L_{W,\theta}[c, i] \quad (10.1)$$

Il termine di irradiazione verticale $\Delta L_{W,\theta}[c, i]$ corrisponde a

$$\Delta L_{W,\theta}[c, f] = D_1[c] \sin(\theta)^3 \cdot (\lg(f) + D_2[c])^3 \quad (10.2)$$

dove f è la frequenza media della banda di terzi d'ottava i , mentre i parametri $D_1[c]$ e $D_2[c]$ sono determinati in base alla categoria del veicolo secondo la tabella 10.2. Si noti che θ è l'angolo di elevazione riferito alla distanza minima e nell'integrazione su di un transito veicolare va assunto come costante.

cat. c SWISS10	$D_1[c]$	$D_2[c]$
1	-0.04	1.6
1b	-0.04	1.6
2	0.0	0.0
3	-0.11	0.0
3b	-0.11	0.0
3c	-0.11	0.0
4	-0.11	0.0
5	-0.11	0.0
6	-0.11	0.0
7	-0.11	0.0
8	-0.04	1.6
9	-0.04	1.6
10	-0.04	1.6
11	-0.04	1.6

Tabella 10.2: Parametri D_1 e D_2 per il calcolo della caratteristica di irradiazione verticale.

10.5.2 Rumore del motore

Il livello di potenza sonora del rumore del motore è dato da:

$$L_{W,P}[c, i] = A_P[c, i] + B_P[c, i] \frac{v[c] - v_{\text{ref}}}{v_{\text{ref}}} + \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] \quad (10.3)$$

dove $v[c]$ è la velocità, $v_{\text{ref}} = 70$ km/h e i parametri A_P (parte costante) e B_P (parte dipendente dalla velocità) sono da estrapolare dalle tabelle 10.3 e 10.4.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	99.5	99.1	91.0	91.0	95.5	92.0	92.0	100.6	101.2	99.7
63	98.0	100.6	87.5	87.5	96.5	92.0	92.0	102.2	106.6	106.2
80	96.0	102.2	86.5	86.5	89.5	92.0	92.0	99.7	102.7	101.2
100	94.5	102.2	84.5	84.5	86.0	91.7	91.7	97.6	97.5	96.2
125	99.0	103.8	83.0	83.0	85.0	91.7	91.7	97.0	99.2	98.0
160	90.0	100.6	83.5	83.5	86.0	91.7	91.7	95.9	95.7	95.7
200	86.5	95.9	82.5	82.5	85.0	91.0	91.0	93.9	93.7	91.4
250	95.5	89.7	83.0	83.0	85.0	91.0	91.0	96.0	96.0	93.8
315	95.0	85.0	82.5	82.5	85.0	91.0	91.0	97.6	97.6	96.5
400	96.5	86.6	81.0	81.0	85.0	91.0	91.0	96.0	96.0	97.4
500	92.0	86.6	81.0	81.0	83.5	91.0	91.0	98.0	98.0	99.1
630	91.0	88.1	83.5	83.5	82.5	91.0	91.0	97.4	97.4	96.2
800	92.0	88.1	82.5	82.5	89.0	93.8	93.8	95.6	95.6	95.9
1000	93.5	85.0	79.0	79.0	85.0	93.8	93.8	89.1	89.1	92.0
1250	87.5	85.0	74.0	74.0	80.5	93.8	93.8	86.0	86.0	90.0
1600	85.0	85.0	72.0	72.0	76.0	90.4	90.4	89.5	89.5	88.3
2000	82.0	83.4	73.5	73.5	79.5	90.4	90.4	90.1	90.1	86.3
2500	83.0	83.4	72.5	72.5	80.5	90.4	90.4	88.3	88.3	85.7
3150	81.5	83.4	73.0	73.0	80.0	84.0	84.0	86.0	86.0	85.2
4000	82.0	83.4	70.0	70.0	78.5	84.0	84.0	84.4	84.4	82.6
5000	79.5	83.4	66.5	66.5	77.0	84.0	84.0	83.4	83.4	77.9
6300	77.0	81.9	64.5	64.5	73.5	77.9	77.9	81.5	81.5	67.1
8000	76.5	80.3	60.5	60.5	70.0	77.9	77.9	79.4	79.4	60.0
10000	60.0	80.3	60.0	60.0	68.0	77.9	77.9	77.8	77.8	60.0

Tabella 10.3: Parametri spettrali A_P della componente del rumore del motore per le categorie SWISS10.

$\Delta L_{W,P,\text{grad}}[c]$ è un termine di correzione legato alla pendenza della strada s indipendente dalla frequenza:

$$c = 3, 4, 5, 6, 7 \quad \rightarrow \quad \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] = \begin{cases} \frac{\min(12\%; -s) - 6\%}{1\%} & : s < -6\% \\ 0 & : -6\% \leq s \leq 2\% \\ \frac{\min(12\%; s) - 2\%}{1.5\%} \cdot \frac{v}{100} & : s > 2\% \end{cases} \quad (10.4)$$

$$c = 1, 8, 9, 10 \quad \rightarrow \quad \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] = \begin{cases} \frac{\min(12\%; -s) - 4\%}{0.5\%} \cdot \frac{v - 10}{100} & : s < -4\% \\ 0 & : -4\% \leq s \leq 0\% \\ \frac{\min(12\%; s)}{0.8\%} \cdot \frac{v}{100} & : s > 0\% \end{cases} \quad (10.5)$$

$$c = 2 \quad \rightarrow \quad \Delta L_{W,P,\text{grad}}[c] = 0 \quad (10.6)$$

Poiché le pendenze hanno effetti diversi nei transiti in salita (s positivo) e in discesa (s negativo), in una previsione tipica, il traffico deve essere diviso equamente nelle due direzioni e calcolato separatamente.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
63	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
80	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
100	3.0	3.5	7.2	7.2	4.7	4.7	4.7	3.0	3.0	3.0
125	3.0	3.5	7.2	7.2	4.7	4.7	4.7	3.0	3.0	3.0
160	3.0	7.8	7.2	7.2	4.7	4.7	4.7	3.0	3.0	3.0
200	4.6	9.7	7.7	7.7	6.4	6.4	6.4	4.6	4.6	4.6
250	4.6	9.0	7.7	7.7	6.4	6.4	6.4	4.6	4.6	4.6
315	4.6	9.0	7.7	7.7	6.4	6.4	6.4	4.6	4.6	4.6
400	5.0	9.0	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
500	5.0	7.8	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
630	5.0	8.3	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
800	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
1000	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
1250	5.0	9.4	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
1600	5.0	7.8	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
2000	5.0	8.9	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
2500	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
3150	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
4000	5.0	9.2	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
5000	5.0	8.3	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
6300	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
8000	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0
10000	5.0	9.7	8.0	8.0	6.5	6.5	6.5	5.0	5.0	5.0

Tabella 10.4: Parametri spettrali B_P della componente del rumore del motore per le categorie SWISS10.

10.5.3 Rumore dovuto al rotolamento

Il livello di potenza sonora del rumore dovuto al rotolamento è dato da:

$$L_{W,R}[c, i] = A_R[c, i] + B_R[c, i] \lg\left(\frac{v[c]}{v_{\text{ref}}}\right) + \Delta L_{W,R,\text{road}}[i] + \Delta L_{W,R,\text{temp}}[c] + \Delta L_{W,R,\text{tire}}[c, \text{Belag}] \quad (10.7)$$

dove $v[c]$ è la velocità, $v_{\text{ref}} = 70$ km/h e i parametri A_R (parte costante) e B_R (parte dipendente dalla velocità) sono da estrapolare dalle tabelle 10.5 e 10.6.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	83.9	84.0	85.5	90.0	87.0	92.6	93.8	87.8	92.6	92.6
63	97.2	93.4	90.5	95.8	89.0	96.4	101.9	90.0	91.8	91.8
80	96.9	93.4	90.5	93.5	91.5	94.9	99.6	90.0	90.7	90.7
100	94.3	90.2	88.4	91.1	88.4	91.3	93.8	89.9	91.8	91.8
125	82.3	88.7	86.5	90.4	90.0	89.4	94.8	90.4	92.5	92.5
160	93.8	85.5	84.9	88.5	89.4	85.7	93.4	91.6	92.2	92.2
200	98.8	93.2	85.3	88.6	88.8	86.0	93.6	92.9	94.2	94.2
250	91.9	93.4	86.0	89.9	89.0	86.1	95.1	91.8	90.9	90.9
315	86.4	91.8	86.0	89.7	88.0	89.5	101.5	97.6	91.3	91.3
400	90.2	90.4	86.6	90.2	87.6	92.2	100.8	99.1	97.2	97.2
500	96.1	88.9	87.2	90.9	89.7	94.0	101.7	98.3	97.8	97.8
630	97.1	87.3	88.2	94.2	91.7	96.2	104.0	101.9	101.4	101.4
800	98.6	87.6	92.5	98.0	94.5	98.9	104.9	103.3	104.4	104.4
1000	97.1	89.2	95.0	97.9	97.0	97.7	102.3	102.1	102.3	102.3
1250	96.1	90.8	94.0	96.9	95.0	97.0	100.0	100.6	100.3	100.3
1600	94.5	89.0	92.3	96.2	93.3	96.6	98.2	98.4	98.3	98.3
2000	92.6	88.9	90.7	93.9	90.7	93.6	95.4	95.7	95.7	95.7
2500	89.8	87.0	87.4	90.7	87.4	89.3	91.4	92.0	92.9	92.9
3150	86.6	85.2	84.1	87.5	84.1	87.8	89.5	89.4	89.9	89.9
4000	83.6	83.0	81.0	84.3	81.0	84.0	86.3	87.1	87.6	87.6
5000	81.5	80.9	77.5	81.1	77.5	79.7	82.3	82.7	84.9	84.9
6300	80.7	79.1	74.7	79.6	76.7	80.5	82.2	80.9	83.7	83.7
8000	79.7	78.8	72.4	78.6	75.4	79.2	81.1	79.1	82.5	82.5
10000	78.4	75.4	69.6	76.3	73.1	76.7	79.4	77.1	80.6	80.6

Tabella 10.5: Parametri spettrali A_R della componente del rumore dovuto al rotolamento per le categorie SWISS10.

$\Delta L_{W,R,\text{road}}[i]$ è l'influsso spettrale della pavimentazione¹. Per la caratterizzazione delle proprietà della pavimentazione tramite misurazione sono a disposizione tre metodi: SPB (cfr. capitolo 15), SEM (cfr. capitolo 16) e CPX (cfr. capitolo 17). Se non esiste uno spettro di correzione della pavimentazione, è possibile utilizzare provvisoriamente un singolo valore. Per la pavimentazione di riferimento ACMR8 rispettivamente SDA8-12 vale $\Delta L_{W,R,\text{road}}[i] = 0$.

$\Delta L_{W,R,\text{temp}}[c]$ descrive la dipendenza del rumore dovuto al rotolamento dalla temperatura dell'aria τ in gradi Celsius con il coefficiente $K[c]$ secondo la tabella 10.7.

$$\Delta L_{W,R,\text{temp}}[c] = K[c] \cdot (10 - \tau) \quad (10.8)$$

$\Delta L_{W,R,\text{tire}}[c, \text{Belag}]$ è una correzione che permette di considerare tipologie di pneumatici non standard ed è particolarmente utile per adattare il modello a nuovi pneumatici utilizzati in futuro dalla flotta dei veicoli svizzeri. Inoltre, ciò consente di calcolare diversi scenari relativi ai pneumatici del parco veicoli. Questa correzione dipende dalla categoria del veicolo c e dalla pavimentazione, poiché l'influenza del pneumatico

¹I valori utilizzati nello sviluppo e nella validazione del modello sono mostrati nel capitolo 9.

freq	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
63	38.1	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	40.0	40.0	40.0
80	40.0	25.0	27.3	27.3	27.0	27.0	27.0	40.0	40.0	40.0
100	40.0	25.0	29.5	29.5	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
125	25.0	25.5	36.5	36.5	30.0	30.0	30.0	25.0	25.0	25.0
160	32.0	25.0	36.4	36.4	28.0	28.0	28.0	25.0	25.0	25.0
200	25.0	25.0	32.0	32.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
250	25.0	37.2	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	34.0	25.0	25.0
315	40.0	37.7	25.0	25.0	28.9	28.9	28.9	40.0	40.0	40.0
400	40.0	38.1	25.3	25.3	25.1	25.1	25.1	40.0	40.0	40.0
500	40.0	35.3	26.6	26.6	25.0	25.0	25.0	40.0	40.0	40.0
630	40.0	35.3	32.0	32.0	25.0	25.0	25.0	40.0	40.0	40.0
800	40.0	37.7	31.0	31.0	28.9	28.9	28.9	40.0	40.0	40.0
1000	40.0	38.6	33.1	33.1	30.5	30.5	30.5	28.8	40.0	40.0
1250	39.6	35.3	38.7	38.7	34.0	34.0	34.0	27.5	40.0	40.0
1600	40.0	36.7	39.5	39.5	35.8	35.8	35.8	27.7	40.0	40.0
2000	38.9	33.0	39.8	39.8	39.3	39.3	39.3	32.0	40.0	40.0
2500	37.3	30.6	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
3150	39.3	26.9	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	36.0	40.0	40.0
4000	40.0	25.0	38.0	38.0	39.8	39.8	39.8	31.2	40.0	40.0
5000	39.4	25.0	36.8	36.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
6300	40.0	25.5	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
8000	40.0	25.0	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0
10000	40.0	29.7	39.8	39.8	39.8	39.8	39.8	40.0	40.0	40.0

Tabella 10.6: Parametri spettrali B_R della componente del rumore dovuto al rotolamento per le categorie SWISS10.

cat. c SWISS10	$K[c]$
1	0.04
1b	0.04
2	0
3	0.08
3b	0.08
3c	0.08
4	0.08
5	0.08
6	0.08
7	0.08
8	0.04
9	0.04
10	0.04
11	0.04

Tabella 10.7: Parametro K per la correzione della temperatura del rumore dovuto al rotolamento.

non può essere specificata in modo indipendente dalla pavimentazione (cfr. capitolo 8). In questo senso è necessario disporre di una base affidabile per la classificazione del rumore degli pneumatici, oppure deve essere sviluppato un nuovo modello di emissione degli pneumatici, che determina l'emissione acustica tipica in base ai parametri di input rilevanti come larghezza e raggio del pneumatico, profilatura, durezza della gomma e qualità acustiche della pavimentazione.

