

## Documentazione del modello di calcolo *sonARMS* per rumore da attività di tiro

Versione del programma: sonARMS V.6.1.8 dal 4 gennaio 2026  
Numero pagine incl. allegati: 35

### Indice

- 1 Introduzione
  - 2 Descrizione delle sorgenti sonore
  - 3 Modello di propagazione
  - 4 Struttura ed organizzazione di *sonARMS*
  - 5 Risultati del calcolo
  - 6 Incertezza del modello
- Allegati

### Impressum

Committente: Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Sezione Rumore / NIS, CH-3003 Bern  
Contraenti: Empa, Sezione Acustica / Riduzione del rumore e Merz Technik  
Autore: Jean Marc Wunderli  
Traduzione iniziale: Stefano Pedersoli, Bonalumi Ferrari Partner SA, Giubiasco  
Supervisore UFAM: Kornel Köstli  
Nota: Il presente rapporto è stato commissionato dall'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM). Il contraente è l'unico responsabile del contenuto.

---

Dübendorf, 6 gennaio 2026  
Capoprogetto / Caposezione:

Sezione Acustica / Riduzione del rumore  
Capogruppo d'acustica ambientale:

Dr. Jean Marc Wunderli

Dr. Reto Pieren

## Riepilogo

*sonARMS* è un modello di calcolo del rumore da attività di tiro per le valutazioni di cui all'Allegato 7 dell'OIF "Valori limite d'esposizione al rumore degli impianti di tiro civili" e all'Allegato 9 dell'OIF "Valori limite d'esposizione al rumore su piazze d'armi, di tiro e d'esercizio militari". *sonARMS* riproduce tre tipi di sorgenti di rumore: esplosione alla bocca da sparo, onda balistica e detonazione al bersaglio. I valori di emissione per le esplosioni alla bocca e le detonazioni al bersaglio sono memorizzati in una banca dati sulle armi che contiene registrazioni di armi civili e militari. I livelli sonori delle onde balistiche dovuti al volo dei proiettili sono calcolati in base alle proprietà dei proiettili ed alla balistica.

Il modello di propagazione è formulato in bande di terzi d'ottava e tiene conto dei seguenti fenomeni di propagazione: attenuazione geometrica, attenuazione dell'aria, effetto suolo, effetto schermo lungo bordi orizzontali e verticali di ostacoli, attenuazione di boschi, influenze meteorologiche sulla propagazione sonora e riflessioni su oggetti artificiali, boschi e rocce.

*sonARMS* è costituito da un kernel di calcolo e da un'interfaccia utente. Il kernel di calcolo, descritto in questo documento, fornisce come risultati i livelli sonori dei singoli spari per tutte le combinazioni sorgente-recettore in termini di livello di energia sonora  $L_E$ , spettrale e ponderato A, così come il livello massimo ponderato A  $L_{AFmax}$ . Il calcolo dei livelli di valutazione in conformità agli Allegati 7 e 9 dell'OIF viene effettuato direttamente nell'interfaccia utente di *sonARMS*, che è documentato in un manuale utente separato.

*sonARMS* è stato validato rispetto ai numerosi dati di misura disponibili (vedere il rapporto Empa n. 5211.01543.100-2). In merito all'esame dell'attenuazione geometrica, risulta un'incertezza rappresentativa del modello rispetto alla descrizione delle singole situazioni di propagazione del 3.7%. Da ciò si può dedurre che, in termini di deviazione standard, le previsioni dei valori limite di immissione sia secondo l'Allegato 7 che secondo l'Allegato 9 dell'OIF mostrano un'incertezza di 1 - 2 dB(A).

*sonARMS* è stato sviluppato dall'EMPA, Sezione Acustica / Riduzione del rumore in collaborazione con Merz Technik.

## Esclusione di responsabilità

*sonARMS* è un modello di calcolo sviluppato dall'Empa su incarico dell'UFAM per la valutazione del rumore di tiro in ambito militare e civile in accordo con l'Ordinanza svizzera contro l'inquinamento fonico. Il programma è di proprietà dell'UFAM, è disponibile gratuitamente ed è aperto a tutti gli utenti. Il programma corrisponde allo stato dell'arte per il calcolo del rumore di tiro. La plausibilità dei risultati deve essere verificata da un esperto di acustica. L'applicazione e l'interpretazione dei risultati sono responsabilità dell'utente.

# 1 Introduzione

La revisione dell'Ordinanza svizzera contro l'inquinamento fonico, entrata in vigore il 1° agosto 2010, ha introdotto l'Allegato 9 "Valori limite d'esposizione al rumore su piazze d'armi, di tiro e d'esercizio militari". Per determinare l'esposizione al rumore e pianificare le misure in base ai nuovi valori limite, l'UFAM, in collaborazione con l'Empa e armasuisse, ha deciso di creare un modello di calcolo denominato *sonARMS*. *sonARMS* combina elementi del modello di calcolo precedentemente utilizzato per il rumore del tiro militare WL04 e il modello *sonRAIL* recentemente completato per il rumore ferroviario<sup>1</sup>. A tale scopo, la divisione UFAM, Sezione Rumore/RNI, che già detiene i diritti di *sonRAIL*, ha rilevato dall'Empa anche i corrispondenti diritti di WL04 e ha finanziato i lavori di ampliamento del kernel di calcolo di *sonRAIL* per l'applicazione al rumore da attività di tiro.

Oltre al nuovo Allegato 9 dell'OIF, anche l'Allegato 7 tratta del rumore da attività di tiro poiché, da un lato, alcuni impianti devono essere valutati sia in base all'Allegato 7 che all'Allegato 9, e poiché, d'altronde, è di fondamentale importanza utilizzare un modello di calcolo uniforme per tutte le sorgenti di rumore da attività di tiro. L'ambito di applicazione del *sonARMS* dovrebbe coprire non solo le attività di tipo militare ma anche quelle civili.

L'autorità esecutiva incaricata dell'applicazione dei nuovi limiti di emissione acustica di cui all'Allegato 9 è il Dipartimento federale della Difesa, della Protezione della popolazione e dello Sport (DDPS). Armasuisse Immobili, che deve tenere un apposito registro del rumore e provvedere al risanamento, ne è responsabile. Armasuisse Immobili ha tuttavia deciso di non farsi carico di questi compiti, bensì di indire una gara d'appalto nell'ambito di una procedura di aggiudicazione. Il primo appalto è stato vinto dalla società Triform SA di Friburgo. Il suo mandato comprende, tra l'altro, la raccolta dei dati operativi di tutti i poligoni di tiro e di tutte le armi, la modellizzazione e la rappresentazione dell'inquinamento acustico in un sistema GIS e l'attuazione di misure di riduzione del rumore. Triform SA ha quindi accompagnato lo sviluppo di *sonARMS* come primo e principale utilizzatore, in particolare per quanto riguarda le interfacce tra il kernel di calcolo e i processi a monte e a valle (creazione del progetto e preparazione dei risultati). Nel dicembre 2010 il modello di calcolo *sonARMS* versione 1.1 è stato consegnato a Triform SA insieme alla documentazione (23 dicembre 2010, Empa n. 453'989)

Nel periodo 2011-2014 il kernel di calcolo *sonARMS*, concepito come applicazione autonoma simile a *sonRAIL* e accessibile tramite un programma a riga di comando, è stato integrato con un'interfaccia utente grafica denominata *sonArmsGUI* anche grazie all'attiva collaborazione degli uffici per la protezione acustica dei cantoni Grigioni e Zurigo. Ciò consente un'integrazione automatica dei dati di progetto provenienti dal GIS, nonché la rappresentazione, l'elaborazione e l'esecuzione di progetti riguardanti attività di tiro. Allo stesso tempo, è stata implementata una significativa accelerazione del kernel di calcolo sulla base dei risultati del progetto *sonRAIL-SpeedUp* e sono state effettuate varie correzioni, ottimizzazioni ed estensioni sul kernel, sui dati di input e sui risultati. Il 15 ottobre 2014 il *sonARMS* versione 3.0.1 è stato rilasciato per uso gratuito sulla homepage dell'UFAM, ed il 31 ottobre 2014 è stato sostituito dalla versione 3.0.6a, a causa di alcune discrepanze. Nel 2015 è stato aggiunto uno switch per la lingua francese al kernel di calcolo e all'interfaccia utente e la documentazione centrale è stata tradotta in francese. Il relativo kernel di calcolo, versione 3.2.1, è stato compilato il 28 maggio 2015 e successivamente pubblicato sulla homepage dell'UFAM. Per la release 4.4.0 del 12 settembre 2016, il modello del calcolo dell'onda balistica è stato aggiornato e sono stati apportati vari miglioramenti e accelerazioni all'interfaccia utente.

---

<sup>1</sup>vedere <http://sonrail.empa.ch>

Nella versione 5.0.0 del kernel di calcolo è stata integrata come funzionalità aggiuntiva la possibilità di modellare i percorsi sonori attraverso aperture. Sono stati inoltre implementati specifici miglioramenti agli algoritmi di propagazione ed è stata aggiornata la validazione del modello. L'attuale versione 5.6.0 del nucleo di calcolo contiene ulteriori correzioni di bug e ottimizzazioni; si veda il documento "sonARMS Version Overview 2023 V5.6" (solo in tedesco).

La presente documentazione illustra la versione corrente del modello di calcolo di *sonARMS* e mostra come funziona e viene controllato il kernel di calcolo. Per informazioni dettagliate sul modello di dispersione consultare la relativa documentazione *Dokumentation sonX 2023.pdf*. Il modello di calcolo è stato pubblicato nel 2012 nel *Noise Control Engineering Journal* (Vol. 30, numero 3) con il titolo 'The Swiss shooting sound calculation model sonARMS'. L'interfaccia utente è trattata in un documento separato.