10.5.4 Calcolo del livello A

Per i calcoli del livello A deve essere applicato il filtro di ponderazione A agli spettri determinati sopra, i quali poi vengono sommati energeticamente. A questo scopo vengono utilizzati i valori nella tabella 10.8. Essi sono stati ottenuti per ogni terzo dalla curva con filtro A² come media di oltre 11 punti di frequenza distribuiti geometricamente. Si noti che questo potrebbe comportare piccole differenze rispetto ai valori A delle frequenze mediane del filtro di terzi di ottava.

50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz
-30.3	-26.3	-22.6	-19.2	-16.1	-13.4	-10.9	-8.6
315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
-6.6	-4.8	-3.2	-1.9	-0.8	0.0	0.6	1.0
2000 Hz	2500 Hz	3150 Hz	4000 Hz	5000 Hz	6300 Hz	8000 Hz	10000 Hz
1.2	1.3	1.2	1.0	0.5	-0.2	-1.2	-2.5

Tabella 10.8: Valori A per bande di terzi d'ottava in dB. I valori positivi corrispondono ad un'aggiunta, i valori negativi ad una riduzione.

²IEC 61672-1 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications (2013).

10.6 Rumore del motore e rumore dovuto al rotolamento in livello A in funzione della velocità

Le figure da 10.1 a 10.5 mostrano la dipendenza della componente del rumore del motore e di quella dovuta al rotolamento in funzione della velocità a condizioni di riferimento (guida costante su una strada piana, con pavimentazione di riferimento ACMR8 o SDA8-12 e temperatura dell'aria di 10°C) per le categorie di veicoli di cui si dispongono i dati. Nella tabella 10.9 sono riportate le velocità per cui entrambi i contributi del rumore (rumore del motore e rumore dovuto al rotolamento) sono uguali.

cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
48	58	22	< 20	27	47	27	39	43	43

Tabella 10.9: Velocità in km/h per cui il contributo del rumore del motore corrisponde a quello del rumore dovuto al rotolamento considerando le condizioni di riferimento.

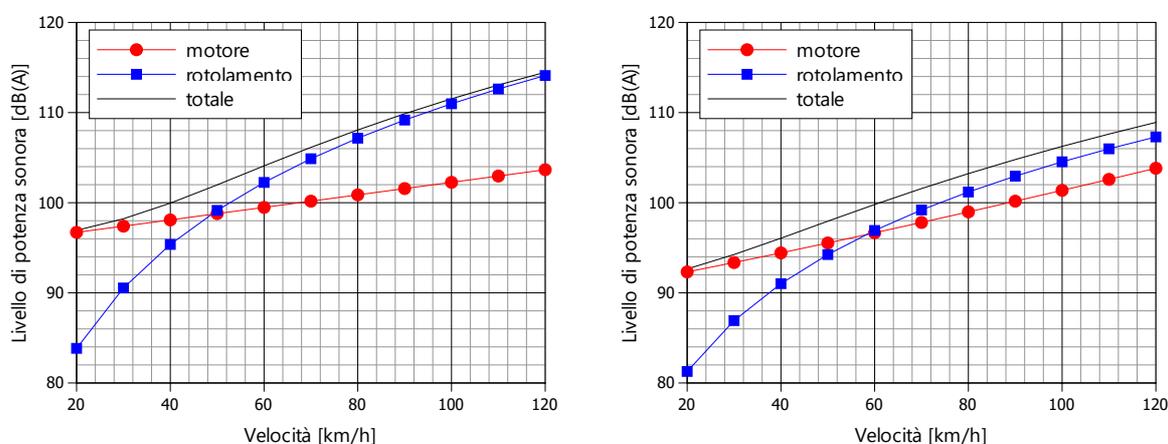


Figura 10.1: Potenza sonora con ponderazione A del rumore del motore, di rotolamento e totale in funzione della velocità per la categoria SWISS10 1 (sinistra) e 2 (destra).

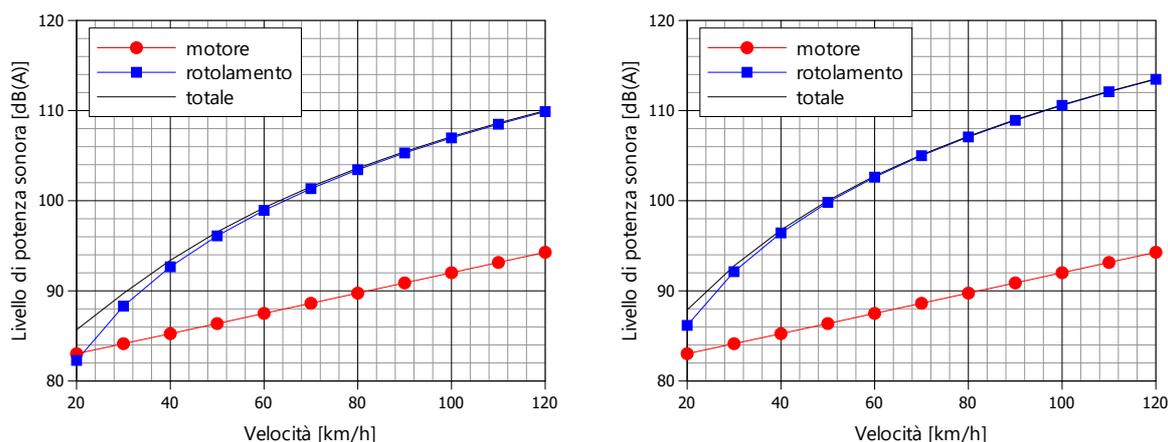


Figura 10.2: Potenza sonora con ponderazione A del rumore del motore, di rotolamento e totale in funzione della velocità per la categoria SWISS10 3 (sinistra) e 4 (destra).

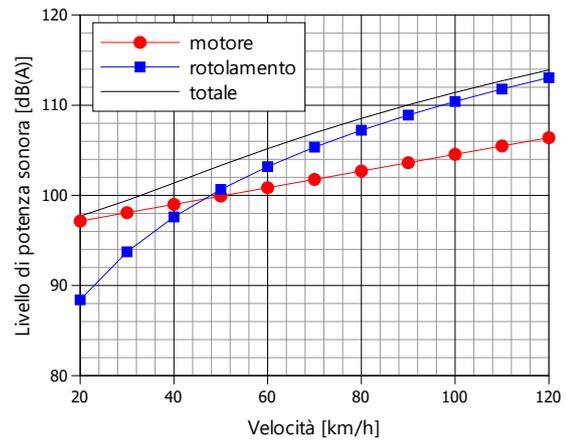
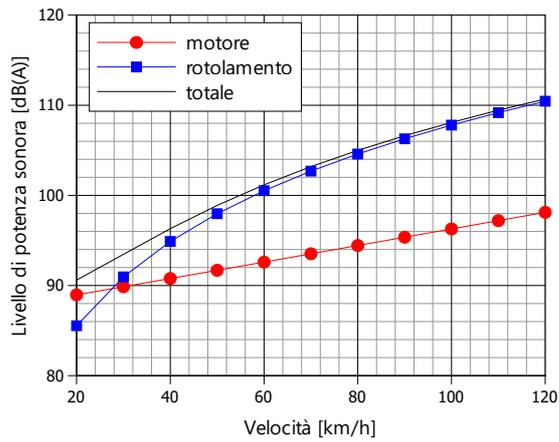


Figura 10.3: Potenza sonora con ponderazione A del rumore del motore, di rotolamento e totale in funzione della velocità per la categoria SWISS10 5 (sinistra) e 6 (destra).

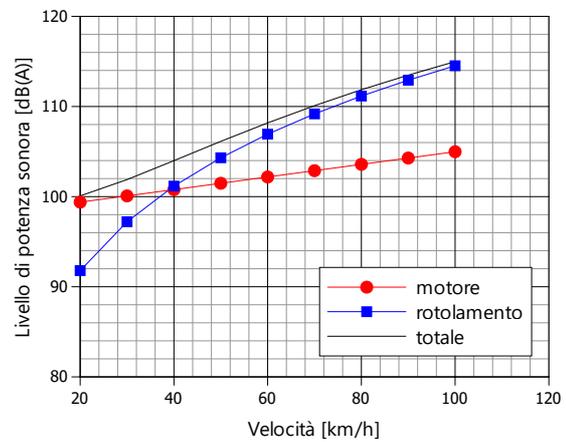
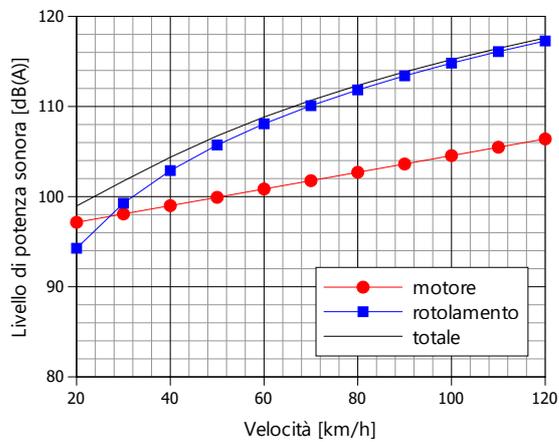


Figura 10.4: Potenza sonora con ponderazione A del rumore del motore, di rotolamento e totale in funzione della velocità per la categoria SWISS10 7 (sinistra) e 8 (destra).

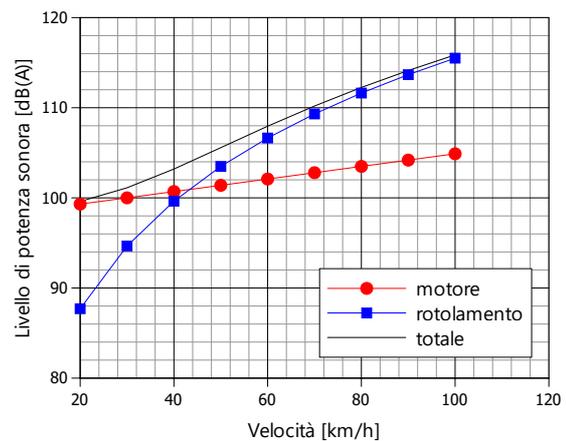
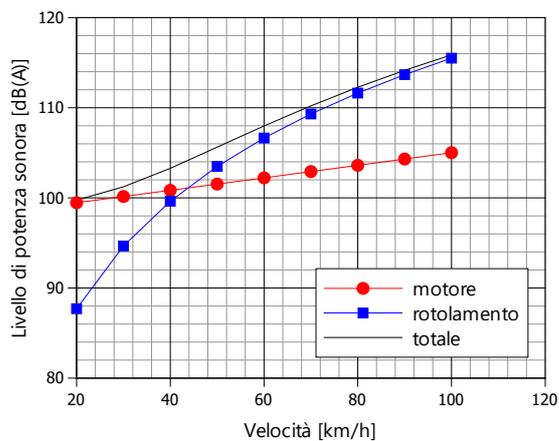


Figura 10.5: Potenza sonora con ponderazione A del rumore del motore, di rotolamento e totale in funzione della velocità per la categoria SWISS10 9 (sinistra) e 10 (destra).

10.7 Pneumatici estivi e invernali

Poiché le proprietà dei materiali che compongono gli pneumatici variano con la temperatura, il rumore dovuto al rotolamento è fondamentalmente dipendente dalla temperatura. Questo viene preso in considerazione con il termine di correzione $\Delta L_{W,R,temp}$ nel modello di emissione. Sulla base delle valutazioni MFM-U condotte separatamente per i periodi estivi e invernali dal 2014 al 2016, IFEC ingegneria SA [37] ha dimostrato che dopo la normalizzazione della temperatura rimane una differenza stagionale sistematica di massimo 0.4 dB(A). Si è concluso che gli pneumatici invernali non causano emissioni significativamente più elevate rispetto agli pneumatici estivi e che la differenziazione tra pneumatici estivi e invernali può essere tralasciata.

10.8 Situazioni di coda

Poiché le formule citate in precedenza per la stima del rumore del motore e di rotolamento non si applicano alle velocità < 20 km/h, queste equazioni *non* possono essere utilizzate per le situazioni di coda con $v = 0$. Per una stima della potenza sonora emessa da un veicolo fermo vengono considerate le misurazioni svolte a Vauffelin (vedi capitolo 5) con veicoli in folle (marcia non inserita). Questa campagna di misurazione includeva tuttavia solo le autovetture (categoria 3 SWISS10), per le quali la differenza di livello spettrale corrisponde a

$$\Delta L_{Stau}[3, i] = L_{W,0km/h}[3, i] - L_{W,prop,20km/h}[3, i] \quad (10.9)$$

dove $L_{W,0km/h}[3, i]$ rappresenta la potenza sonora di un veicolo fermo e $L_{W,prop,20km/h}[3, i]$ il rumore del motore a 20 km/h. Per le altre categorie di veicoli il livello di potenza sonora in situazioni di coda $L_{W,0km/h}[c, i]$ è stimato in

$$L_{W,0km/h}[c, i] = L_{W,prop,20km/h}[c, i] + \Delta L_{Stau}[3, i] \quad (10.10)$$

La figura 10.6 mostra la differenza di livello spettrale misurata e modellata $\Delta L_{Stau}[3, i]$.