Il modello di calcolo, compresa l'interfaccia utente e la documentazione, può essere scaricato dalla homepage dell'UFAM. La documentazione completa è disponibile anche sulla homepage dell'EMPA all'indirizzo <https://www.empa.ch/web/s509/sonarms>.

## 2 Descrizione delle sorgenti sonore

Il modello di emissione distingue tre tipi di sorgenti per attività di tiro: esplosione alla bocca da sparo, onda balistica e detonazione.

### 2.1 Detonazione ed esplosione alla bocca da sparo

Nella categoria delle detonazioni ricadono gli eventi che non hanno componente balistica e sono definiti unicamente da una coordinata, come esplosioni o deflagrazioni di bombe a mano. D'altro canto, le detonazioni possono verificarsi alla fine di una traiettoria di un proiettile, sia in caso di impatto con il bersaglio che di accensione della carica del proiettile in aria. Le detonazioni sono modellate come sorgenti puntiformi omnidirezionali. La definizione è fornita in termini di livello di energia sonora  $L_S^2$  in bande di terzi d'ottava da 25 Hz a 5 kHz.

I colpi di fucile e gli eventi simili sono definiti da due coordinate, con la posizione della bocca all'inizio della traiettoria e il bersaglio alla fine. L'esplosione alla bocca accade nell'arma. Questa è modellata in bande di terzi d'ottava da 25 Hz a 5 kHz come una sorgente puntiforme direzionale. La direttività  $D_c$  in funzione dell'angolo di emissione  $\varphi$ , definito come l'angolo intermedio fra la direzione di sparo e la direzione di propagazione, è riprodotta da una serie di Taylor secondo l'equazione 1. Tale definizione presume che l'effetto direzionale dell'esplosione alla bocca sia simmetrico in termini di rotazione rispetto alla direzione di propagazione.  $L(\varphi)$  nell'equazione 1 indica il livello di energia sonora che si manifesta nella direzione di propagazione  $\varphi$ .

$$L(\varphi) = L_S + D_c(\varphi) = L_S + A + B \cdot \cos[\varphi] + C \cdot \cos^2[\varphi] + D \cdot \cos^3[\varphi] + E \cdot \cos^4[\varphi] \quad (1)$$

Il livello di energia sonora  $L_S$  e i parametri da A a E della direttività sono stati determinati per ciascuna sorgente di esplosione alla bocca, di solito sulla base di misurazioni. I dati sono riassunti nella banca dati sulle armi conformemente alla Sezione 3.

### 2.2 Onda balistica e balistica

Se il proiettile ha una velocità superiore a quella del suono, l'onda balistica si sovrappone come fonte aggiuntiva. Il livello di emissione dell'onda balistica è calcolato secondo la norma ISO 17201-4. Le variabili di

<sup>2</sup> S sta per 'Sorgente'. Il livello di energia sonora esprime il livello di potenza sonora nel caso di un rumore costante.

Rispetto ai valori di pressione sonora ad una distanza di riferimento di un metro, il livello di energia sonora è superiore di 11 dB.

input della norma ISO comprendono il diametro del proiettile (calibro), la lunghezza del proiettile dalla punta alla sezione a diametro maggiore, la velocità e la decelerazione istantanee.

Sulla base di confronti con i dati di misura, che hanno evidenziato una tendenza a sovrastimare le emissioni, nel 2016 è stata implementata una modifica del modello. A partire dalla versione 3.2.1, la lunghezza del proiettile viene moltiplicata per un fattore di 1.7, che corrisponde a una riduzione delle emissioni di 1.8 dB(A). Le formule corrispondenti sono elencate nell'allegato.

Ci sono due modi per definire la traiettoria nel modello. Per i sistemi d'arma militari può essere utilizzato un modulo balistico di armasuisse W+T<sup>3</sup>. Le armi e le munizioni sono identificate specificando tre parametri (Gun-Nr, Shell-Nr und Charge-Nr)<sup>4</sup>. Per una data posizione e coordinate del bersaglio, è possibile determinare la traiettoria corrispondente. In alternativa, la traiettoria del proiettile può essere definita specificando la velocità del proiettile alla bocca di sparo ed una diminuzione costante della velocità al metro. Questa procedura semplificata, adatta ad applicazioni civili con distanze di tiro relativamente brevi, si basa sull'ipotesi di una traiettoria di tiro dritta. Il modulo balistico armasuisse genera una segnalazione di errore e interrompe il calcolo se la bocca di sparo e il bersaglio sono troppo vicini o troppo lontani, in modo che il bersaglio non è raggiunto. Il primo caso si verifica spesso durante i tiri con fucile d'assalto negli stand dei tiratori a corto raggio. In questo caso si raccomanda di passare alla definizione alternativa di traiettoria. Se, secondo il modulo balistico, il bersaglio è troppo lontano, allora sono state specificate coordinate errate o l'arma o le munizioni non sono state inserite correttamente. In questo caso, l'artiglieria e i lanciamine (mortai) devono per lo più aumentare la loro carica.

La caratteristica dell'onda balistica secondo la norma ISO 17201-4 è che la posizione sorgente è determinata individualmente per ciascun recettore. Per poter mutuare lo stesso concetto dal *sonRAIL*, cioè di separare il calcolo di emissione da quello di propagazione, è stato scelto un approccio alternativo per l'implementazione in *sonARMS*. In una prima fase, la traiettoria della pallottola è divisa in punti equidistanti. La distanza standard utilizzata è di 2 m. La traiettoria del proiettile termina al bersaglio, quando si raggiunge una velocità subsonica o quando si intercetta il terreno. Quest'ultimo caso viene annotato nel file di log con un avviso (vedere la sezione 3). Per ciascun punto sorgente la posizione (X/Y/Z), il tempo di propagazione (T) e il valore di emissione  $L_E$  sono calcolati secondo la norma ISO 17201-4 (le relative equazioni della norma ISO 17201-4 sono elencate nell'appendice). Lo spettro dell'onda balistica secondo la ISO 17201-4 è calcolato per una distanza di riferimento di 1 m. Questa fase viene eseguita prima dell'effettivo calcolo della propagazione per tutte le sorgenti perché, da un lato, si riscontrano possibili errori nella definizione del progetto e, dall'altro, si determina anche l'orientamento della bocca di sparo, necessario per il calcolo dell'esplosione alla bocca.

In una seconda fase, per ciascun recettore e ciascuna sorgente d'onda balistica, viene verificato se il recettore è raggiunto dal rumore dell'onda balistica e, in caso affermativo, quale dei punti equidistanti della traiettoria è più vicino al punto sorgente dell'onda balistica. (Questa identificazione viene eseguita attraverso un'analisi temporale, dal momento che il suono proveniente dall'onda balistica raggiunge sempre per primo il recettore). Questa combinazione sorgente-recettore è introdotta in una matrice. Un successivo calcolo della propagazione viene eseguito solo per le combinazioni individuate.

Nota: La norma ISO 17201-4 considera traiettorie rettilinee e non è definita per casi di balistica generali. Di conseguenza, si presume che i proiettili possano solo perdere velocità durante il loro percorso, ma non che possano accelerare. Tuttavia, questo può accadere quando si prende in considerazione la balistica reale, quando si spara con angolo positivo o quando il bersaglio è posizionato significativamente più in basso del

---

<sup>3</sup>Il modulo balistico armasuisse non è pubblico e può essere utilizzato esclusivamente da enti autorizzati. Nella versione civile *sonARMS* viene fornito senza modulo balistico.

<sup>4</sup>Inoltre, nel modulo balistico è possibile selezionare l'angolo di tiro e l'atmosfera (pressione dell'aria e temperatura in funzione dell'altitudine). Tuttavia, questi parametri sono fissi nel *sonARMS*: ad eccezione dei lanciamine (mortai), si utilizzano generalmente angoli negativi e un'atmosfera standard.

tiratore. Nel caso di un tiro balistico con angolo positivo, il proiettile rallenta fino all'apice della traiettoria e poi accelera di nuovo. In *sonARMS*, la traiettoria della pallottola viene monitorata solo fino a quando non viene raggiunta la velocità subsonica. Una seguente accelerazione non viene più presa in considerazione nel calcolo dell'onda balistica. In caso contrario, se il proiettile non perde velocità o addirittura accelera a causa della geometria, nelle equazioni per il calcolo dell'onda balistica viene impostata una decelerazione minima della velocità, altrimenti si verificano discontinuità (cfr. appendice 1). I sistemi d'arma con propulsione a razzo non possono quindi essere calcolati con questo modello.

## 2.3 Banca dati delle armi

Tutte le informazioni necessarie per calcolare le emissioni sono conservate in una base dati delle armi. Questo, come tutti i set di dati richiesti, è disponibile sotto forma di file ASCII. Oltre alle informazioni sulla balistica e ai dati, misurati o calcolati, delle esplosioni alla bocca e di detonazione, le serie contengono le informazioni sull'origine dei dati. Inoltre, le note sulle applicazioni tipiche sono fornite all'utente nella sezione "Osservazioni". I set di dati sono disposti secondo la seguente parametrizzazione. Tra parentesi è indicato anche il numero di record di dati per categoria memorizzati nell'attuale database con stato al 19° settembre 2025:

### Militari:

- 1: Armi di fanteria (34)
- 2: Lanciamine/Mortai (36)
- 3: Carrarmato (9)
- 4: Artiglieria (14)
- 5: Contraerea (2)
- 6: Cannoni aeromobili (6)

### Civili:

- 11: Armi da fuoco portatili con cartucce a percussione centrale (15)
- 12: Armi da fuoco da pugno con cartucce a percussione centrale (14)
- 13: Armi da fuoco da pugno con cartucce a percussione anulare (8)
- 14: Armi da fuoco portatili con cartucce a percussione anulare (5)
- 15: Fucili da caccia con cartucce a palla (9)
- 16: Fucili a pallini (21)

La classificazione semplifica la selezione delle armi nell'interfaccia utente del *sonARMS*. Per le armi civili la classificazione corrisponde alle categorie di armi di cui all'Allegato 7 dell'OIF. La suddivisione è anche utilizzata per il calcolo dei livelli di valutazione parziali per categoria di armi (Allegato 7). Oltre alle singole armi, sono memorizzati anche valori medi rappresentativi di classe per le categorie di armi in conformità all'Allegato 7. I dati sulle emissioni di armi militari (categorie 1-5) non sono forniti nella versione civile di *sonARMS*. Di conseguenza, le armi utilizzate sia in ambito militare che civile, sono presenti doppiamente nella base dati completa. Le armi presenti doppiamente sono contrassegnate da un asterisco nella versione civile senza balistica.