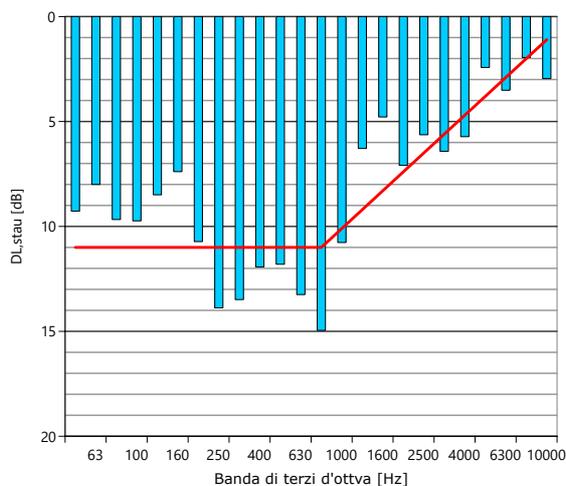


Figura 10.6: Differenze di livello spettrale misurato (barre) e modellato (linea) tra le misurazioni di veicoli fermi svolte a Vauffelin e la componente di rumore del motore per veicoli di categoria 3 SWISS10 a 20 km/h.

Dalla componente del rumore del motore a 20 km/h, utilizzando la differenza di livello citata sopra, si ricavano i livelli di potenza sonora per i veicoli in coda in funzione della categoria $L_{W,0km/h}[c, i]$ riportati nella tabella 10.10.

	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
50	88.5	87.4	80.0	80.0	84.5	81.0	81.0	88.9	89.5	88.0
63	87.0	88.5	76.5	76.5	85.5	81.0	81.0	90.5	94.9	94.5
80	85.0	88.7	75.5	75.5	78.5	81.0	81.0	88.0	91.0	89.5
100	81.4	88.7	68.4	68.4	71.6	77.3	77.3	84.5	84.4	83.1
125	85.9	90.3	66.9	66.9	70.6	77.3	77.3	83.9	86.1	84.9
160	80.0	84.0	67.4	67.4	71.6	77.3	77.3	82.8	82.6	82.6
200	80.2	78.0	66.0	66.0	69.4	75.4	75.4	79.6	79.4	77.1
250	81.5	72.3	66.5	66.5	69.4	75.4	75.4	81.7	81.7	79.5
315	80.7	67.6	66.0	66.0	69.4	75.4	75.4	83.3	83.3	82.2
400	82.0	69.2	64.3	64.3	69.4	75.4	75.4	81.4	81.4	82.8
500	77.7	70.0	64.3	64.3	67.9	75.4	75.4	83.4	83.4	84.5
630	76.8	71.2	66.8	66.8	66.9	75.4	75.4	82.8	82.8	81.6
800	77.9	70.2	65.8	65.8	73.4	78.2	78.2	81.0	81.0	81.3
1000	80.1	68.0	63.2	63.2	70.3	79.1	79.1	75.4	75.4	78.3
1250	75.4	69.1	59.1	59.1	66.7	80.0	80.0	73.2	73.2	77.2
1600	74.0	71.1	58.0	58.0	63.1	77.5	77.5	77.6	77.6	76.4
2000	72.3	69.6	60.4	60.4	67.5	78.4	78.4	79.1	79.1	75.3
2500	73.7	70.0	60.3	60.3	69.4	79.3	79.3	78.2	78.2	75.6
3150	72.8	70.9	61.7	61.7	69.8	73.8	73.8	76.8	76.8	76.0
4000	74.0	72.1	59.6	59.6	69.2	74.7	74.7	76.1	76.1	74.3
5000	72.5	73.7	57.0	57.0	68.6	75.6	75.6	76.0	76.0	70.5
6300	71.0	72.1	55.9	55.9	66.0	70.4	70.4	75.0	75.0	60.6
8000	71.5	71.4	52.8	52.8	63.4	71.3	71.3	73.8	73.8	54.4
10000	62.9	72.3	53.2	53.2	62.3	72.2	72.2	73.1	73.1	55.3

Tabella 10.10: Livello di potenza sonora spettrale $L_{W,0\text{km/h}}[c, i]$ di un veicolo fermo per le categorie SWISS10.

10.9 Variazione di emissione per singolo veicolo

Per simulare la variazione di emissione casuale specifica per singolo veicolo, la potenza sonora del veicolo $L_W[c, i]'$ può essere calcolata come la somma della potenza sonora rappresentativa $L_W[c, i]$ con un termine di dispersione medio neutro secondo l'equazione 10.11:

$$L_W[c, i]' = L_W[c, i] + r[c] \quad [\text{dB}] \quad (10.11)$$

dove $r[c]$ è un numero casuale distribuito normalmente. L'influenza della velocità è esplicitamente esclusa, poiché può essere rappresentata dal modello stesso. Per $r[c] = 0$, $L_W[c, i]'$ rappresenta la potenza sonora energetica media per tutti i veicoli di una categoria. Si esprime quindi $r[c]$ nel seguente modo:

$$r[c] = r_0[c] + n(\sigma[c]) = -0.115 (\sigma[c])^2 + n(\sigma[c]) \quad (10.12)$$

dove $r_0[c]$ è la differenza tra media aritmetica ed energetica (vedi allegato al rapporto finale completo) e $n(\sigma[c])$ è un numero casuale distribuito normalmente con media 0 e deviazione standard $\sigma[c]$. Per condizioni operative del veicolo dominate dal rumore del pneumatico, si possono assumere le deviazioni standard ottenute dalle misurazioni MFM-U in autostrada, riassunte nella tabella 10.11.

cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6	cat 7	cat 8	cat 9	cat 10
2.2	2.4	1.6	1.7	1.7	1.8	2.2	2.7	1.7	1.7

Tabella 10.11: Deviazioni standard dei livelli di potenza sonora nelle categorie SWISS10 ottenute in autostrada.

10.10 Stima di L_{eq} a 1 m di distanza

Per il confronto con i modelli di emissione che esprimono la sorgente come livello energetico medio, la caratterizzazione della potenza sonora utilizzata in sonROAD18 può essere convertita in un L_{eq} alla distanza di 1 m.

Senza considerare l'attenuazione dell'aria (trascurabile sulle corte distanze), il quadrato della pressione sonora p^2 in funzione del tempo t per un transito orizzontale di una sorgente puntiforme omnidirezionale può essere espresso come:

$$p^2(t) = \frac{W \rho c}{2\pi} \cdot \frac{1}{d^2 + (vt)^2} \quad (10.13)$$

con:

W : potenza sonora della sorgente puntiforme irradiata nel semispazio [W]

ρc : impedenza in campo libero, prodotto tra la densità dell'aria e la velocità del suono [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

v : velocità della sorgente [m/s]

$d = 1$ m: distanza minima tra il microfono e la sorgente in transito [m]

Il livello energetico medio L_{eq} per un passaggio all'ora corrisponde all'integrazione temporale del quadrato della potenza sonora sul tempo dell'evento ($-t_0 \dots + t_0$ con $t_0 \rightarrow \infty$) mediato su 3600 s:

$$L_{eq} = 10 \lg \left(\frac{1}{3600} \cdot \frac{W \rho c}{2\pi p_0^2} \int_{-t_0}^{+t_0} \frac{1}{1 + (vt)^2} dt \right) \quad (10.14)$$

Con la sostituzione $x = vt$ si ottiene:

$$L_{eq} = 10 \lg \left(\frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{W \rho c}{2\pi p_0^2} \int_{-x_0}^{+x_0} \frac{1}{1 + x^2} dx \right) \quad (10.15)$$

Utilizzando:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{1+x^2} dx = \pi \quad (10.16)$$

e con

$$L_W = 10 \lg \left(\frac{W \rho c}{p_0^2} \right) \quad (10.17)$$

si ottiene il livello di potenza sonora della sorgente

$$L_{eq} = L_W - 10 \lg(3600) - 10 \lg(v) - 10 \lg(2) \quad (10.18)$$

rispettivamente con v in km/h

$$L_{eq} = L_W - 10 \lg(3600) - 10 \lg(v) - 10 \lg(2) + 10 \lg(3.6) = L_W - 10 \lg(v) - 33.0 \quad (10.19)$$

La relazione 10.19 si applica a un veicolo all'ora. Rapportandola a N veicoli all'ora si ottiene

$$L_{eq} = L_W + 10 \lg \left(\frac{N}{v} \right) - 33.0 \quad (10.20)$$

11 Convertitore SWISS10

11.1 Introduzione

sonROAD18 calcola emissioni acustiche separate per ogni categoria di veicoli SWISS10 in funzione della velocità. La massima accuratezza del modello può essere raggiunta solo se sono disponibili informazioni dettagliate. Nei casi pratici, nei quali queste informazioni non sono completamente disponibili, è necessario utilizzare delle stime. In questo senso un possibile strumento per la ripartizione del volume di traffico è dato dal convertitore SWISS10 (figura 11.1).

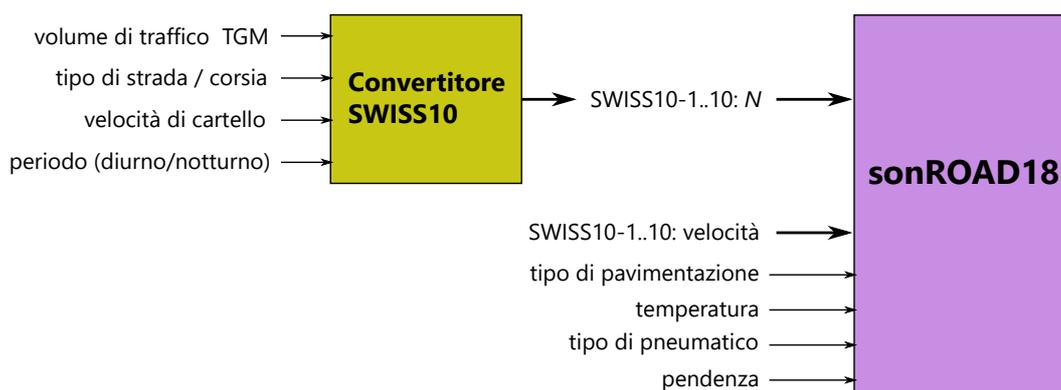


Figura 11.1: Convertitore SWISS10.

Il convertitore SWISS10 può essere applicato ad una corsia di una strada di un determinato tipo. Sulla base del traffico giornaliero medio TGM dell'intera strada (somma del TGM di ogni corsia), il convertitore SWISS10 stima per ciascuna corsia il traffico orario medio diurno $N_{giorno}[c]$ e notturno $N_{notte}[c]$ per singola categoria di veicoli c . Nell'appendice del rapporto finale completo sono riportate a titolo informativo alcune valutazioni relative alla velocità media di transito.

11.2 Classificazione delle strade

La classificazione delle strade si basa sui tipi di strada citati nella norma *SN 640 040 b*. Le distinzioni sono definite secondo la funzione della strada:

HLS Strade a grande capacità, di importanza da internazionale a regionale con funzioni di transito

HVS Strade principali di importanza da nazionale a subregionale con funzioni di collegamento

VS Strade di raccordo di importanza da regionale a subregionale con funzioni di collegamento

SS Strade di raccolta di importanza locale con funzioni di raccolta

ES Strade di servizio di importanza di quartiere con funzioni di accesso alle proprietà

La caratterizzazione di una strada a grande capacità HLS include in aggiunta il numero totale di corsie, solitamente compreso tra 2 e 6 e tipicamente 4. Con un numero totale di corsie > 2 , i volumi di traffico sulle diverse corsie differiscono. In questi casi viene fatta una distinzione tra corsia di scorrimento N e corsia di sorpasso U . Per tutti i tipi di strada è richiesta la velocità di cartello per una caratterizzazione completa.

11.3 Database

Il database del convertitore SWISS10 si basa sui singoli eventi registrati dai contatori automatici SWISS10 del traffico stradale di USTRA (<http://vmch-ds2.cnlab.ch> : ottobre 2014 fino a ottobre 2015), i dati dei contatori SWISS10 del Canton Zurigo del 2016 e i rilievi del traffico della città di Coira del 2016 [32]¹. La caratterizzazione delle strade è stata effettuata automaticamente per i dati USTRA in base al numero totale di corsie e alla velocità di transito, mentre per i dati di Coira e Zurigo l'assegnazione è stata effettuata manualmente da un ingegnere del traffico o sulla base di informazioni ottenute tramite GIS-Browser.

11.4 Analisi

11.4.1 Volume di traffico medio

La tabella 11.1 mostra il volume di traffico orario medio come percentuale del TGM, separato per la notte (22.00 - 06.00) e il giorno (06.00 - 22.00). La colonna Qtà. indica il numero di luoghi con statistiche mentre il codice descrive il tipo di strada, il numero di corsie (per HLS), la posizione della corsia (nei casi con più di 2 corsie) e la velocità di cartello.