La maggior parte dei record di dati del database delle armi *sonARMS* sono stati derivati dai dati delle armi di *WL04*. Un trasferimento diretto non è stato possibile, perché da un lato il database delle armi di *WL04* è formulato in bande d'ottava invece che in terzi d'ottava e dall'altro è stata usata una distanza di riferimento di un metro per il *WL04*. I dati sono stati convertiti in modo diverso a seconda del tipo di sorgente:

#### ▪ Esplosione alla bocca

Per *WL04* erano stati ammessi diversi metodi per descrivere la direttività (serie Taylor e Fourier) e la specificazione dei valori ad angoli discreti. Per *sonARMS* questi approcci sono stati congiunti e standardizzati (si veda l'equazione 1).

Per la conversione, le emissioni sono state determinate in passi di 15° utilizzando la descrizione della caratteristica direzionale secondo *WL04*. Successivamente, gli spettri in banda d'ottava sono stati interpolati in spettri in bande di terzi d'ottava da 25 Hz a 5 kHz. Sulla base di questo insieme di dati, la forza della sorgente e la funzione di direttività secondo l'equazione 1 sono state determinate per ogni banda di terzo d'ottava utilizzando un metodo di adattamento al minimo dei quadrati.

#### ▪ **Onda balistica**

Poiché *sonARMS* utilizza un nuovo set di dati balistici, è stato necessario regolare le impostazioni dei parametri corrispondenti per tutte le armi militari con balistica.

#### ▪ **Detonazione**

Tutti gli insiemi di dati esistenti riguardanti la detonazione sono stati convertiti secondo profili spettrali ipotetici (cfr. ISO 17201-2). Come criterio di ottimizzazione è stata utilizzata una deviazione media minima nelle singole bande d'ottava.

Nel caso di armi i cui proiettili esplodono contro l'obiettivo, la massa esplosiva liberata durante la detonazione è stata determinata in collaborazione con armasuisse W+T. Sulla base di questo valore, lo spettro di emissione è stato quindi determinato in accordo ai profili spettrali ipotetici.

#### ▪ **Valore medio di classe secondo categorie armi dell'Allegato 7 dell'OIF**

La banca dati delle armi di *sonARMS* contiene tutti i tipi di armi che sono stati misurati nell'ambito della revisione dell'Allegato 7 dell'OIF e i valori medi di classe per categoria di armi in base ai "pesi" allora determinati. Per la categoria d'armi f (fucili a pallini) sono state inoltre determinate due nuove medie di classe, una variante leggera per pesi dei pallini fino a 30 g per uso sportivo e una variante standard con pesi dei pallini fino a 36 g per uso misto (caccia / sport). I valori medi di classe determinati nell'ambito della revisione dell'Allegato 7 dell'OIF contenevano anche una percentuale significativa di fucili utilizzati esclusivamente dall'esercito e dalla polizia e pertanto non rappresentativi per un uso puramente civile (denominazione "Media delle armi di categoria f (fucili a pallini, incluso fucile multifunzione)").

#### ▪ **Tunnel di sparo e paratie laterali alle postazioni di tiro**

Già con il *WL04* erano stati impiegati set di dati speciali per le sorgenti, contenenti l'effetto di tunnel di sparo e di paratie laterali alla postazione di tiro come mitigazioni comuni per stand dei tiratori a 300m. Per *sonARMS*, questi set di dati sono stati ridefiniti. Oltre ai dati esistenti per il Fass 90 e il Fass 57, sono stati elaborati dati supplementari sulle emissioni per il fucile standard e per il valore medio di classe della categoria a.

Per determinare l'effetto delle paratie laterali sono state utilizzate le riduzioni del livello in dB(A) dipendenti dall'angolo specificato nell'*estensione del modello di rumore di tiro SL-90*. L'effetto delle paratie laterali è paragonabile a quello di un classico effetto schermo. Di conseguenza, per determinare la riduzione dei livelli spettrali è stata utilizzata la formula di Maekawa e la deviazione  $z$  è stata ottimizzata in modo tale da ottenere la riduzione del livello specificata nell'*estensione del modello di rumore di tiro SL-90*.

Anche per determinare l'effetto dei tunnel di sparo sono stati utilizzati gli approcci formulati, in dB(A), nell'*estensione del modello di rumore di tiro SL-90*. Tuttavia, la riduzione del livello che si verifica nei tunnel di sparo non corrisponde ad un effetto schermo in termini spettrali. Per questo motivo, l'influenza spettrale è stata derivata da una serie di misurazioni effettuate dall'Empa in cui sono state misurate le caratteristiche direzionali con e senza tunnel di sparo (cfr. rapporto EMPA n. 417'078).

Nell'*estensione del modello di rumore di tiro SL-90* sono indicati i valori di emissione per angoli orizzontali da 0 a 180°. In *sonARMS* l'angolo di emissione viene determinato tridimensionalmente in direzione del recettore o, in presenza di un ostacolo, in direzione del primo bordo di diffrazione. Poiché le paratie ed i tunnel di sparo vengono utilizzati solo negli stand dei tiratori, nella pratica non si verificano angoli di emissione superiori a 90°. In base alla definizione delle sorgenti per le esplosioni alla bocca, si assume una simmetria a 360° intorno all'asse della traiettoria anche per i set di dati sorgente con tunnel di sparo o paratie laterali.

### 3 Modello di propagazione

Il modello di propagazione implementato in *sonARMS* è una variante derivata dal modello di calcolo di *sonX*. La gamma di frequenza per l'analisi del rumore di tiro è stata impostata in bande di terzi d'ottava da 20 Hz a 5 kHz.

Il modello di propagazione *sonX* è diviso in quattro moduli. Per ogni calcolo di propagazione è necessario il modulo di calcolo BASIC. In questo modulo la propagazione sonora tra sorgente e recettore è calcolata per una sezione verticale assumendo un'atmosfera omogenea. Il calcolo dell'assorbimento dell'aria e dei boschi è effettuato in base alla norma ISO 9613. L'effetto suolo è calcolato in deviazione dalla norma ISO 9613 sulla base di un metodo per la riflessione delle onde sferiche su un terreno omogeneo. Il modello viene esteso per casi di terreni irregolari e per la modifica delle proprietà del suolo mediante un'analisi delle zone di Fresnel. Inoltre, vengono mappate le perdite per coerenza tra il suono diretto e la riflessione in funzione della frequenza e della distanza di propagazione. Oltre al percorso sonoro, in sezione, sopra gli ostacoli, *sonARMS* tiene anche conto dei percorsi sonori laterali e, dal 2018, di eventuali percorsi attraverso aperture.

Gli altri moduli possono essere attivati per affinare i risultati dei calcoli. Nel secondo modulo METEO si calcolano gli effetti meteorologici sulla propagazione sonora. Come dati di ingresso, oltre alla direzione del vento, sono necessari anche i profili verticali del vento, della temperatura e dell'umidità, che possono variare a seconda del terreno. Questo permette di determinare da un lato, l'influenza degli agenti atmosferici sull'assorbimento d'aria e dall'altro di utilizzare i profili di velocità del suono risultanti in un algoritmo di tracciamento del raggio sonoro che determina le variazioni dell'effetto schermo e la formazione di zone d'ombra acustiche. L'attenuazione del livello è derivata dai parametri geometrici del raggio sonoro più prossimo al recettore. Oltre alle singole condizioni meteorologiche, anche le statistiche meteorologiche possono essere direttamente modificate. Diverse condizioni specifiche sono definite e integrate con una frequenza di accadimento. In questo modo si ottiene una media energetica delle emissioni calcolate per ogni singola condizione, ponderata in base alla frequenza di accadimento. Secondo il concetto di giorno-sera-notte, già utilizzato nel *sonRAIL*, possono essere definite separatamente le ponderazioni delle singole condizioni meteorologiche per i periodi giorno, sera e notte.

Il terzo e il quarto modulo si occupano degli aumenti di livello dovuti alle riflessioni. Nel modulo REFLECT vengono determinate le riflessioni sugli edifici e su altri oggetti artificiali, nel modulo FOREST vengono calcolate le riflessioni diffuse dai bordi dei boschi e dalle aree a copertura rocciosa.

Il presente documento non contiene una descrizione dettagliata del modello. Per una compilazione dettagliata degli algoritmi di propagazione fare riferimento alla documentazione di *sonX*. I paragrafi seguenti descrivono le modifiche/estensioni al modello *sonX* che sono state specificamente implementate per *sonARMS*. Per ulteriori dettagli si rimanda alla pubblicazione nella rivista *Noise Control Engineering Journal* (Vol. 30, numero 3).

#### 3.1 Considerazioni sulla direttività dell'esplosione alla bocca

Il modello di propagazione *sonX* è formulato per sorgenti puntiformi omnidirezionali. La direttività delle esplosioni alla bocca secondo la formula 1 deve quindi essere considerata come un termine di attenuazione separato. Per determinare l'angolo di emissione, si utilizza l'allineamento dell'arma tenendo conto, da un lato, della balistica e, dall'altro, del percorso sonoro diretto, compresi eventuali ostacoli.