Esempio di lettura della tabella: per i furgoni cat5 su una HLS a quattro corsie, per una corsia di scorrimento a 100 km/h di giorno (HLS-4-N-100, giorno), si assume una quota oraria del TGM di circa lo 0.17 %. Per una corsia di sorpasso, la quota è di circa lo 0.09 %. Assumendo un TGM di 50'000 veic./24h, su una corsia di scorrimento circolano 84 furgoni durante il periodo diurno, mentre per una corsia di sorpasso sono 47. L'intera sezione autostradale è percorsa ogni ora nel periodo diurno da $2 \cdot 84 + 2 \cdot 47 = 262$ veicoli di cat5.

Qtà.	Codice	Periodo	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
11	SS-30	giorno	0.00000	0.14442	2.57137	0.00000	0.07656	0.00000	0.00000	0.08028	0.08478	0.00000
11	SS-30	notte	0.00000	0.01637	0.29344	0.00000	0.00661	0.00000	0.00000	0.00766	0.01109	0.00000
60	SS-50	giorno	0.00000	0.14363	2.50921	0.00000	0.10363	0.00000	0.00000	0.09302	0.09176	0.00000
60	SS-50	notte	0.00000	0.01795	0.31354	0.00000	0.01029	0.00000	0.00000	0.01177	0.01395	0.00000
16	VS-50-60	giorno	0.01267	0.07638	2.56133	0.01353	0.17548	0.01264	0.00530	0.04864	0.01859	0.00990
16	VS-50-60	notte	0.00386	0.00777	0.34292	0.00068	0.01686	0.00069	0.00056	0.00361	0.00320	0.00099
12	VS-80	giorno	0.01464	0.08314	2.54851	0.01430	0.16106	0.01125	0.00503	0.04360	0.02553	0.00918
12	VS-80	notte	0.00326	0.00816	0.37083	0.00081	0.02031	0.00071	0.00072	0.00410	0.00777	0.00093
26	HVS-50-60	giorno	0.02069	0.08433	2.51915	0.01351	0.17121	0.01180	0.00710	0.04911	0.01357	0.01773
26	HVS-50-60	notte	0.00487	0.00764	0.38585	0.00099	0.02316	0.00110	0.00078	0.00465	0.00284	0.00229
15	HVS-80	giorno	0.01168	0.05438	2.50903	0.01777	0.15817	0.01350	0.01129	0.05929	0.01995	0.03406
15	HVS-80	notte	0.00278	0.00598	0.42098	0.00172	0.02472	0.00204	0.00075	0.00555	0.00425	0.00387
5	HLS-2-80	giorno	0.02761	0.03726	2.28149	0.02659	0.33375	0.01518	0.00644	0.06218	0.03626	0.09110
5	HLS-2-80	notte	0.00383	0.00236	0.35345	0.00430	0.05712	0.00379	0.00078	0.00921	0.00548	0.00921
10	HLS-2-100	giorno	0.01105	0.02883	2.41976	0.01379	0.15818	0.01368	0.00890	0.04992	0.04598	0.09709
10	HLS-2-100	notte	0.00232	0.00562	0.52573	0.00219	0.02849	0.00322	0.00129	0.00764	0.00859	0.01293
5	HLS-4-N-80	giorno	0.00597	0.02930	1.56955	0.00814	0.12787	0.01059	0.00565	0.04816	0.01932	0.04146
5	HLS-4-U-80	giorno	0.00074	0.02390	0.92049	0.00094	0.05167	0.00117	0.00072	0.00718	0.00111	0.00220
5	HLS-4-N-80	notte	0.00158	0.00548	0.35830	0.00112	0.02172	0.00166	0.00065	0.00677	0.00407	0.00569
5	HLS-4-U-80	notte	0.00009	0.00295	0.08396	0.00006	0.00366	0.00010	0.00004	0.00054	0.00015	0.00043
16	HLS-4-N-100	giorno	0.00638	0.01899	1.49030	0.01245	0.16883	0.00893	0.00735	0.05194	0.02534	0.05492
16	HLS-4-U-100	giorno	0.00125	0.01376	0.88923	0.00105	0.09353	0.00091	0.00050	0.00730	0.00263	0.01149
16	HLS-4-N-100	notte	0.00153	0.00320	0.33369	0.00136	0.03169	0.00147	0.00105	0.00790	0.00673	0.00941
16	HLS-4-U-100	notte	0.00029	0.00256	0.07936	0.00016	0.00853	0.00022	0.00009	0.00134	0.00064	0.00207
62	HLS-4-N-120	giorno	0.00918	0.01996	1.43751	0.01334	0.18418	0.01177	0.00674	0.04195	0.02917	0.06122
62	HLS-4-U-120	giorno	0.00063	0.01399	0.92151	0.00055	0.11418	0.00054	0.00025	0.00166	0.00088	0.00206
62	HLS-4-N-120	notte	0.00201	0.00310	0.34964	0.00196	0.04041	0.00230	0.00108	0.00702	0.00825	0.01003
62	HLS-4-U-120	notte	0.00006	0.00201	0.07537	0.00005	0.00930	0.00008	0.00003	0.00024	0.00022	0.00030

Tabella 11.1: Volume di traffico orario medio per corsia nelle categorie SWISS10 come percentuale del TGM.

11.4.2 Variabilità dei volumi di traffico

I volumi di traffico medio riportati nella tabella 11.1 possono variare in modo importante in funzione del luogo in cui vengono osservati. La tabella 11.2 elenca le deviazioni standard delle differenze osservate nei luoghi

¹A causa delle incertezze nell'assegnazione della categoria del veicolo, le stazioni di conteggio 2.10, 4.05, 4.06 e 5.16 non sono state prese in considerazione. Le quote delle moto sono state stimate dalle medie dei conteggi manuali poiché la classificazione automatica non era in grado di distinguere tra moto e biciclette.

esaminati.

Qtà.	Codice	Periodo	cat1	cat2	cat3	cat4	cat5	cat6	cat7	cat8	cat9	cat10
11	SS-30	giorno	0	43	13	0	59	0	0	30	181	0
11	SS-30	notte	0	43	15	0	34	0	0	64	205	0
60	SS-50	giorno	0	43	7	0	60	0	0	51	92	0
60	SS-50	notte	0	43	23	0	68	0	0	69	137	0
16	VS-50-60	giorno	128	26	4	53	42	45	55	49	124	85
16	VS-50-60	notte	104	37	22	69	41	97	105	67	168	117
12	VS-80	giorno	120	34	2	48	20	33	39	39	87	37
12	VS-80	notte	154	28	15	48	33	78	90	31	105	72
26	HVS-50-60	giorno	150	66	6	49	33	38	65	38	79	84
26	HVS-50-60	notte	173	47	21	51	39	66	91	51	79	98
15	HVS-80	giorno	98	35	7	46	27	53	74	52	60	82
15	HVS-80	notte	122	33	21	65	39	115	66	49	81	70
5	HLS-2-80	giorno	35	38	16	24	90	59	32	21	86	83
5	HLS-2-80	notte	62	41	33	64	84	111	50	30	89	90
10	HLS-2-100	giorno	75	31	9	64	33	96	85	63	96	105
10	HLS-2-100	notte	137	56	48	88	65	131	114	90	121	133
5	HLS-4-N-80	giorno	31	62	22	55	42	43	32	17	53	75
5	HLS-4-U-80	giorno	65	87	23	42	31	48	162	146	140	127
5	HLS-4-N-80	notte	39	57	19	79	34	75	65	37	63	56
5	HLS-4-U-80	notte	113	76	61	71	36	70	97	70	97	127
16	HLS-4-N-100	giorno	52	41	22	50	43	70	58	37	66	74
16	HLS-4-U-100	giorno	176	32	28	210	47	316	353	221	382	350
16	HLS-4-N-100	notte	65	33	26	69	40	93	67	49	92	83
16	HLS-4-U-100	notte	318	72	66	333	83	431	390	288	380	356
62	HLS-4-N-120	giorno	59	35	25	46	42	43	40	23	52	64
62	HLS-4-U-120	giorno	123	34	28	135	54	224	408	235	376	372
62	HLS-4-N-120	notte	73	38	18	90	48	74	63	41	76	65
62	HLS-4-U-120	notte	222	60	64	203	91	312	438	294	469	456

Tabella 11.2: Deviazioni standard della variazione del volume di traffico orario sui diversi punti di misurazione per corsia nelle categorie SWISS10 come percentuale del valore medio.

11.5 Funzione di densità di probabilità degli intervalli di tempo

Dal punto di vista puramente energetico, come per i calcoli Leq, la disposizione dei veicoli lungo una corsia non ha importanza. Tuttavia per la determinazione delle statistiche del livello massimo, dello studio delle fluttuazioni del livello o di altri parametri temporali [33] sono necessarie statistiche sulla distribuzione dei veicoli lungo una corsia. Questo aspetto viene esaminato qui sulla base dell'intervallo di tempo Δt tra due veicoli vicini in condizioni di traffico scorrevole, con il supporto dei dati dei contatori del traffico USTRA già utilizzati sopra.

A tale scopo sono state compilate statistiche che rappresentano la funzione di densità di probabilità di Δt per corsia e per volume di traffico orario relativo alla corsia. Queste funzioni sono state quindi approssimate da una distribuzione di Weibull a tre parametri per consentire una descrizione compatta.

La distribuzione di Weibull è descritta da tre parametri α , β , μ : per $x \geq \mu$ ha una funzione di densità $f(x)$ secondo l'equazione 11.1 e una funzione di distribuzione $F(x)$ secondo l'equazione 11.2 (per $x < \mu$ i valori delle funzioni sono uguali a zero).

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x - \mu}{\beta} \right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-\mu}{\beta}\right)^\alpha} \quad (11.1)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - \mu}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (11.2)$$

La figura 11.2 mostra un esempio delle funzioni di densità misurate per Δt per due diversi volumi di traffico e le rispettive approssimazioni con una distribuzione di Weibull per una strada principale a due corsie (HVS) con velocità di 80 km/h.

In allegato al rapporto finale completo sono elencati i parametri di distribuzione di Weibull corrispondenti ai diversi tipi di strada e ai volumi di traffico. Possono essere utilizzati per la micro-simulazione dei flussi di traffico e il calcolo delle caratteristiche del segnale acustico che ne derivano.

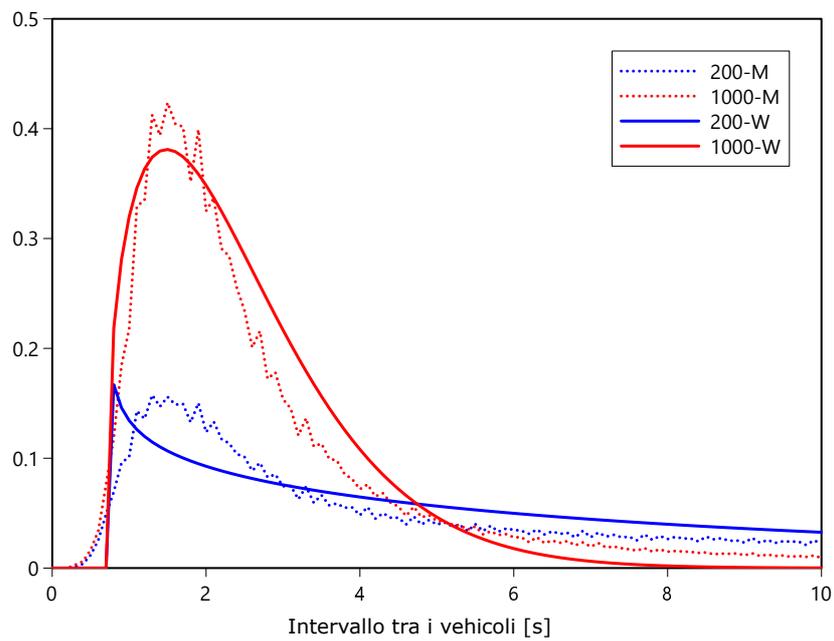


Figura 11.2: Misurazione (M) e approssimazione tramite distribuzione di Weibull (W) della funzione di densità dell'intervallo tra i veicoli Δt per una corsia di una strada principale tipica (HVS) con una velocità di 80 km/h per due volumi di traffico orari tipici di 200 e 1000 veic./h (relativi ad una corsia).

12 Validazione del modello

12.1 Misurazioni di validazione

Per validare il modello di emissione sonROAD18, i valori calcolati sono stati confrontati con le misurazioni. Sono state prese in considerazione solo misurazioni che non sono state utilizzate direttamente per il fitting dei parametri del modello. Il confronto è stato effettuato sulla base del livello medio calcolato e misurato in un breve intervallo di tempo (da 30 minuti a 48 ore) nelle vicinanze della strada. Sono stati presi in considerazione i seguenti tipi di strade e sono stati esaminati almeno tre luoghi per ogni strada:

- 30 km/h, piana
- strada principale all'interno della località, 50 km/h, piana
- strada principale all'interno della località, 50 km/h, pendenza $> 7\%$
- strada principale fuori dalla località, 80 km/h, piana
- autostrada, 120 km/h, piana

Sono stati utilizzati vari dati di misurazioni esistenti e ulteriori misurazioni sono state effettuate dall'Empa:

- misurazioni della Città di Zurigo effettuate da Basler & Hofmann nel 2013 [38]] come pure da Grolimund + Partner AG nel 2009 [39]
- misurazioni in zona 30 della Città di Zurigo e del Canton Argovia effettuate da Grolimund + Partner AG [40]
- misurazioni di passaggi su diverse pavimentazioni effettuate da Grolimund + Partner AG (antecedenti al 2010) [31]
- misurazioni MFM-U del 2016 (vedi capitolo 4)
- misurazioni Empa del 2016 (vedi capitolo 8) e del 2017 (vedi capitolo 5)

La tabella 12.1 riassume tutte le misurazioni utilizzate per la validazione. I punti di misurazione si trovano solitamente a circa 7.5 m dal centro della strada o della corsia. I dati sul traffico disponibili per le diverse misurazioni hanno una precisione molto variabile. Nella tabella 12.1 i dati sul traffico, comprese le velocità, sono quindi stati classificati nelle seguenti categorie di qualità:

Q1 volume di traffico per tutte le categorie SWISS10, noto per ogni corsia

Q2 volume di traffico per 7 categorie (CH07), noto per ogni corsia, suddivisione dei furgoni nelle categorie 5, 6, 7 secondo il convertitore SWISS10 (93%, 4%, 3%)

Q3 quattro categorie conosciute (2, 3, furgoni, 8), le categorie 1, 4, 9, 10 sono considerate uguali a zero, la suddivisione dei furgoni nelle categorie 5, 6, 7 avviene secondo il convertitore SWISS10 (91%, 6%, 3%), assunzione del 50

Q4 suddivisione nelle categorie 3 e 8 conosciuta, assunzione del 50% del traffico per corsia

Q5 soltanto il TGM conosciuto, suddivisione nelle categorie 3 e 8 secondo OIF, assunzione del 50% del traffico per corsia

v-q1 velocità effettiva di transito nota per le categorie SWISS10

v-q2 velocità media di transito nota

v-q3 velocità ricavata dai dati medi annui della velocità effettiva di transito

In generale i calcoli sono stati effettuati con le velocità medie effettive di transito. Poiché la correzione della pendenza secondo CNOSSOS tiene già conto di una velocità modificata, i calcoli delle tre posizioni con pendenza > 7% sono stati eseguiti con le velocità di cartello.

Ad eccezione delle autostrade, sono disponibili i dati delle temperature durante i periodi di misurazione. Nei tre siti autostradali è stata utilizzata la temperatura di riferimento di 10°C e si è scelto un periodo di validazione di due giorni con temperature tipiche intorno ai 10°C (metà marzo e fine ottobre). Per i siti autostradali era presente un punto di misurazione su entrambi i lati della strada. I risultati dei due punti sono stati mediati aritmeticamente.

Nessuno dei casi di validazione si trovava entro 100 metri da un incrocio o una rotonda. Pertanto, non è stato possibile validare la correzione per l'accelerazione o la decelerazione.

Oltre alle misurazioni nei vari luoghi specifici sopra indicati, sono disponibili misurazioni SPB di Grolimund + Partner AG su varie pavimentazioni dal 01.01.2010 [31]. Questi dati sono raggruppati in base al tipo di veicolo (autovettura, camion, semirimorchio) e al tipo di pavimentazione (AC 11, ACMR 8, SDA 4, SDA8) e coprono un intervallo di velocità di 40 - 130 km/h. Si tratta di valori mediati su misurazioni effettuate in diversi luoghi, motivo per cui non è possibile apportare correzioni per pendenza, accelerazione, decelerazione e influsso della temperatura. Un leggero aumento dell'incertezza deriva anche dal fatto che la distanza di misurazione era di soli 5 m. Inoltre questi dati includono un numero superiore alla media di casi speciali; vale a dire misurazioni con condizioni di pavimentazioni estreme (pavimentazione nuova) o misurazioni che non sono andate a buon fine. Per questi motivi, questa serie di dati è stata valutata separatamente.

12.2 Calcolo del livello energetico medio L_{eq}

Per alcuni casi di validazione, è nota solo la divisione autovetture (N1) e veicoli pesanti (N2) (dati sul traffico Q4 nella tabella 12.1). Anche i dati raggruppati in base alla pavimentazione contengono solo tre tipi di veicoli (autovetture, camion, semirimorchi). Questi tipi di veicoli sono stati assegnati alle categorie SWISS10 come segue:

- autovetture = categoria 3 SWISS10
- veicoli pesanti / camion = categoria 8 SWISS10
- semirimorchi = categoria 10 SWISS10

In situazioni senza dati di traffico accurati per le singole corsie, il traffico è stato distribuito uniformemente sulle corsie stesse. I calcoli sono stati poi eseguiti per corsia, cioè è stata assunta per ogni corsia una fonte lineare al centro della stessa.

Il calcolo della potenza sonora totale per metro di una sorgente lineare si ricava dall'equazione 12.1 con la velocità v' in m/s rispettivamente la velocità v in km/h, dove per l'influsso della pavimentazione sono state utilizzate le correzioni determinate tramite ottimizzazione dei parametri come descritto nel capitolo 9.

$$L_{W',eq,line[c,i]} = L_{W[c,i]} + 10 \lg \left(\frac{N[c]}{3600 \cdot v'[c]} \right) = L_{W[c,i]} + 10 \lg \left(\frac{N[c]}{1000 \cdot v[c]} \right) \quad (12.1)$$

Quale variabile di validazione è stato calcolato il livello energetico medio $L_{eq,A}$ per 1 ora nel rispettivo punto di misurazione. A tale scopo è stata effettuata un'integrazione numerica, in cui è stata ipotizzata una strada lunga 100 m, con una sorgente puntiforme ogni metro caratterizzata da una potenza sonora $L_{W',eq,line[c,i]}$. Come effetti di propagazione sono stati considerati gli influssi geometrici e l'attenuazione dell'aria. L'attenuazione dell'aria dipende dalle condizioni atmosferiche, dalla frequenza f , dalla distanza d ed è calcolata secondo l'equazione 12.2. Per determinare l'attenuazione dell'aria, si è supposto che la temperatura dell'aria fosse di +8 °C e che l'umidità relativa del 76%. I corrispondenti coefficienti di assorbimento atmosferico α_f sono riportati nella tabella 12.2.

$$A_{atm,f} = \alpha_f \frac{d}{1000} \quad (12.2)$$

Luogo	v-car [km/h]	Pendenza [%]	Pavimentazione	Misurazione	Dati di traffico	Misurazione
Kalchbühlstrasse, Zürich	30	3	strato superiore denso (calcolo: AC 11)	G + P, 2009	Q4, v-q2	$L_{eq,A}$ Tag
Kappel a.A.	30	0	ACMR 8	G + P, 2015	Q1, v-q1	$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Ottenbach	30	5	ACMR 8	G + P, 2015	Q1, v-q1	$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Butzenstrasse, Zürich	50	7	AC 11S	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Hegibachstrasse, Zürich	50	5	AC 8S	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Kalchbühlstrasse, Zürich	50	3	strato superiore denso (calcolo: AC 11)	G + P, 2009	Q4, v:q2	$L_{eq,A}$ Tag
Leimbachstrasse, Zürich	50	6	SMA 11	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Letzigraben, Zürich	50	0	AB 11	B + H, 2013	Q3, v-q2	$L_{eq,A}$ 1h
Fällanden	50	7.2	AC 11 (2012)	Empa, 2017	Q1, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.5h
Gsteigstrasse, Zürich	50	13	SMA 11 (2004)	Empa, 2017	Q1, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.5h
Tobelhofstrasse, Zürich	50	7.5	AB 11	Empa, 2017	Q1, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.5h
Magden	80	0	AC 11 (2000)	Empa, 2016	Q5, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.75h
Mellikon	80	0	PMA (2014)	Empa, 2016	Q5, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.75h
Rümikon	80	2	ACMR 8 (2010)	Empa, 2016	Q4, v-q2	$L_{eq,A}$ 0.75h
Rothenbrunnen	100	0	SDA 8 (2013)	MFM-U, 2016	Q2, v-q3	$L_{eq,A}$ 48h
Camignolo	120	0	SDA 8 (2013)	MFM-U, 2016	Q2, v-q3	$L_{eq,A}$ 48h
Reiden	120	0	SMA 11 (< 2003)	MFM-U, 2016	Q2, v-q3	$L_{eq,A}$ 48h
Misurazioni SPB raggruppate in base alla pavimentazione [31]:						
Diverse	40-110	—	AC 11	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Diverse	40-130	—	ACMR 8	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Diverse	40-80	—	SDA 4	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)
Diverse	40-90	—	SDA 8	G + P, >2010		$L_{eq,A}$ (1Fz./h)

Tabella 12.1: Panoramica delle misurazioni di validazione. Per i livelli di qualità dei dati sul traffico o le velocità vedi testo.

terza	α_f	terza	α_f	terza	α_f
50	0.1	315	1.2	2000	9.7
63	0.1	400	1.5	2500	14.3
80	0.2	500	1.8	3150	21.6
100	0.3	630	2.2	4000	33.6
125	0.4	800	2.7	5000	50.9
160	0.6	1000	3.5	6300	77.9
200	0.8	1250	4.7	8000	119.8
250	1	1600	6.8	10000	176.2

Tabella 12.2: Coefficiente di assorbimento atmosferico α_f in dB/km per una temperatura di 8°C e un'umidità relativa del 76% in funzione della frequenza media della banda di terza ottava.

12.3 Risultati della validazione

La tabella 12.3 mostra il $L_{eq,A}$ misurato e calcolato come pure le differenze per i casi di validazione nei diversi luoghi. Nei tre luoghi a 80 km/h non erano disponibili informazioni specifiche sul traffico per il periodo

di misurazione. I dati dei TGM disponibili provengono dagli anni 2006 (Magden), 1997 (Mellikon) e 2014 (Rümikon). Questi dati di traffico non attuali potrebbero spiegare parzialmente la sottostima dei valori. Anche i calcoli per i tre luoghi con pendenza sembrano sottostimare leggermente le emissioni, nonostante i calcoli utilizzino la velocità di cartello.

In media, la deviazione tra $L_{eq,A}$ calcolato e misurato è di -0.8 dB(A) (media rispetto alle deviazioni assolute -1.1 dB(A)). Le differenze tra il calcolo e la misura sono comprese tra -1.9 e +1.0 dB(A). L'errore quadratico Ψ in base all'equazione 12.3 su tutti i 17 casi di validazione è di 1.2 dB(A).

$$\Psi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_{calcolo,i} - L_{misurazione,i})^2} \quad (12.3)$$

Per i dati raggruppati della pavimentazione, la deviazione media tra $L_{eq,A}$ calcolato e misurato è di +0.3 dB(A) (media rispetto alle deviazioni assolute -1.3 dB(A)). Nella Tabella 12.4 sono indicati i valori separati per le diverse pavimentazioni e categorie di veicoli (media sulle diverse categorie di velocità). Le differenze tra la misurazione e il calcolo sono comprese tra -3.9 e +2.5 dB(A) per le singole categorie di velocità. L'errore quadratico per tutti i dati di validazione raggruppati secondo la pavimentazione è di 1.5 dB(A).

La figura 12.1 mostra le differenze calcolo-misurazione come boxplot. Si può osservare come i dati raggruppati in base alla pavimentazione mostrino talvolta deviazioni considerevolmente maggiori tra misurazione e calcolo. Questo può essere spiegato da un lato con possibili differenze all'interno di un tipo di pavimentazione e dall'altro con le informazioni lacunose, e rispettivamente la possibilità di correzione di eventuali pendenze, accelerazioni, decelerazioni e influenze della temperatura.

Combinando entrambi i set di dati si ottiene un valore medio della differenza fra calcolo e misurazione di -0.3 dB(A). Questa differenza è nell'ordine di grandezza dell'incertezza di base nella raccolta dei dati ed è quindi soddisfacente. Allo stesso tempo, il confronto dimostra l'incertezza da prendere in considerazione nei singoli casi.

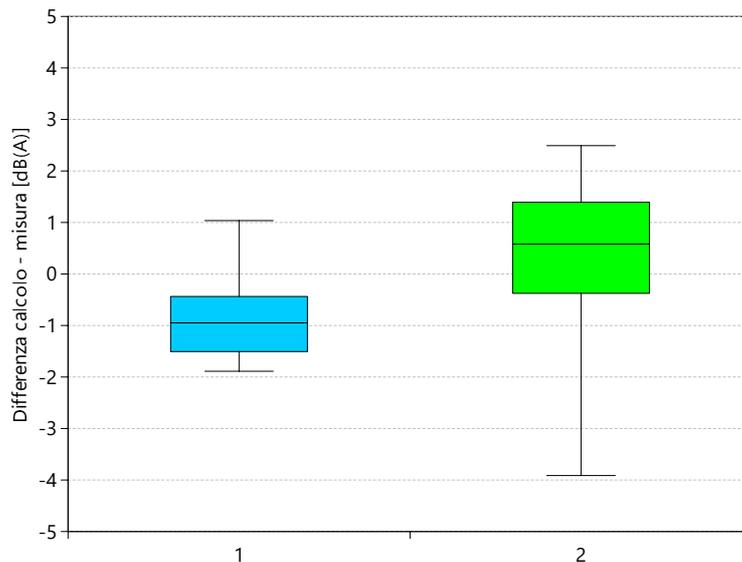


Figura 12.1: Differenze tra calcoli e misurazioni. I boxplot mostrano la mediana (riga orizzontale nella casella), il 25% e il 75% percentile (limiti inferiore e superiore della casella), nonché l'intervallo tra i valori più piccoli e quelli più grandi. Il gruppo di dati blu (1) comprende i singoli luoghi di validazione, il gruppo verde (2) corrisponde ai dati raggruppati per pavimentazione.