Per l'effetto del terreno, nel caso di sovrapposizione in fase tra suono diretto e riflessioni, anche la direttività gioca un ruolo fondamentale, in quanto ogni percorso sonoro ha un proprio angolo di emissione. Tuttavia, in situazioni di propagazione tipiche, per cui la distanza di propagazione orizzontale al suolo è di molte volte superiore all'altezza della sorgente, i diversi angoli di emissione differiscono solo leggermente l'uno dall'altro.



Si è pertanto deciso di non rappresentare questo effetto nel modello e di utilizzare per il calcolo dell'effetto suolo l'approccio per sorgenti puntuali omnidirezionali.

Lo stesso vale per il calcolo degli effetti meteorologici nel modulo METEO. La deviazione degli angoli di emissione tra i percorsi sonori diretti in un'atmosfera omogenea e disomogenea è ridotta, per cui non è necessario un aggiustamento della direttività rispetto al calcolo di base.

Nei modelli di riflessione, viene inizialmente calcolata la propagazione dalla sorgente al centro delle superfici riflettenti. La funzione di direttività calcolata in base all'angolo di emissione del raggio viene presa in considerazione come attenuazione aggiuntiva in maniera analoga al caso del suono diretto.

Il modello di riflessione incoerente in REFLECT presenta il vantaggio che il calcolo può essere eseguito integralmente per tutte le frequenze in un unico passaggio. Per sorgenti con effetto direzionale, tuttavia, la ponderazione dei singoli terzi d'ottava può variare a seconda dell'angolo di emissione. Per questo motivo il calcolo della riflessione deve essere spettrale. Per motivi di tempo di calcolo, viene eseguito un calcolo separato solo per ottave e non per terzi d'ottava.

### 3.2 Onda balistica

La norma ISO 17201-4 distingue tre regioni. La regione II, come mostrato nella Figura 1, corrisponde all'area di influenza dell'onda balistica classica risultante dal fronte d'onda del cono di Mach. La regione I è l'area dietro la bocca da sparo e la regione III rappresenta l'area dietro l'obiettivo. La norma fornisce formule di calcolo per le regioni II e III in cui i livelli sonori nella regione III sono significativamente inferiori a quelli della regione II. Poiché, da un lato, i livelli nella zona III non sono quasi mai un valore rilevante in relazione ai limiti dei livelli di valutazione o sono coperti dal rumore di esplosione alla bocca e di detonazione e, dall'altro, né il modello civile di rumore di tiro *sonGun* né il modello militare precedente *WL-04* considerano l'onda balistica in queste zone, si è deciso di non applicare questa parte della norma.

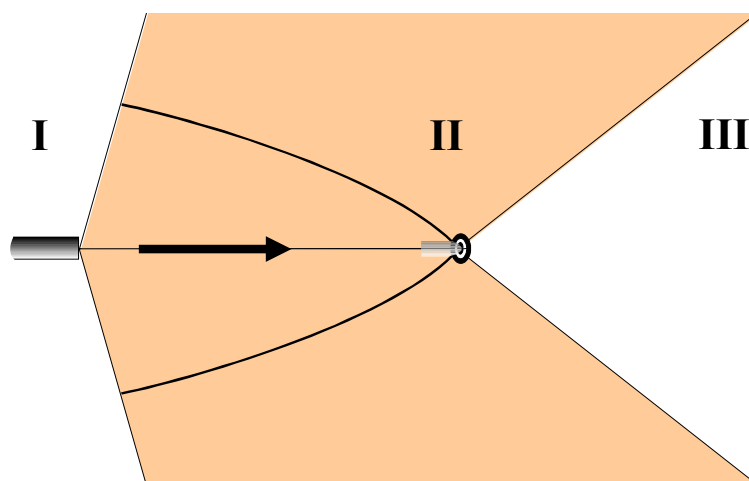


Figura 1 Regioni I, II e III dell'onda balistica. Inizio e fine della traiettoria sono determinate dalla bocca di sparo e dal bersaglio.

Il modello dell'onda balistica secondo la norma ISO 17201-4 utilizza alcuni algoritmi di propagazione specifici che ne valutano l'effetto come una sorgente lineare coerente. I seguenti punti si discostano dagli algoritmi standard del modello *sonX*:

- Viene considerata un'attenuazione per divergenza geometrica  $A_{div}$  secondo la norma ISO 17201-4.
- Come ulteriore termine di attenuazione, viene introdotta la riduzione del livello dovuta agli effetti non lineari  $A_{nlin}$  secondo la norma ISO 17201-4.

- A causa di effetti non lineari, la forma del segnale dell'onda balistica e quindi anche lo spettro, cambia all'aumentare della distanza di propagazione.

### Modifica del modello dell'onda balistica

Nel 2016 i confronti con le misurazioni hanno mostrato una tendenza alla sovrastima delle immissioni del modello dell'onda balistica. Da una consultazione con lo sviluppatore, Frank van den Berg del TNO (NL), è emerso che anche nelle validazioni olandesi è stata riscontrata una sovrastima media dell' $L_{AE}$  di 1.8 dB. Si presume che la ragione sia dovuta alla definizione della lunghezza del proiettile, che è già stata oggetto di discussione nel gruppo di lavoro sullo sviluppo della norma ISO 17201-4. Ci si chiede se nel modello debba essere presa in considerazione la lunghezza effettiva del proiettile, ossia dalla punta al diametro maggiore, o l'intera lunghezza del proiettile. Mentre il modello olandese prescrive di considerare la lunghezza effettiva, ci sono pareri che sostengono che, in considerazione di effetti di bordo, la "lunghezza effettiva" del proiettile per il calcolo dell'onda balistica debba essere un po' più lunga della lunghezza considerata fino al diametro maggiore del proiettile. I confronti tra i diversi tipi di munizioni per uso civile hanno mostrato che queste due lunghezze differiscono in media di un fattore di circa 1.70. Per non dover modificare l'intera banca dati delle fonti, l'UFAM ha deciso di integrare questo fattore 1.70 nel calcolo delle emissioni, cfr. formula (5) negli allegati.

### Calcolo delle riflessioni per l'onda balistica

Nei modelli di riflessione, l'attenuazione aggiuntiva specifica dell'onda balistica dovuta ad effetti non lineari viene presa in considerazione solo per il primo riflettore. Anche nel modulo REFLECT l'attenuazione geometrica specifica per l'onda balistica viene valutata solo fino al primo riflettore. Questo vale anche per le riflessioni, modellate come sorgenti diffusive, calcolate dal modulo FOREST (riflessione da zone rocciose e riflessioni dalle chiome degli alberi). Ciò in contrasto con la riflessione sul tronco, che viene intesa come riflessione a specchio nel modello di riflessione. In questo caso, l'attenuazione geometrica per l'onda balistica viene applicata sull'intero percorso di propagazione sorgente-riflettore-recettore.

Il modello di riflessione coerente del modulo REFLECT non può essere applicato all'onda balistica. Di conseguenza, il modello incoerente viene sempre utilizzato per questo tipo di fonte, indipendentemente dall'impostazione del kernel di calcolo. Nel modello di riflessione incoerente, viene utilizzato un calcolo per bande d'ottava analogo a quello dell'esplosione alla bocca.

## 3.3 Correzione $A_{lateral}$ per effetti schermo laterali

Per sorgenti lineari come ferrovie e strade, è sufficiente considerare solo i percorsi sonori lungo sezioni verticali. Tuttavia, nel caso di sorgenti puntiformi pure, come nel caso del rumore di tiro, anche i percorsi sonori che si sviluppano lateralmente attorno a un ostacolo possono diventare significativi. In situazioni in cui il percorso di deviazione sopra un ostacolo è maggiore di un percorso laterale, l'immissione è dominata da quest'ultimo contributo. Una visione puramente verticale porterebbe a sottovalutare le immissioni e a sopravvalutare l'effetto schermo degli ostacoli. Per questo motivo, i percorsi sonori laterali erano già stati considerati nel precedente modello di *sonARMS*: *WL04*.

L'effetto schermo laterale è integrato nel *sonARMS* come correzione del livello al normale calcolo diretto del suono del modulo BASIC. La correzione spettrale identifica gli aumenti di livello derivanti dalla considerazione dei percorsi acustici a sinistra ed a destra di un ostacolo. La correzione viene calcolata secondo la seguente procedura. Il tutto si basa sull'assunzione che la considerazione dei percorsi sonori laterali sia necessaria solo per gli oggetti artificiali, poiché il terreno naturale di solito non presenta bruschi cambiamenti di altezza.

1. Viene determinato il termine di attenuazione  $A_{grbar,Tv}$ , che si presenta in sezione verticale se si considera solo il terreno naturale (T per terreno). L'effetto schermo verticale effettivo - tenendo conto del mutato effetto suolo - risulta dal confronto con il termine di attenuazione  $A_{grbar,THv}$ , che è determinato come standard nel calcolo diretto del suono e mostrato nei risultati di dettaglio.

2. Vengono individuati tutti gli oggetti artificiali che si interpongono nel percorso diretto tra sorgente e recettore. Per il percorso sonoro verticale viene calcolata la deviazione  $z_{THv}$  (H per ostacolo) considerando il terreno e gli ostacoli artificiali.
3. Vengono determinati i punti di intersezione tra gli oggetti artificiali ed il percorso diretto. A questa stessa altezza, vengono ricercati gli angoli di emissione orizzontali che permettono il percorso intorno all'oggetto. Per ultimo viene determinato il percorso del suono laterale attorno agli ostacoli dalla sorgente fino al recettore. Il terreno non è considerato in questa valutazione. Ne risultano i percorsi sonori laterali che vengono utilizzati per calcolare le deviazioni di percorso a sinistra e a destra,  $z_{Hl}$  e  $z_{Hr}$ .
4. Per ciascuna delle tre deviazioni risultanti, viene calcolato un effetto schermo  $A_{bar}$  senza tenere conto delle riflessioni al suolo. L'algoritmo corrisponde alle varianti già implementate nel modulo BASIC. Tuttavia, la limitazione dell'effetto ostacolo è omessa.
5. Per i percorsi sonori laterali, l'effetto di ostacolo  $A_{bar}$  a 500 Hz viene confrontato con l'effetto di ostacolo massimo secondo il parametro *SingleBarrierMaxAtt*. Se questo valore viene superato, il percorso sonoro viene classificato come trascurabile e ignorato per le fasi successive.
6. La correzione dell'effetto schermo laterale  $A_{lateral}$  è ora calcolata per ogni banda di terzo d'ottava secondo la formula 2. La prima riga determina di quanto il livello di immissione aumenterebbe rispetto al calcolo standard del modulo BASIC se si tenesse conto anche dei percorsi sonori laterali attorno agli ostacoli artificiali. Nel caso di sorgenti direzionali, viene altresì considerato che l'angolo di emissione - e quindi anche la forza della sorgente - è diverso per i tre percorsi sonori identificati. Inoltre, il criterio della seconda riga garantisce che non si verifichi alcun aumento di livello in presenza di un ostacolo artificiale (anche la differenza tra  $A_{grbar,THv}$  e  $A_{grbar,Tv}$  deve essere maggiore di zero).

$$\begin{aligned}
 & -A_{lateral}(f) \\
 & = \text{Min} \left\{ \begin{aligned} & A_{bar,THv}(f) + 10 \cdot \log \left[ 10^{-0.1 \cdot A_{bar,THv}(f)} + 10^{-0.1 \cdot A_{bar,Hl}(f)} + 10^{-0.1 \cdot A_{bar,Hr}(f)} \right] \\ & A_{grbar,THv}(f) - A_{grbar,Tv}(f) \end{aligned} \right\} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Chiarimento per l'equazione 2: Il criterio per l'effetto ostacolo laterale secondo la prima riga tiene unicamente conto dell'effetto ostacolo senza riflessi al suolo. Si tratta di una semplificazione. Poiché la presenza di un ostacolo modifica anche i percorsi di riflessione, ne risulta un diverso pattern di interferenza tra il suono diretto e i diversi percorsi di riflessione a terra. Ad esempio, in presenza di un ostacolo, non si può più verificare un crollo significativo di interferenza come nel caso di assenza di schermatura, con una conseguente riduzione del livello significativamente inferiore rispetto a quanto ci si aspetterebbe considerando solo la deviazione  $z$ . In casi estremi non si può nemmeno escludere che la presenza di un ostacolo possa portare ad un aumento del livello, almeno in singole bande di terzi d'ottava.

**Nota:** La correzione per effetto schermo laterale può solo determinare un aumento del livello di immissione. Secondo la norma ISO 9613, tuttavia, i fenomeni di propagazione sono generalmente introdotti come attenuazioni. Per *sonARMS* è stato adottato l'approccio del sistema ISO 9613 e la correzione per effetto schermo laterale è stata definita come attenuazione.  $A_{lateral}$  può quindi assumere solo valori negativi per definizione. (L'attenuazione negativa può verificarsi anche con effetti del suolo e meteo, che corrispondono ad un aumento dei livelli di immissione).

**Nota:** L'algoritmo di ricerca dei percorsi sonori laterali presuppone che, oltre al percorso diretto tra sorgente e recettore, vi sia un percorso attorno agli ostacoli su ciascun lato e che questi tre percorsi, in pianta, non si intersechino. I percorsi sonori, ad esempio sotto forma di zig-zag tra gli edifici o all'interno di cortili completamente chiusi, non sono quindi correttamente identificati.

### 3.4 Correzione per percorsi sonori attraverso aperture $A_{bottom}$

Fino al 2018 *sonARMS* e *sonX* non consideravano i percorsi sonori al di sotto degli oggetti. Per questo motivo *sonARMS* differenziava tra ostacoli e paratie d'altezza. Gli ostacoli dovevano avere una chiusura al suolo e le

paratie d'altezza erano considerate unicamente come riflettori. Con la nuova versione del *sonARMS*, questa limitazione viene eliminata ed è quindi possibile modellare gli ostacoli senza contatto con il terreno. Per compatibilità con le versioni precedenti, è ancora possibile definire le paratie d'altezza come in precedenza. Anche se queste sono definite nello stesso modo degli ostacoli senza chiusura a terra, le paratie d'altezza sono considerate nella simulazione unicamente come superfici riflettenti. **Si consiglia pertanto di non utilizzare più questo tipo di oggetto.**

Il calcolo del percorso sonoro attraverso l'apertura, per determinare il termine di attenuazione  $A_{bottom}$ , viene effettuato in una fase separata, indipendentemente dal precedente calcolo dei percorsi sonori sopra e intorno agli ostacoli. Viene eseguito un secondo calcolo diretto del suono in cui vengono omessi tutti gli ostacoli artificiali senza contatto con il suolo che appaiono nella sezione originale del terreno. Questo calcolo integra una correzione addizionale per la dimensione dell'apertura, che in ultimo viene applicata allo spettro dell'immissione risultante. Questa correzione pondera, separatamente per ciascuna frequenza, la dimensione dell'apertura rispetto alla dimensione della prima zona di Fresnel a partire dal punto di apertura, analogamente alla ponderazione della superficie del riflettore durante il calcolo della riflessione al suolo. I punti dell'apertura per tutti gli ostacoli senza contatto con il suolo sono determinati in base alla sezione con il terreno e con tutti gli altri ostacoli. Questo può tradursi in una deduzione di livello se non esiste una linea visiva diretta tra la sorgente e il recettore. La correzione della dimensione dell'apertura tiene conto solo delle dimensioni in sezione verticale. Fornisce anche una correzione se il percorso sonoro determinante attraversa l'ostacolo senza chiusura inferiore. In caso di più ostacoli senza chiusura inferiore, viene utilizzata l'apertura con la più piccola dimensione rilevante in sezione verticale (o il più piccolo fattore della zona di Fresnel che ne risulta). I due livelli sonori diretti che ne risultano, il percorso sonoro sopra gli ostacoli e il nuovo percorso sonoro attraverso le aperture, vengono aggiunti energeticamente. Nel risultato di elaborazione viene mostrata un'attenuazione  $A_{bottom}$  che descrive l'aumento di livello (espresso come attenuazione negativa) del suono diretto come conseguenza dei percorsi sonori al di sotto di ostacoli senza chiusura a terra.

### 3.5 **Correzione per il passaggio del suono (trasmissione) $A_{trans}$**

Per poter modellare barriere antirumore e cortine mobili, nel 2024 è stata introdotta la possibilità di tenere conto anche della trasmissione. A tal fine sono stati introdotti ulteriori tipi di materiali che presentano un isolamento acustico basso o medio (categoria di isolamento acustico B1 o B2). Partendo da uno spettro di traffico stradale, una barriera di tipo B1 raggiunge un isolamento acustico  $DL_R$  di 12 dB(A) e una di tipo B2 di 18 dB(A). Per il tipo B3 ad alto isolamento acustico, come in precedenza, non viene calcolato il percorso del suono attraverso l'ostacolo.

Il calcolo della trasmissione viene effettuato in una fase separata, a integrazione del calcolo dei percorsi sonori sopra, sotto e lateralmente agli ostacoli. In *sonARMS*, l'effetto della trasmissione è integrato nel modulo BASIC in modo analogo ai percorsi sonori sotto e lateralmente agli ostacoli come correzione del livello rispetto al normale calcolo del suono diretto, dove sono ammessi solo aumenti di livello. Il calcolo viene effettuato come segue:

1. Viene determinato il percorso verticale sopra tutti gli ostacoli (artificiali e naturali) e calcolato l'effetto spettrale degli ostacoli secondo Maekawa senza limitazioni.
2. Gli ostacoli artificiali di tipo B1 e B2 che compaiono nel taglio del terreno originale vengono omessi e l'effetto ostacolo secondo Maekawa viene ricalcolato. La differenza tra i due effetti ostacolo  $\Delta A_{bar}$  descrive l'aumento di livello che si ottiene senza ostacoli con trasmissione.
3. Lungo il percorso del suono determinato al punto 2, vengono identificati gli ostacoli attraversati con trasmissione e l'attenuazione della trasmissione lungo il percorso del suono viene sommata in caso di più ostacoli con passaggio del suono ( $\sum DL_R$ ).