Scenari	Luogo	Pavimentazione	Calcolo dB(A)	Misura dB(A)	Calcolo – Misura dB(A)
30 km/h, piana	Kalchbühlstrasse	AC 11	56.4	55.4	1.0
	Kappel	ACMR 8	39.2	39.6	-0.4
	Ottenbach	ACMR 8	34.0	33.0	1.0
50 km/h, piana	Butzenstrasse, ZH	AC 11S	62.1	63.0	-0.9
	Hegibachstrasse, ZH	AC 8S	67.5	69.0	-1.5
	Kalchbühlstrasse, ZH	AC 11	57.8	58.8	-1.0
	Leimbachstrasse, ZH	SMA 11	62.1	63.0	-0.9
	Letzigraben, ZH	AB 11	58.4	59.0	-0.6
50 km/h, pendenza > 7%	Fällanden	AC 11	68.9	70.8	-1.9
	Gsteigstrasse, ZH	SMA 11	68.2	69.5	-1.3
	Tobelhofstrasse, ZH	AB 11	66.2	67.9	-1.7
80 km/h, piana	Magden	AC 11	66.2	66.8	-0.6
	Mellikon	PMA	71.8	73.1	-1.2
	Rümikon	ACMR 8	71.3	73.0	-1.7
120 km/h, piana	Rothenbrunnen	SDA 8	69.9	71.5	-1.6
	Camignolo	SDA 8	76.9	77.1	-0.1
	Reiden	SAM 11	81.2	80.6	0.5

Tabella 12.3: Risultati della validazione nei diversi luoghi.

Pavimentazione	Veicolo	Calcolo – Misura dB(A)
AC11	autovettura	1.5
	camion	0.8
	semirimorchio	—
ACMR8	autovettura	1.4
	camion	0.8
	semirimorchio	0.5
SDA4	autovettura	-2.8
	camion	-1.3
	semirimorchio	-2.1
SDA8	autovettura	0.4
	camion	0.4
	semirimorchio	0.3

Tabella 12.4: Differenze medie tra i calcoli e le misurazioni raggruppate per pavimentazione. È da notare che la rappresentatività del campione non è garantita nelle singole categorie di pavimentazione. I valori sono una media sulle diverse categorie di velocità.

13 Incertezza del modello

La seguente stima dell'incertezza del modello sonROAD18 si riferisce al livello energetico medio con ponderazione A $L_{eq,A}$ previsto in un punto e basato su un grande campione di veicoli. L'incertezza prevista è determinata da due aspetti:

Errore del modello causato da incertezze nella descrizione empirica del modello e dal fatto che non vengono presi in considerazione ulteriori effetti e fattori di influenza

Errore nei dati di input causato da dati di input mancanti o imprecisi

13.1 Errori del modello

Gli errori del modello descrivono l'incertezza inerente alla previsione del livello di emissione con la completa disponibilità dei dati di input richiesti¹. Le considerazioni sono limitate ai veicoli in stato stazionario e di conseguenza escludono quelli in accelerazione. Una caratterizzazione completa della situazione comprende quindi:

- le velocità medie per categoria di veicolo
- le quantità di veicoli per categoria di veicolo
- il tipo di pavimentazione
- la pendenza della strada
- la temperatura dell'aria

Sulla base della derivazione dei parametri del modello e della validazione del modello (capitolo 12) assumendo una descrizione completa della situazione nei termini menzionati sopra, l'errore del modello inteso come deviazione standard può essere stimato in **1.5 dB(A)**.

Poiché in molti casi il rumore di rotolamento è preponderante nel rumore totale, la conoscenza incompleta dell'esatta correzione della pavimentazione contribuisce in modo importante all'errore del modello. Come mostrano le misurazioni, le emissioni all'interno dello stesso tipo di pavimentazione possono mostrare variazioni significative. L'ideale per una caratterizzazione della pavimentazione è un campione sufficientemente ampio di misurazioni SPB. In alternativa, è anche possibile ottenere valori di correzione della pavimentazione dalle misurazioni CPX, ma la conversione dei valori CPX nei dati SPB richiesti, comporta a sua volta un certo grado di incertezza.

13.2 Errore nei dati di input

Per la mappatura del rumore, i dati di input del modello per la determinazione delle emissioni solitamente non sono disponibili nella misura rispettivamente con la precisione descritte sopra. L'influsso dei singoli parametri può essere esaminato con un'analisi della sensitività sui risultati.

Quale funzione del modello f viene utilizzata in questo caso la previsione del livello energetico medio equivalente con ponderazione A $L_{eq,A}$ per un punto di ricezione su terreno duro alla distanza di riferimento di 7.5 m (vedi equazione 10.20):

$$L_{eq,A} = 10 \lg \left(\sum_{c=1}^{10} \frac{N[c]}{v[c]} \cdot \sum_{i=1}^n 10^{0.1(L_{w[c,i]} + A'[i])} \right) + \Delta \quad (13.1)$$

¹Per quanto riguarda la caratterizzazione della pavimentazione in questo contesto si intende unicamente la conoscenza del tipo di pavimentazione.

dove i : numero di banda di terzi d'ottava, c : categoria del veicolo, $N[c]$ rispettivamente $v[c]$ numero di veicoli per ora e la velocità per la rispettiva categoria, $L_W[c, i]$: livello di potenza sonora di un veicolo di categoria c nella banda di terzi d'ottava i , $A'[i]$: ponderazione A che include l'assorbimento d'aria nella banda di terzi d'ottava i e infine Δ : una costante.

La valutazione numerica della sensitività della funzione del modello in relazione alle diverse grandezze di input richiede la specificazione di un punto operativo. A tale scopo, vengono definite tre situazioni tipo con i corrispondenti parametri del convertitore SWISS10 dalla tabella 11.1:

Strada di raccolta, 30 km/h una corsia di una strada di raccolta con velocità di cartello v_s di 30 km/h, con pavimentazione ACMR8/SDA8-12 e quantità di veicoli corrispondenti a SS-30 notturno.

Strada di raccordo, 50 km/h una corsia di una strada di raccordo con velocità di cartello v_s di 50 km/h, con pavimentazione ACMR8/SDA8-12 e quantità di veicoli corrispondenti a VS-50 notturno.

Strada a grande capacità, 120 km/h una corsia di una strada a grande capacità con velocità di cartello v_s di 120 km/h, con pavimentazione ACMR8/SDA8-12 e quantità di veicoli corrispondenti a HLS-4-N-120 notturno.

La tabella 13.1 mostra i risultati dell'analisi di sensitività.

Parametri	SS-30	VS-50	HLS-4-N-120	
velocità v_s	0.5	0.9	1.2	dB/10%
pendenza s	1.7	1.1	0.5	dB/10%
pavimentazione $\Delta L_{W,R,road}$	0.5	0.8	1.0	dB/1dB
temperatura T	-0.3	-0.6	-0.70	dB/10C
volume di traffico N	0.41	0.41	0.41	dB/10%

Tabella 13.1: Analisi della sensitività di un calcolo $L_{eq,A}$ rispetto ai diversi parametri di input per tre situazioni tipo. Si noti che la sensitività della pendenza identifica la differenza fra una situazione con una pendenza del +10% rispetto a una strada piana. Poiché la correzione della pendenza è fortemente non lineare, non può essere facilmente interpolata o estrapolata da altri delta.

14 Esempi di calcolo

Gli esempi di calcolo includono i quattro limiti di velocità 30, 50, 80 e 120 km/h e comprendono tutte le formule che quantificano le emissioni, in particolare anche la direttività verticale. I dati di input sono stati scelti in modo che, per quanto possibile, compaiano tutte le situazioni di calcolo (diverse correzioni). Gli esempi sono quindi teorici e non corrispondono a situazioni reali, ma servono a testare la loro implementazione. La tabella 14.1 riassume i dati di input dei quattro esempi di calcolo. Quali correzioni della pavimentazione vengono utilizzati i valori elencati nel capitolo 9.

Esempi di calcolo	A	B	C	D
volume di traffico N[1]	1	1	1	3
volume di traffico N[2]	2	5	5	5
volume di traffico N[3]	70	100	200	450
volume di traffico N[4]	1	1	1	1
volume di traffico N[5]	5	10	10	50
volume di traffico N[6]	1	2	5	30
volume di traffico N[7]	1	1	1	10
volume di traffico N[8]	5	10	20	35
volume di traffico N[9]	1	1	5	60
volume di traffico N[10]	1	1	1	40
velocità v[1]	30	50	80	93
velocità v[2]	30	50	80	110
velocità v[3]	30	50	80	120
velocità v[4]	30	50	80	90
velocità v[5]	30	50	80	120
velocità v[6]	30	50	80	90
velocità v[7]	30	50	80	90
velocità v[8]	30	50	80	90
velocità v[9]	30	50	80	90
velocità v[10]	30	50	80	90
pavimentazione	ACMR8	SDA4	PMA	cemento
pendenza s [%]	0	-5	10	2
temperatura dell'aria [°C]	10	10	15	25
angolo θ (Q – Mp) [°]	10	20	45	60

Tabella 14.1: Dati di input per i quattro esempi di calcolo. Per ogni esempio il calcolo viene eseguito per una corsia. Il volume di traffico, la velocità ecc. si basano quindi su una corsia.

Il calcolo della potenza sonora totale per m di una sorgente lineare avviene secondo l'equazione 12.1. I risultati sono riassunti nelle tabelle allegare alla relazione finale completa.

15 Caratterizzazione della pavimentazione tramite misurazioni SPB

15.1 Concetto

L'influenza della pavimentazione rispettivamente il termine di correzione $\Delta L_{W,R,road}[i]$ possono essere determinati tramite eventi singoli di transito con traffico fluido nella geometria di riferimento 7.5 m / 1.2 m su terreno duro. Questo metodo differisce dalla procedura normalizzata ISO 11819-1 (Acustica - Misurazione dell'influenza delle superfici stradali sul rumore del traffico - Parte 1: Metodo statistico di transito), che si basa sul livello massimo, dal momento che utilizza l'energia dell'evento come variabile di descrizione acustica.

Per la valutazione, sono necessarie coppie di dati di velocità ed energie di eventi spettrali per N transiti validi. Sulla base di una variabilità dei singoli veicoli corrispondente a una deviazione standard σ di poco meno di 2 dB, con $N = 40$ può essere utilizzata una deviazione standard del valore medio di $\sigma_m = \sigma / \sqrt{N - 1} \approx 0.3$ dB.

La misurazione SPB per determinare l'influenza della pavimentazione in un luogo specifico dovrebbe soddisfare le seguenti condizioni:

Geometria La posizione del microfono corrisponde alla configurazione di riferimento con una distanza di 7.5 m dal centro della corsia e un'altezza di 1.2 m sopra la carreggiata.

Pavimentazione Il terreno adiacente alla corsia di interesse nella direzione del microfono deve essere piatto e sostanzialmente acusticamente duro per garantire condizioni di propagazione uniformi (vedere anche l'appendice alla relazione finale completa). Questa superficie dura può ad es. essere formata da una corsia adiacente. Sulle autostrade solitamente è la corsia di emergenza, in strade a due corsie questa condizione è soddisfatta per la corsia di distanza.

Ambiente L'ambiente dovrebbe essere privo di oggetti riflettenti per non contribuire con ulteriori riflessioni a rinforzare il segnale misurato dal microfono.

Selezione dei veicoli L'insieme degli eventi da valutare è costituito dalla categoria di veicolo dominante, che solitamente è formata dalle autovetture (categoria 3 SWISS10). Nello stato operativo del veicolo esaminato, il rotolamento dovrebbe dominare sul rumore del motore.

Range di velocità L'analisi prende in considerazione solo i veicoli la cui velocità è compresa nell'intervallo ± 15 % della velocità media.

Eventi validi I passaggi sono considerati validi (vale a dire indisturbati) se avvengono in modo isolato. Al momento del passaggio presso il microfono, la distanza da tutti i veicoli vicini indesiderati deve essere di almeno 100 m. I veicoli che non soddisfano il criterio saranno esclusi dalla valutazione. I veicoli che transitano in modo compatto possono essere valutati come gruppo se tutti i veicoli appartengono alla stessa categoria e hanno velocità comparabili.

15.2 Documentazione

La documentazione di una misurazione SPB (vedere anche ISO 11819-1 sezione 13) deve innanzitutto contenere le energie degli eventi spettrali $L_{E,M}[k, i]$ (con k : indice della misurazione e i : indice della banda di terzi d'ottava) e secondariamente (a dipendenza delle caratteristiche della pavimentazione) fornire tutte le informazioni necessarie per un calcolo dell'energia dell'evento:

- categoria SWISS10 e velocità dei transiti

- temperatura dell'aria
- pendenza della strada

15.3 Analisi

Lo scopo della determinazione dell'influsso locale della pavimentazione è la riproduzione esatta, tramite modello, della somma delle energie degli eventi misurati. A partire da N eventi misurati viene calcolato il livello spettrale totale di energia degli eventi $L_{E,M,tot}[i]$:

$$L_{E,M,tot}[i] = 10 \lg \left(\sum_{k=1}^N 10^{0.1 L_{E,M}[k,i]} \right) \quad (15.1)$$

Il termine spettrale di correzione $\Delta L_{W,R,road}[i]$ viene quindi regolato in modo che la previsione di sonROAD18 del livello di energia totale degli eventi $L_{E,R,tot}[i]$ coincida con il livello di misurazione $L_{E,M,tot}[i]$. Per il set di eventi di transito rilevati $L_{E,R,tot}[i]$ viene calcolato con l'equazione 15.2,

$$L_{E,R,tot}[i] = 10 \lg \left(\sum_{k=1}^N 10^{0.1(L_W[k,c,i] - 10 \lg(v[k]) - 6.1 + A'_{atm}[i])} \right) \quad (15.2)$$

dove $L_W[k, c, i]$ corrisponde alla potenza sonora nella banda di terzi d'ottava i emessa dal totale dei veicoli k della categoria c secondo l'equazione 10.1, $v[k]$ è la velocità del veicolo in km/h, mentre $A'_{atm}[i]$ è l'attenuazione spettrale dell'aria per 7.5 m secondo l'allegato alla relazione finale completa.