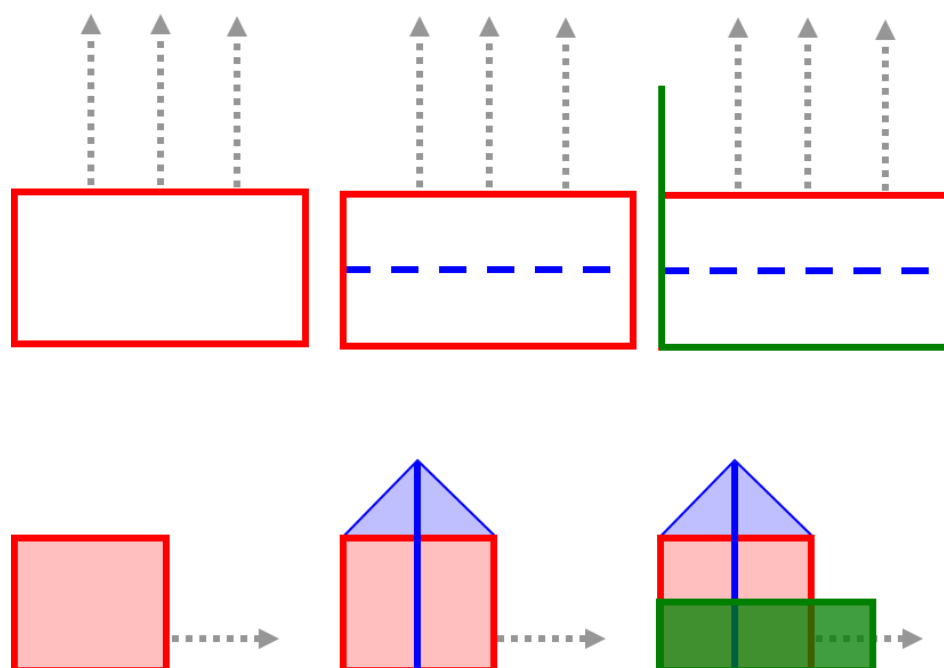
4. Il livello sonoro diretto del percorso sonoro che attraversa gli ostacoli viene calcolato dal livello sonoro diretto di riferimento su tutti gli ostacoli, compresa la riflessione del suolo, a cui viene aggiunto  $\Delta A_{bar}$  e da cui viene sottratto  $\sum DL_R$ .
5. Inoltre, viene controllato e limitato il fatto che il percorso sonoro attraverso l'ostacolo non possa portare a livelli più elevati rispetto a un percorso sonoro senza tale ostacolo. Ciò può verificarsi a causa di interferenze distruttive del suolo.
6. L'attenuazione  $A_{trans}$  descrive l'aumento di livello (espresso come attenuazione negativa) del suono diretto che risulta dalla considerazione del percorso sonoro aggiuntivo attraverso gli ostacoli. (Il calcolo viene effettuato calcolando la somma energetica del livello sonoro diretto di riferimento e del livello sonoro diretto di cui al punto 4 e sottraendo da essa il livello sonoro diretto di riferimento).

Nell'elaborazione dei risultati, delle tre correzioni per i percorsi sonori laterali, i percorsi sotto gli ostacoli e i percorsi attraverso gli ostacoli viene utilizzata solo la correzione dominante, vedere a questo proposito il capitolo 5.

### 3.6 Stand dei tiratori

Gli stand dei tiratori sono definiti come una specifica tipologia di ostacolo. La definizione è stata in gran parte ripresa dal modello di rumore *sonGun*, precedentemente utilizzato in Svizzera per la valutazione del rumore da attività di tiro. Mentre gli edifici normali sono definiti solo dalla pianta e dall'altezza delle pareti, è possibile per gli stand dei tiratori fornire ulteriori informazioni. Oltre alla planimetria, è possibile specificare la posizione e l'altezza del colmo del tetto, nonché le lunghezze e le altezze delle schermature laterali. Le caratteristiche acustiche possono essere definite separatamente per lo stand (incluso il tetto) e per gli schermi destro e sinistro. Questa definizione differisce in due punti da quella di *sonGun*. In *sonGun* era possibile inserire una tettoia di copertura. Tuttavia, *sonARMS* non prevede strutture a sbalzo, motivo per cui questo perfezionamento è stato omesso. Questa semplificazione è considerata ammissibile, in quanto l'effetto schermo già in assenza del bordo del tetto supera di solito la limitazione dell'effetto schermo e quindi un'attenuazione aggiuntiva non comporta un'ulteriore riduzione del livello. Gli schermi laterali sono un'estensione della definizione dello stand dei tiratori rispetto a *sonGun*.

Per non creare un'ulteriore categoria di ostacoli artificiali per il modello di propagazione, gli stand dei tiratori vengono convertiti in quattro singoli oggetti per il calcolo secondo la Figura 2. L'oggetto 1 descrive lo stand secondo la definizione standard dell'edificio in *SonX* come una serie di punti d'angolo con un'altezza di parete uniforme. Per gli stand dei tiratori, il numero di punti d'angolo è limitato a quattro. Poiché questa definizione può rappresentare solo costruzioni di tetti piani, il colmo del tetto è modellato come ostacolo aggiuntivo (oggetto 2). Gli oggetti 3 e 4 rappresentano ulteriori oggetti a parete, che rappresentano le schermature sinistra e destra (se presenti). Le schermature laterali vengono "allungate" intorno allo stand dei tiratori e comprendono gli schermi stessi, le pareti laterali e la parete posteriore dello stand dei tiratori. In questo modo le schermature vengono riconosciute come oggetti rilevanti per il calcolo dell'effetto schermo laterale nel caso di percorsi di propagazione obliqui verso il retro. L'altezza di questi oggetti coincide con l'altezza delle schermature anche attorno allo stand dei tiratori. Questa limitazione è stata scelta in modo che le schermature laterali non influiscano sulla correzione dell'effetto schermo laterale quando il percorso diretto tra sorgente e recettore si presenta ripido verso l'alto.



**Figura 2** Schizzo degli oggetti utilizzati per definire gli stand dei tiratori, nella parte superiore con vista in pianta e in quella inferiore con vista laterale. L'oggetto 1 è rosso, l'oggetto 2 è blu, gli oggetti 3 e 4 sono visualizzati in verde. Procedendo da sinistra a destra viene aggiunto un elemento.

### 3.7 Paratie d'altezza

Con gli stand dei tiratori può accadere che i livelli di immissione nella zona posteriore siano dominati da riflessi sulle paratie d'altezza. Per questo *SonARMS* offre la possibilità di collocare superfici riflettenti che, a differenza delle pareti, non devono necessariamente raggiungere il pavimento. Analogamente per la definizione di ostacoli ed edifici, per le paratie d'altezza le proprietà di riflessione possono essere specificate. Queste vengono prese in considerazione nel modello come superfici di riflessione ma ignorate nel calcolo dell'effetto schermo.

Con la versione 4.6.0 di *sonARMS* è stata introdotta la possibilità di modellare ostacoli senza chiusura inferiore. Per schermi alti e altri oggetti senza chiusura inferiore che generano non solo riflessioni ma anche un effetto di ostacolo, si consiglia di non utilizzare più oggetti schermo alto e di riprodurli come ostacoli senza chiusura inferiore.

### 3.8 Analisi temporale e calcolo dei livelli massimi con la costante di tempo FAST

Né il modello di rumore ferroviario *sonRAIL* né quello di rumore da attività di tiro *WL04* erano stati progettati per ricostruire l'andamento del livello sonoro nel tempo. I risultati venivano emessi come livello equivalente medio  $L_{eq}$  o come livello dell'evento  $L_E$ . In base al mandato, sarebbe dovuto essere possibile con *sonARMS* effettuare valutazioni conformemente all'Allegato 7 dell'OIF. Il valore acustico di base nell'Appendice 7 è un livello sonoro massimo ponderato A con la costante di integrazione FAST. Questo  $L_{AFmax}$  non è una grandezza proporzionale all'energia e richiede di calcolare la curva livello sonoro-tempo. Per questo il modello di propagazione *sonX* è stato esteso con la capacità di effettuare un'analisi temporale.

Il tempo di inizio  $t = 0$  s è il momento di sparo. L'andamento della velocità del proiettile è utilizzato per determinare il tempo di percorrenza del proiettile fino al raggiungimento dei punti sorgenti dell'onda balistica o del punto di detonazione. Utilizzando la velocità del suono e la distanza di propagazione, è possibile

calcolare il tempo di arrivo del suono diretto da ciascuna delle tre sorgenti parziali. In presenza di uno o più ostacoli, il tempo di propagazione sonora per ogni sorgente (esplosione alla bocca - onda balistica - detonazione al bersaglio) viene determinato separatamente per tre percorsi, per il percorso sopra gli ostacoli e per le due vie laterali destra e sinistra. Il livello sonoro diretto ponderato A è diviso nei tre contributi considerando il "peso" dei tre percorsi individuati. I tre contributi vengono sommati in un segnale temporale in base al livello e alle tempistiche di propagazione. Successivamente, la costruzione della curva di livello FAST viene calcolata da questi tre contributi e il livello massimo viene derivato da questa curva. Le influenze meteorologiche sui tempi di propagazione sonora sono trascurate.

Il modello per le riflessioni su oggetti artificiali (modulo REFLECT) è costruito in una modalità che non permette di tracciare il tempo di propagazione dei singoli percorsi sonori. Pertanto, in una fase separata, si identifica il riflettore che si trova alla distanza più breve dalla sorgente e dal recettore ed allo stesso tempo ha una visione diretta su entrambi. Se non viene trovato alcun riflettore con visione diretta della sorgente e del recettore, ossia se non si verificano riflessioni del primo ordine, si determina il riflettore che si trova alla distanza più breve dal recettore e che ha una linea visiva diretta con il recettore. In entrambi i casi si può supporre che le prime riflessioni rilevanti impattino il recettore a partire da questo riflettore. Volendo effettuare un'analisi del caso peggiore, l'intera energia sonora riflessa viene allocata al percorso sonoro sorgente-riflettore-recettore e al corrispondente tempo di propagazione. Ciò tende a sopravvalutare i livelli di immissione che ne risultano.

**Nota:** In generale, il modulo di riflessione non include i contributi provenienti da facciate che si trovano al di sotto di una distanza minima di un metro dal recettore. I riflessi della facciata propria dell'edificio non vengono quindi presi in considerazione, ad esempio per i recettori collocati in corrispondenza di finestre aperte, né nel calcolo della riflessione né nell'analisi temporale del livello sonoro.