16 Caratterizzazione della pavimentazione tramite misurazioni SEM

16.1 Concetto

Le misurazioni SEM registrano e descrivono le immissioni in un punto in prossimità della strada sotto forma di un livello energetico equivalente in bande di terzi d'ottava. La situazione di misurazione viene riprodotta con sonROAD18 e una correzione della pavimentazione viene applicata in modo che le differenze tra misurazione e calcolo scompaiano. Questa procedura è paragonabile a una calibrazione del modello. I siti di misurazione particolarmente adatti consistono in tratte a cielo aperto senza influenze di riflessione, con velocità di traffico uniformi e con rumore di rotolamento dominante.

I tempi medi necessari per le misurazioni SEM dipendono dal volume di traffico. Occorre garantire che siano identificate le caratteristiche specifiche dei veicoli, che la misurazione includa almeno 200 veicoli e che questi viaggino ad una velocità rappresentativa.

16.2 Documentazione

La documentazione di una misurazione SEM deve, da un lato, contenere il livello energetico equivalente in bande di terzi d'ottava sul periodo di misurazione $L_{eq,M,tot}[i]$ e dall'altro fornire tutte le informazioni (ad eccezione delle caratteristiche della pavimentazione) che sono necessarie per il calcolo del livello di immissione:

- geometria della misurazione, inclusa l'altezza del microfono e le distanze da tutte le corsie
- morfologia del terreno
- posizione, orientamento e dimensioni delle possibili superfici riflettenti
- traffico orario per ogni corsia nelle categorie SWISS10
- velocità media per ogni corsia nelle categorie SWISS10
- temperatura dell'aria
- durata della misurazione
- pendenza della strada
- caratterizzazione del flusso di traffico

16.3 Analisi

Per essere analizzata, la situazione viene riprodotta assumendo la pavimentazione di riferimento in sonROAD18. La differenza tra la misurazione e il calcolo che si verificano in ogni terzo i viene fatta scomparire mediante l'adattamento dell'influsso della pavimentazione $\Delta L_{W,R,road}[i]$.

In una situazione a cielo aperto con un terreno duro senza ulteriori elementi di riflessione, nel terzo i il livello di immissione del modello $L_{eq,R,tot}[i]$ può essere stimato come la sovrapposizione dei contributi di tutte le corsie secondo l'equazione 16.1. Si presume che l'effetto suolo nell'intervallo di distanza di interesse possa essere equiparato a quello nella distanza di riferimento di 7.5 m.

$$L_{eq,R,tot}[i] = 10 \lg \left(\sum_{s=1}^S \frac{1}{d[s]} \cdot 10^{0.1A'_{atm}[s,i]} \sum_{c=1}^{10} \frac{N[s,c]}{v[s,c]} \cdot 10^{0.1L_W[c,i]} \right) - 33.0 \quad (16.1)$$

Nell'equazione 16.1, S corrisponde al numero di corsie, $d[s]$ è il minimo della distanza fra microfono e corsia con indice s e $A'_{atm}[s, i]$ rappresenta l'attenuazione dell'aria nella banda di terzi d'ottava i per un passaggio completo sulla corsia s . $N[s, c]$ e $v[s, c]$ sono rispettivamente il volume di traffico orario e la velocità media per la categoria di veicoli c sulla corsia s . $L_W[c, i]$ è la potenza sonora totale emessa da un veicolo di categoria c nella banda di terzi d'ottava i secondo l'equazione 10.1. L'attenuazione dell'aria $A'_{atm}[s, i]$ può essere stimata con le indicazioni contenute negli allegati del rapporto finale completo.

17 Caratterizzazione della pavimentazione tramite misurazioni CPX

La correzione della pavimentazione per un determinato luogo $\Delta L_{W,R,road}[i]$ può essere stimata in alternativa ai metodi SPB o SEM con una misurazione CPX [29]. Il metodo CPX è molto veloce e consente l'acquisizione efficiente di profili longitudinali, ma richiede una fase di conversione dei livelli di misurazione CPX in energie di eventi a bordo strada. Questa trasformazione è accompagnata da una determinata incertezza, poiché la misurazione CPX viene estrapolata da uno o due set di pneumatici dell'intero parco veicoli/pneumatici attuale e la funzione di trasferimento dalla posizione del microfono CPX (campo vicino) alla posizione a bordo strada non è completamente indipendente dalla pavimentazione.

Per stabilire un modello per la conversione dei valori misurati CPX in spettri di correzione della pavimentazione, sono necessarie coppie di dati idonei che rappresentano valori CPX spettrali ed energie di eventi spettrali a 7.5 m / 1.2 m per la stessa posizione. Dalle misurazioni di energia dell'evento, successivamente, in conformità con il capitolo 15, vengono determinati i valori di correzione della pavimentazione $\Delta L_{W,R,road}[i]$ e infine viene stabilita una relazione funzionale $f_{CPX \rightarrow \text{CorrezioneDellaPavimentazione}}[i]$.

18 Misurazione di nuovi tipi di veicoli

In questo capitolo sono raccolte raccomandazioni per la pianificazione e l'esecuzione di misurazioni mirate delle emissioni per la determinazione dei parametri del modello per particolari tipi/categorie di veicolo. Per ulteriori informazioni, consultare il rapporto finale completo di sonROAD18.

19 Interfaccia con i modelli di propagazione

In questo capitolo sono raccolte prescrizioni per considerare le riflessioni del terreno nella combinazione tra il modello di emissione sonROAD18 e i modelli di propagazione come ISO 9613-2 o sonX. Per ulteriori informazioni, consultare il rapporto finale completo di sonROAD18.

20 Confronto con StL-86+

Il confronto con StL-86+ si basa sul livello medio previsto $L_{eq,A}$ a una distanza di 1 m. Questa misura corrisponde direttamente al valore di emissione di StL-86+. In sonROAD18 viene generato un livello di potenza sonora ponderato A $L_{W,A}[c]$ in bande di terzi di ottave, e, applicando l'equazione 10.20

$$L_{eq,A} = 10 \lg \left(\sum_{c=1}^{10} \frac{N[c]}{v[c]} \cdot 10^{0.1 L_{W,A}[c]} \right) - 33.0 \quad (20.1)$$

viene calcolato un $L_{eq,A}$ alla distanza di 1 m. Il confronto esamina solo le emissioni, eventuali deviazioni nel calcolo della propagazione non sono discusse qui.

20.1 Dipendenza delle emissioni delle automobili dalla velocità

La Figura 20.1 mostra in condizioni di riferimento la dipendenza dalla velocità dei valori di emissione delle automobili (1 automobile all'ora) per la pavimentazione di riferimento ACMR8. Sia per sonROAD18 che per StL-86+, è stata impostata una correzione della pavimentazione = 0. In generale, la dipendenza dalla velocità di sonROAD18 mostra un andamento più ripido. Alle velocità più basse sonROAD18 prevede emissioni minori rispetto a StL-86+, alle velocità più alte prevede emissioni maggiori. Per $v = 50$ km/h sonROAD18 calcola un livello di emissione pari a 46.5 dB(A), valore di 0.5 dB(A) superiore rispetto a quello calcolato con StL-86+ pari a 46.0 dB(A).

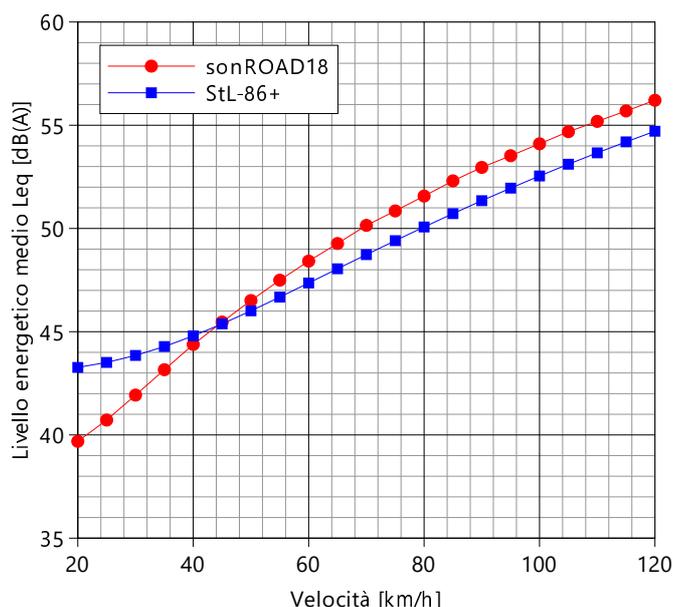


Figura 20.1: Calcolo delle emissioni $L_{eq,A}$ di sonROAD18 e StL-86+ a 1 m di distanza in funzione della velocità con pavimentazione di riferimento e 1 automobile all'ora.

20.2 Calcolo degli scenari

Per un confronto con composizioni di traffico realistiche si fa riferimento a quattro scenari basati sul convertitore di dati SWISS10. Quale risultato del modello sono utilizzati i livelli energetici medi $L_{eq,A}$ ad una distanza di 1 m. I calcoli si basano sulle seguenti condizioni di riferimento:

- strada con pavimentazione di riferimento
- temperatura dell'aria: 10°C
- stile di guida costante

Sia per i calcoli con sonROAD18 sia per quelli con StL-86+ viene utilizzata la velocità di cartello.

20.2.1 Strada di raccolta piana con velocità di cartello di 30 km/h: SS-30

Il calcolo con sonROAD18 utilizza i dati sul traffico e le velocità della Tabella 20.1 (in base al convertitore SWISS10 SS-30 notturno), il calcolo con StL-86+ si basa sui dati della Tabella 20.2. La Tabella 20.7 mostra i risultati. L'emissione con sonROAD18 è di 3.3 dB(A) inferiore a quella calcolata con StL-86+. Questo conferma il fatto risaputo che StL-86+ sovrastima le emissioni alle basse velocità. Ciò è particolarmente accentuato in questo scenario a causa della quota relativamente elevata di veicoli pesanti.

N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10
0	49	875	0	20	0	0	23	33	0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

Tabella 20.1: Volumi di traffico orari e velocità utilizzati nel calcolo con sonROAD18 per le categorie SWISS10.

v/h	quota di veicoli pesanti	velocità
1000	0.10	30

Tabella 20.2: Volume di traffico orario, quota di veicoli pesanti e velocità utilizzati nel calcolo con StL-86+.

20.2.2 Strada di raccordo piana con velocità di cartello di 50 km/h: VS-50

Il calcolo con sonROAD18 utilizza i dati sul traffico e le velocità della Tabella 20.3 (in base al convertitore SWISS10 VS-50 notturno), il calcolo con StL-86+ si basa sui dati della Tabella 20.4. La Tabella 20.7 mostra i risultati. L'emissione con sonROAD18 è di 0.7 dB(A) inferiore a quella calcolata con StL-86+.

N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10
10	20	900	2	44	2	1	9	8	3	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Tabella 20.3: Volumi di traffico orari e velocità utilizzati nel calcolo con sonROAD18 per le categorie SWISS10.

v/h	quota di veicoli pesanti	velocità
1000	0.05	50

Tabella 20.4: Volume di traffico orario, quota di veicoli pesanti e velocità utilizzati nel calcolo con StL-86+.

20.2.3 Strada di raccordo con pendenza del 5% e velocità di cartello di 50 km/h: VS-50

Il calcolo con sonROAD18 utilizza i dati sul traffico e le velocità della Tabella 20.3 (in base al convertitore SWISS10 VS-50 notturno). Per considerare la pendenza del 5%, il traffico è diviso equamente tra le due direzioni di marcia. Il calcolo con StL-86+ si basa sui dati della Tabella 20.4, con la correzione della pendenza $0.5 \cdot (5-3) = 1$ dB applicata a tutto il traffico. La Tabella 20.7 mostra i risultati. L'emissione con sonROAD18 è di 1.5 dB(A) inferiore a quella calcolata con StL-86+. Rispetto alla strada piana, la differenza aumenta con la pendenza, in quanto StL-86+ tiene in considerazione una maggiore correzione della pendenza stessa.

20.2.4 Strada a grande capacità piana con velocità di cartello di 120 km/h: HLS-4-N-120

Il calcolo con sonROAD18 utilizza i dati sul traffico e le velocità della Tabella 20.5 (in base al convertitore SWISS10 HLS-4-N-120 notturno), il calcolo con StL-86+ si basa sui dati della Tabella 20.6. La Tabella 20.7 mostra i risultati. L'emissione con sonROAD18 è di 0.9 dB(A) superiore a quella calcolata con StL-86+.

N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10
5	7	821	5	95	5	3	16	19	23	100	120	120	80	120	80	80	80	80	80

Tabella 20.5: Volumi di traffico orari e velocità utilizzati nel calcolo con sonROAD18 per le categorie SWISS10.

v/h	quota di veicoli pesanti	velocità
1000	0.05	120

Tabella 20.6: Volume di traffico orario, quota di veicoli pesanti e velocità utilizzati nel calcolo con StL-86+.