Nel modulo FOREST per il calcolo delle riflessioni da boschi e zone rocciose viene eseguita un'analisi temporale per ogni elemento riflettente. I pacchetti di energia che arrivano al recettore vengono ordinati in base al loro tempo di arrivo e combinati con una risoluzione temporale di 10 ms. Gli elementi riflettenti sono distribuiti sull'area boschiva; ognuno di essi rappresenta un significativo numero di alberi. Per compensare l'approssimazione dovuta alla discretizzazione nel calcolo del livello massimo, viene applicata una media mobile con una costante temporale di 150 ms. Insieme ai tempi di arrivo dei pacchetti di energia del suono diretto e alle riflessioni sugli oggetti artificiali, si ottiene una curva di livello a risoluzione temporale elevata. Le corrispondenti curve di livello temporale vengono generate separatamente per ciascuna combinazione sorgente-recettore, per ciascuna sorgente parziale (esplosione alla bocca - onda balistica - detonazione al bersaglio) e per la somma delle tre sorgenti parziali. Per le curve di livello temporali risultanti, la valutazione FAST viene eseguita per ciascuna sorgente parziale e per la curva temporale risultante dalla loro somma e vengono determinati i livelli massimi. L'algoritmo per la determinazione digitale del valore RMS mobile (valore efficace) è riportato in allegato. A seconda delle impostazioni dei parametri, queste quattro curve di livello temporali vengono salvate anche in un file ASCII (vedere sezione 5). La durata dell'analisi temporale può essere scelta liberamente. L'impostazione predefinita consigliata è 5 s.

## 4 Struttura ed organizzazione di *sonARMS*

### 4.1 *Struttura del programma*

*sonARMS* non richiede alcuna installazione. I file e le strutture descritti di seguito devono essere memorizzati solo su un'unità locale. Il programma di calcolo può essere conservato in una cartella separata, ad esempio in Programmi, o insieme ai file di progetto. La prima variante, a cui fanno riferimento le seguenti valutazioni, è consigliata per l'uso in combinazione con l'interfaccia utente del *sonARMS*. La seconda variante è consigliata per i controlli di calcolo da sistemi di informazione grafica con diversi core di calcolo in cui il kernel del

*sonARMS* viene copiato con il progetto da eseguire. I calcoli possono essere eseguiti su computer basati su sistemi Windows o Linux.

Nella cartella del programma *sonARMS* si trovano una copia della documentazione e due sotto-cartelle. La cartella GUI contiene l'interfaccia utente che viene eseguita all'avvio del programma *GUI-sonArms.exe*. Nel caso della variante militare di *sonARMS*, il modulo balistico si trova nella stessa cartella composto da quattro file *bal.dll\\_empa.dll*, *em-pa\\_2004df.dat*, *empa\\_2004sf.dat* e *Metpc.txt*. La cartella GUI contiene anche il programma *SonArmsLr.exe* per il calcolo dei livelli di valutazione e tre file di testo per la gestione del numero di versione, dei preferiti e dei percorsi di memorizzazione.

Nella seconda cartella *Kernel* ci sono altre due sottocartelle, denominate *Bin* e *Settings*. La cartella *Bin* contiene il kernel *SonArms\_Kernel\_V5.0.0.exe*, i quattro file del modulo balistico e un file chiamato *PathsSonArms.txt*. Il file *PathsSonArms.txt* definisce i percorsi di input ed output del *sonARMS*. Da un lato vengono definiti i percorsi per i dati di base e dall'altro vengono definiti i percorsi per i file dei risultati e i file di log. Tutti i percorsi elencati sotto "*// Diese Pfade sind relativ zum \*Projektverzeichnis\**" si riferiscono alla cartella di progetto di *sonARMS* (vedi paragrafo 4.3). Tutti gli altri percorsi "*// Alle Pfade unten sind relativ zum \*Programmverzeichnis\**" si riferiscono alla directory del programma *sonARMS*. A seconda della struttura dei dati selezionata, potrebbe essere necessario regolare questi percorsi.

La cartella *Settings* contiene tutti i dati di base necessari per un calcolo. I singoli file, che sono raggruppati in quattro sottocartelle, sono presentati nella sezione seguente.

**Nota:** la versione civile viene fornita senza modulo balistico e senza armi militari.

## 4.2 Dati di base

- Nella cartella *Settings-Frequencies* è presente un singolo file TXT in cui è possibile definire separatamente la gamma di frequenze per il calcolo della propagazione per ciascuno dei quattro moduli di calcolo (al massimo dal terzo d'ottava di 25 Hz al terzo d'ottava di 10 kHz). Oltretutto, vi sono memorizzati diversi parametri del modello dipendenti dalla frequenza, in particolare spettri standardizzati dell'effetto suolo per le riflessioni su boschi e rocce, nonché gradi di dispersione per le riflessioni su rocce in funzione della discretizzazione del riflettore.
- La cartella *Settings-Materials* definisce la caratterizzazione dei diversi tipi di suolo, e specifica anche una classificazione in base alle proprietà dei materiali, che è necessario per descrivere oggetti artificiali come edifici o barriere antirumore.

I materiali sono caratterizzati da tre proprietà: struttura, isolamento acustico e assorbimento acustico. L'assorbimento acustico è classificato nelle classi da A1 a A4 secondo la EN 1793-1, Tabella A.1 e l'isolamento acustico nelle classi da B1 a B3 secondo la EN 1793-2, Tabella A.1. Per la struttura superficiale è stata introdotta una divisione separata in tre classi: C1 per le superfici lisce, C2 per quelle debolmente strutturate e C3 per quelle fortemente strutturate. Ogni proprietà del materiale è definita in un file separato. Un quarto file, chiamato *MaterialTypes.txt*, contiene un elenco di combinazioni concrete di queste tre proprietà. Tuttavia, poiché solo le proprietà di assorbimento sono rilevanti per *sonARMS*, solo questo parametro viene modificato. Le proprietà di assorbimento vengono automaticamente prese in considerazione nel modulo REFLECT. La profondità strutturale può anche essere presa in considerazione nel modulo REFLECT non singolarmente per ogni riflettore ma solo come definizione di una frequenza di separazione fra riflessioni a specchio e dispersive. Poiché *sonARMS* tiene unicamente conto della propagazione del suono nell'aria, non è necessario l'isolamento acustico come parametro del modello.

Il file di tipizzazione del terreno definisce le proprietà acustiche e meteorologiche per otto tipi di suolo di riferimento. Ad esempio, si fa una distinzione tra acque, praterie o boschi. A questi tipi di riferimento vengono assegnati i tipi di dati relativi all'utilizzazione del suolo, per esempio i 27 tipi di superficie primaria secondo il modello vettoriale 25 di swisstopo o le 26 classi di copertura del suolo secondo il sistema ufficiale di misurazione ufficiale. Le proprietà assegnate ai diversi tipi di substrati sono utilizzate nel calcolo degli effetti diretti sonori e meteorologici. Poiché in questo gruppo di dati



sono definite le aree boschive e rocciose, i dati corrispondenti costituiscono anche la base per il calcolo delle riflessioni sui boschi e sulle rocce.

- La cartella *Settings-Meteoprofiles* contiene 15 file con i profili verticali standardizzati di vento, temperatura e umidità. La classificazione dei profili distingue tra tre classi di stabilità atmosferica e cinque classi di velocità del vento. I profili sono immagazzinati separatamente per ogni tipo di suolo di riferimento e quindi tengono conto del fatto che i profili di vento, temperatura e umidità, per esempio, sono significativamente diversi al di sopra di una superficie d'acqua piuttosto che al di sopra di un campo o di aree boschive. Per maggiori informazioni si veda la pubblicazione "*Application of statistical weather data from the numerical weather prediction model COSMO-2 for noise mapping purposes*" in *Acta Acustica United with Acustica* (2011, vol. 97).
- Nella cartella *Settings-Weapons* sono memorizzati uno o più database di armi sotto forma di file TXT (vedere la sezione 3). La versione attuale con armi civili è etichettata `Wea-ponDatabase2018_De-FrIt.txt`.

**Nota:** i file memorizzati nella cartella *Settings* non devono essere modificati dagli utenti. Si noti che manipolazioni errate possono portare a risultati di calcolo insensati o ad un arresto anomalo dei calcoli.

### 4.3 Struttura del progetto e definizioni

Dal punto di vista della struttura, si propone di creare una directory per ogni progetto di calcolo in cui si trovano il file di progetto con estensione WLP e quattro sottocartelle *Input*, *Output*, *Logfiles* e *Parameter*. I nomi delle cartelle *Output* e *Logfiles* sono definiti nel file `PathsSonArms.txt`. Se non esistono ancora all'inizio del calcolo, vengono generate dal kernel di calcolo. Nella cartella *Parameter* si trova il file dei parametri di *sonARMS*, nel quale sono specificate le impostazioni di base. Il percorso di questo file è anche definito in `PathsSonArms.txt`.

Il file di progetto, che come tutti gli altri file utilizzati è un file di testo puro, contiene i riferimenti ai file aggiuntivi necessari in diversi blocchi di testo a struttura predeterminata, nonché tutte le informazioni specifiche del progetto, vale a dire posizione e caratteristiche dei recettori, sorgenti, stand dei tiratori, paratie d'altezza, schermi, mappe acustiche e condizioni meteorologiche. Per i commenti, è disponibile per ogni elemento del file di progetto \*.wlp, una riga opzionale con il campo `#"Commento"`. Queste linee sono ignorate da tutti i kernel, anche nelle versioni precedenti. L'interfaccia grafica li visualizza e li salva.

Di seguito sono riportati alcuni esempi di tutti questi blocchi di dati.

```

*****Globale_Daten
"Topo"                Input\DTM_05m.txt"
#"Topo2"              "
#"Topo3"              "
"Kartenbild"          Input\PK25.tif"
#"Bild2"              "
#"Bild3"              "
"Primärflächen"       Input\Primaerflaeche.txt"
"Gebaeude"            Input\Gebaeude.txt"
#"Bemerkung"

```

**Tabella 1** Blocco iniziale del file di progetto con riferimenti ai file aggiuntivi richiesti.

La Tabella 1 mostra i riferimenti ad altri file in forma di blocco con la denominazione 'Dati Globali' all'inizio di ogni file di progetto. In Topo la topografia è definita come un file ASCII in formato ESRI Grid.