20.2.5 Riepilogo dei risultati

La Tabella 20.7 riassume i risultati degli scenari citati sopra.

Scenario	sonROAD18	StL-86+	sonROAD18 - StL-86+
SS-30, piana	74.8	78.1	-3.3
VS-50, piana	77.5	78.2	-0.7
VS-50, pendenza 5%	77.8	79.2	-1.5
HLS-4-N-120, piana	86.7	85.8	+0.9

Tabella 20.7: Risultati del confronto tra i calcoli con sonROAD18 e StL-86+ in dB(A). I livelli devono essere intesi come $L_{eq,A}$ ad una distanza di 1 m.

21 Stima del livello massimo sonoro del passaggio con ponderazione A

21.1 Basi

Come caratterizzazione delle emissioni sonROAD18 utilizza la potenza sonora irradiata L_W di una sorgente rappresentativa omnidirezionale che genera l'energia dell'evento corretta nel caso di un passaggio. In questo modo viene riprodotto correttamente il livello medio come variabile di base rilevante per l'OIF. Tuttavia, la caratteristica di irradiazione orizzontale derivante da questa strategia può, a seconda della velocità e della categoria del veicolo, determinare una sovrastima sistematica del livello massimo di un passaggio. Di seguito, per mezzo di misurazioni, viene derivato un termine di correzione ΔK_{\max} , che consente la stima del livello massimo in base al livello di potenza sonora. A tale scopo, per il livello massimo con ponderazione A $L_{\max,7.5m,A}$ alla distanza di riferimento $d = 7.5$ m si applica:

$$L_{\max,7.5m,A} = L_{W,A} - 20 \log(d) - 8 + \Delta K_{\max} = L_{W,A} - 25.5 + \Delta K_{\max} \quad (21.1)$$

dove $L_{W,A}$ corrisponde al livello di potenza sonora con ponderazione A.

21.2 Analisi dei dati

La valutazione riassuntiva dei dati MFM-U (capitolo 4) ha mostrato che per le velocità autostradali nelle categorie SWISS10 da 3 a 6 (automobili e furgoni) le sovrastime massime senza correzione sono comprese tra circa 1 e 2 dB(A). Per le ulteriori analisi nella categoria automobili vengono utilizzate misurazioni proprie supplementari o dati dalla letteratura. La Tabella 21.1 e la Figura 21.1 elencano le campagne di misurazione considerate e mostrano le correzioni ΔK_{\max} determinate.

Luogo	Velocità	Pendenza [%]	Pavimentazione	ΔK_{\max}
Camignolo	120	0	SDA8	-1.6
Moleno	120	0	SDA8	-1.3
Reiden	120	0	SMA11	-2.1
Rothenbrunnen	100	0	SDA8	-1.5
Magden	80	0	AC11	-0.6
Rümikon	80	0	ACMR8	-1.2
Frenkendorf	60	0	Cemento	-2.0
Amsteg	60	0	ACMR11	-1.0
Michelstrasse	30	9		0.5
Kuerbergstrasse	30	14		0.2
Langensteinstrasse	30	7		0.9
Zofingen G+P [30]	50	0	SDA4b	-0.2
Zofingen G+P [30]	30	0	SDA4b	-0.2
Kappel G+P [30]	50	0	ACMR8	-0.1
Kappel G+P [30]	30	0	ACMR8	0.5

Tabella 21.1: Campagne di misurazione per la determinazione della correzione ΔK_{\max} .

La correzione ΔK_{\max} indica una dipendenza dalla velocità per autovetture e furgoni (categorie di veicoli SWISS10 da 3 a 6), che può essere stimata con l'equazione 21.2.

$$\Delta K_{\max} = 0.9 - 0.0227 \cdot v \quad [\text{dB(A)}], \quad v \geq 20 \text{ km/h} \quad (21.2)$$

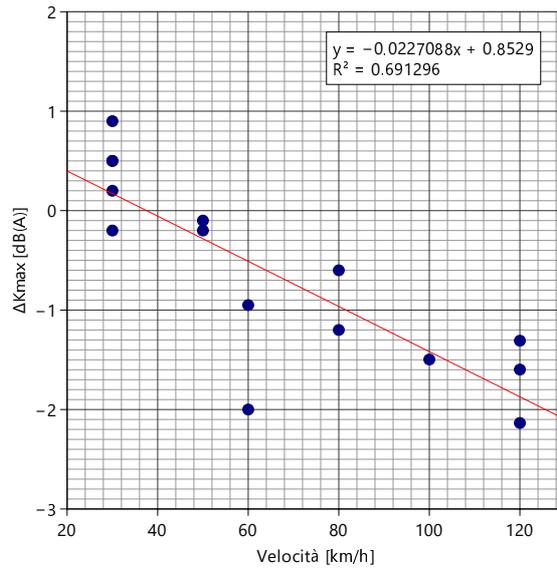


Figura 21.1: Correzioni del livello massimo ΔK_{\max} derivate dai dati misurati in funzione della velocità e linea di tendenza.

A basse velocità e per le categorie di veicoli SWISS10 1, 2, 7, 8, 9 e 10 i dati indicano un $\Delta K_{\max} = 0$. Questo comportamento presenta una correlazione con l'importanza del rumore degli pneumatici. A questo proposito nella referenza [10] viene proposta una caratteristica di irradiazione orizzontale non circolare del rumore degli pneumatici come causa di quest'effetto. Un confronto quantitativo della dipendenza di ΔK_{\max} dalla velocità e della parte di rumore dovuto al rotolamento rispetto al rumore complessivo mostra, tuttavia, che una caratteristica di irradiazione indipendente dalla velocità e applicata esclusivamente al rumore dovuto al rotolamento, non può riprodurre i valori nella Tabella 21.1.

Bibliografia

- [1] Ordinanza contro l'inquinamento fonico (OIF) del 15 dicembre 1986 (Stato 1° gennaio 2016).
- [2] Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm, Empa Dübendorf, Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 60, Bundesamt für Umweltschutz, 1987; sowie Mitteilungen zur Lärmschutzverordnung (LSV) Nr. 6, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 1995.
- [3] Heutschi K: SonRoad - Berechnungsmodell für Strassenlärm, Schriftenreihe Umwelt Nr. 366, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, BUWAL, Bern, 2004.
- [4] Direttiva UE 2015/996 della commissione, del 19 maggio 2015, che stabilisce metodi comuni per la determinazione del rumore a norma della direttiva 2002/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio.
- [5] Direttiva 13012 "Sistemi di rilevamento automatico del traffico", Ufficio federale delle strade USTRA, 2009.
- [6] S. J. Shilton, F. Anfosso Ledee, H. van Leeuwen, Conversion of existing road source data to use CNOSSOS-EU, 469-474, EuroNoise 2015.
- [7] J. T. Broch, Principles of experimental frequency analysis, Elsevier Science Publishers, 1990.
- [8] K. Heutschi, SonRoad: New Swiss Road Traffic Noise Model, Acta Acustica united with Acustica, vol. 90, 548-554, 2004.
- [9] K. Heutschi, On single event measurements of heavy road vehicles in freely flowing traffic, Acta Acustica united with Acustica, vol. 94, 709-714, 2008.
- [10] H.G. Jonasson, Acoustical Source Modelling of Road Vehicles, Acta Acustica united with Acustica, vol. 93, 173-184, 2007.
- [11] T. Ziegler, E. Bühlmann, S. Egger, E. Hammer, Grolimund + Partner AG, Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30, Forschungsprojekt VSS 2012/214, 2017.
- [12] A. Bernasconi, N. Notari, Bestimmung des Alterungsverhaltens der Beläge nach SPB an den MFM-U Standorten unter Berücksichtigung der vor Ort bestimmten Temperaturkoeffizienten, IFEC Dokument 160755 B 05, 2016.
- [13] www.COMPETT.org
- [14] L. M. Iversen, G. Marbjerg, H. Bendtsen, Noise from electric vehicles - 'state-of-the-art' literature survey, Internoise, 2013.
- [15] R. S. H. Skov, L. M. Iversen, Noise from electric vehicles - measurements, COMPETT WP3, 25.03.2015.
- [16] <http://forever.fehrl.org>
- [17] M. A. Pallas, M. Bérengier, J. Kennedy, P. Morgan, S. Gasparoni, R. Wehr, Noise emission levels for electric and hybrid vehicles - First results of the FOREVER project, Proc. Transport Research Arena 2014 (TRA2014).

- [18] M. A. Pallas, M. Bérengier, M. Muirhead, P. Morgan, How to consider Electric and Hybrid Electric vehicles in CNOSSOS-EU predicting method?, Proceedings of Forum Acusticum, 2014.
- [19] M. A. Pallas, M. Bérengier, R. Chatagnon, M. Czuka, M. Conter, M. Muirhead, Towards a model for electric vehicle noise emission in the European prediction method CNOSSOS-EU, Applied Acoustics 113, 89 - 101, 2016.
- [20] J. W. Biermann, S. Ruschmeyer, Sustainable noise reduction and enhanced passenger comfort using hybrid diesel-electric urban buses, Internoise, 2012.
- [21] M. A. Pallas, R. Chatagnon, J. Lelong, Noise emission and noise sources of a hybrid bus, Internoise, 2013.
- [22] M. A. Pallas, R. Chatagnon, J. Lelong, Noise emission assessment of a hybrid electric mid-size truck, Applied Acoustics, 2013.
- [23] S. Gasparoni, M. Czuka, R. Wehr, M. Conter, M. A. Pallas, M. Bérengier, FOREVER Impact of low-noise tyres on electric vehicle noise emission, WP3 Final Report, 2015.
- [24] M. Czuka, M. A. Pallas, P. Morgan, M. Conter, Impact of potential and dedicated tyres of electric vehicles on the tyre-road noise and connection to the EU noise label, Proceedings of 6th Transport Research Arena, 2016.
- [25] J. Kragh, J. Oddershede, NordTyre - Car tyre labelling and Nordic traffic noise, Internoise, 2013.
- [26] B. Swieczko-Zurek, J. Ejsmont, G. Ronowski, How efficient is noise labeling of tires?, ICSV 21, 2014.
- [27] Regolamento n. 117 della Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UN/ECE) - Disposizioni uniformi relative all'omologazione degli pneumatici per quanto concerne le emissioni sonore prodotte dal rotolamento e l'aderenza sul bagnato e/o la resistenza al rotolamento, 2014.
- [28] Ermittlung der durch Motorräder verursachten akustischen Immissionen im Nationalpark, Empa Untersuchungsbericht Nr. 455'585, 2010.
- [29] ISO/FDIS 11819-2:2016(E), Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method.
- [30] C. Ammann, K. Heutschi, S. Rüttener, Potenzial von Temporeduktionen innerorts als Lärmschutzmassnahme, Zeitschrift für Lärmbekämpfung, vol. 11, 43-49, 2016.
- [31] S. Egger, SONROAD18 - BELAGSDATEN GROLIMUND + PARTNER AG DOKUMENTATION VERFÜGBARER DATEN, 30. Mai 2017.
- [32] Hartmann & Sauter, Verkehrsdaten Stadt Chur 2016, Gesamtbericht im Auftrag des Amts für Natur und Umwelt Kanton Graubünden, 2017.
- [33] J.M. Wunderli, R. Pieren, M. Habermacher, D. Vienneau, C. Cajochen, N. Probst-Hensch, M. Rööfli, M. Brink, Intermittency Ratio - A metric reflecting short-term temporal variations of transportation noise exposure, Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 1-11, 2015.
- [34] F. Lange, Anfahrbeschleunigungen, VRR VerkehrsRechtsReport, vol. 10, 377-382, 2006.
- [35] ifec: Vergleich der Lärmemissionen von Winter- und Sommerpneus an den MfM-U Messstandorten: Kurzbericht, im Auftrag des BAFU, 2017.
- [36] ISO/IEC. Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). Guide 98-3. Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardization (ISO) and International Electrotechnical Commission (IEC); 2008.
- [37] A. Bernasconi, N. Notari, D. Bozzolo, Untersuchung der akustischen Alterung von Belägen nach SPB-Verfahren unter Berücksichtigung der vor Ort bestimmten Temperatur- und Geschwindigkeitskoeffizienten, DAGA 2017, 125-128.

- [38] Basler & Hofmann AG, Lärmmessungen T30 Stadt Zürich, Protokoll Langzeitmessung, 10.01.2014.
- [39] T. Boss, Grolimund & Partner AG, T30-Versuch Kalchbühlstrasse, Stadt Zürich, Akustische Begleitmessungen, im Auftrag des Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich UGZ, A3267, 16. Oktober 2009, ergänzt 16. November 2010.
- [40] Ch. Ammann, Grolimund & Partner AG, Potential von Temporeduktionen innerorts als Lärmschutzmassnahme, Studie im Auftrag der Stadt Zürich und Kanton Aargau, A4398, 16.01.2015.

A Panoramica degli allegati della relazione finale

I seguenti allegati sono presenti nella relazione finale completa:

- Lunghezze dei veicoli in base alla categoria
- Tutte le analisi MFM-U
- Analisi delle combinazioni tra pneumatici e pavimentazione
- Analisi delle velocità di transito
- Parametro di Weibull per la caratterizzazione delle distanze tra due veicoli
- Esempi di calcolo: risultati
- Propagazione del suono nella geometria di riferimento su terreni duri e morbidi
- Relazione tra media aritmetica e media energetica
- Attenuazione spettrale dell'aria
- Indicazioni sulle correzioni per veicoli in accelerazione (incroci e rotatorie)
- Dichiarazione di conformità