Nella riga *Cartografia* è possibile specificare un file bitmap o GeoTiff che mostra un'immagine della mappa per la sezione per la quale è stata preparata la topografia. Tuttavia, questa immagine è necessaria solo per la visualizzazione nell'interfaccia utente, ma non per il kernel di calcolo effettivo. Nel caso di file bitmap, la dimensione dell'immagine deve corrispondere esattamente alla dimensione del file del terreno. In caso contrario, gli oggetti non vengono visualizzati correttamente. I file GeoTiff contengono informazioni sulla posizione dell'immagine nell'intestazione del file, per questo motivo si consiglia di utilizzare questo formato. Per poter visualizzare l'intera area del progetto, l'immagine GeoTiff deve coprire una sezione più grande rispetto al file del terreno.

In *Superfici primarie* si fa riferimento a un file che definisce l'uso del suolo in base alle specifiche dei tipi di suolo sotto forma di poligoni o di griglia. Il kernel di calcolo elabora le informazioni sulle proprietà di copertura del suolo come una griglia. Se i dati sono inseriti sotto forma di poligoni, devono prima essere convertiti in una griglia; per le superfici alle quali non è assegnato alcun tipo di superficie primaria, viene utilizzata come copertura del suolo la tipologia prato.

Il file *Edifici.txt* contiene edifici definiti come poligoni chiusi. Gli edifici sono trattati dal kernel di calcolo in modo analogo agli ostacoli (schermi) che possono essere inseriti nel file di progetto, cioè producono schermature e riflessioni. Il calcolo tiene conto sia degli edifici specificati nel file che degli ostacoli definiti nel progetto. In linea di principio, sarebbe possibile ricreare tutti gli edifici all'interno del file di progetto. Tuttavia, il concetto di definizione del progetto *sonARMS* si basa sul fatto che solo le informazioni specificamente generate dall'utente vengono memorizzate nel file di progetto stesso. Questo ha il vantaggio che il file di progetto non diventa troppo grande e può essere allegato a qualsiasi file di risultato (questo è auspicabile per motivi di garanzia della qualità). Analogamente al terreno e alla sua copertura, l'ubicazione e l'altezza degli edifici sono dati di input che non sono specifici per il progetto e che di solito sono ottenibili da un fornitore di dati esterno (ad es. Swisstopo). Le barriere antirumore, le pareti divisorie nelle installazioni di tiro di breve distanza e altri ostacoli direttamente legati al tiro e alla situazione locale, tuttavia, devono essere inseriti e controllati dall'utente.

Come si può vedere nella Tabella 1, oltre al nome del file viene mostrata anche la sotto-cartella in cui il file è salvato.

Opzionalmente, #Topo2 e #Topo3 o #Bild2 e #Bild3 possono essere usati per designare file di importazione aggiuntivi per le immagini del terreno e dello sfondo, che sono poi disponibili per l'utente come alternative. Tuttavia, questa opzione è rilevante solo se viene utilizzata la funzione di importazione.

Nelle seguenti tabelle da 2 a 8 si mostrano esempi di tutti i blocchi di progetto nei file WLP. I singoli campi di dati sono in gran parte auto esplicativi, per cui non è necessario fornire una descrizione dettagliata. In caso di necessità, ulteriori informazioni sono riportate direttamente nella didascalia della tabella.

#### \*\*\*\*\*Empfangspunkt

"N" 2

#### \*\*\*Empfangspunkt

"Name" M45"

"Gebäude" Haus\_1234

"Koor" 756929 1909214

#### \*\*\*Empfangspunkt

"Name" M90"

"Gebäude"

"Koor" 756900 1908504

**Tabella 2** Definizione di due recettori. Se una voce è disponibile in "Edificio", si presume che il recettore sia posizionato nella finestra aperta, altrimenti si tratta di un punto in campo libero (questa distinzione ha effetti sui risultati, vedere spiegazione per la Tabella 9). I punti della finestra aperta devono essere posizionati 10-20 cm davanti alla facciata. Il kernel di calcolo non regola automaticamente le coordinate, ma nell'interfaccia utente vi è la possibilità di allineare i punti su una facciata.

#### \*\*\*\*\*Quelle

"N" 3

#### \*\*\*Quelle

"Name" 342-Mw8.1cm(Ldg2)"

"Koor" 756895 191170 1.2

"Ziel" 756250 191930 0.6

"Waffe" Mw33/72\_8.1cmEUG91(Ldg2)"

#### \*\*\*Quelle

"Name" 300m-Stand(Stadt)"

"Koor" 757342 191292 2.5

"Ziel" 757128 191490 1.5

"Waffe" Stgw90(5.6mmGwPat90)"

""Quelle			
"Name"	411-EUHG85"		
"Koor"	NaN	NaN	NaN
"Ziel"	756313	191266	0.4
"Waffe"	EUHG85"		

**Tabella 3** Definizione di tre sorgenti. L'identificatore in "Arma" deve trovarsi nella banca dati sulle armi. In caso contrario non è possibile effettuare il calcolo.

#### """"Schützenhaus

"N" 1

#### ""Schützenhaus

"Name"	300m-Stand"		
"BaseL"	757320	191266	6
"BaseR"	757367	191319	
"Tiefe"	10		
"FirstX"	5		
"FirstH"	9		
"BlendeLX"	15		
"BlendeLH"	2.5		
"BlendeRX"	NaN		
"BlendeRH"	NaN		
"OberflTypHaus"	502"		
"OberflTypBlendeL"	504"		
"OberflTypBlendeR"	504"		

**Tabella 4** Definizione di uno stand dei tiratori. Con BaseL e BaseR viene definito lo stand dei tiratori (parete frontale). "Profondità" definisce la profondità dello stand e FirstX e FirstH la posizione relativa e l'altezza del colmo del tetto in relazione allo stand dei tiratori. Con gli ulteriori campi è data la possibilità di definire schermature laterali direttamente collegate allo stand dei tiratori. Occorre fare attenzione che le coordinate delle sorgenti di sparo si trovino a qualche centimetro di distanza, esternamente e frontalmente, dallo stand dei tiratori. Nell'interfaccia utente è possibile allineare automaticamente le sorgenti alla linea frontale dello stand. Le ultime tre linee specificano le proprietà del materiale dello stand e dei due pannelli laterali. Il numero di identificazione utilizzato si riferisce alla definizione dei tipi di superficie.

#### """"Hochblende

"N" 1

""Hochblende

"Name"	300m- Stand"				
"Oberfltyp"	504"				
"Koor"	2				
	757327	191273	8	5	
	757360	191313	8	5	

**Tabella 5** Definizione di una paratia d'altezza. Le paratie d'altezza necessitano di un'altezza iniziale e finale. Il campo "TipoSuperficie" specifica le caratteristiche di riflessione della paratia. Le paratie d'altezza sono considerate nel modello come riflettori ma non come schermature. È consigliato di non utilizzare più questo tipo di oggetti, vedere Paragrafo 3.7 (Attenzione: per motivi di coerenza con la successiva definizione di ostacolo, le informazioni sull'altezza sono in ordine invertito rispetto alle versioni precedenti).

#### \*\*\*\*\*Hindernis

"N" 2

#### \*\*\*Hindernis

"Name" Alte Kaserne - Baracke"

"Oberfltyp" 501"

"Koor" 5

757184.7 190734.7 4.5 0

757162.1 190759.8 4.5 0

757155.3 190752.8 4.5 0

757177.2 190728.1 4.5 0

757184.9 190734.5 4.5 0

#### \*\*\*Hindernis

"Name" LSW-Alte Baracke"

"Oberfltyp" 504"

"Koor" 2

757168.8 190758.8 4 2

757172.7 190755.1 4 2

**Tabella 6** Definizione di due schermature. Il primo schermo è posato al suolo, il secondo prevede un'apertura sottostante. Il campo "Oberfltyp" specifica le caratteristiche di riflessione dello schermo.

#### \*\*\*\*\*Lärmkarte

"N" 1

#### \*\*\*Lärmkarte

"Name" Laermkarte"

"Raster"	10	
"HüBoden"	4.2	
"Koor"	3	
	756162.1	190571.4
	756033.8	190505.3
	756026.7	190753

**Tabella 7** Definizione di un'area di mappa acustica. Con il campo "Raster" si specifica la spaziatura dei punti della griglia della mappa. Il poligono viene automaticamente chiuso anche in mancanza della prima o dell'ultima coordinata.

#### \*\*\*\*\*Meteosituation

"N"	2
-----	---

#### \*\*\*Meteosituation

"Name"	Naechtliche Inversion"
"MeteoFile"	Settings \ SP_S0.txt"
"Windrichtung"	NaN
"Haeuf_Tag"	0
"Haeuf_Abend"	0.15
"Haeuf_Nacht"	1
"Temp_10m"	10
"RF_10m"	70

#### \*\*\*Meteosituation

"Name"	Föhn"
"MeteoFile"	Settings \ SP_L4.txt"
"Windrichtung"	31
"Haeuf_Tag"	1
"Haeuf_Abend"	0.85
"Haeuf_Nacht"	0
"Temp_10m"	20
"RF_10m"	40

**Tabella 8** Definizione di due condizioni meteo. Una direzione del vento di 0 identifica un vento proveniente dal nord, 90 identifica un vento proveniente da est. Nella prima condizione meteo non è data alcuna direzione del vento in quanto relativa a condizione di vento nullo. Gli inserimenti di temperatura e umidità relativa sono opzionali.

## 4.4 Procedimento di calcolo

Di regola l'inizio di un calcolo viene eseguito a partire da un'azione nell'interfaccia utente (GUI). Tuttavia il kernel di calcolo può anche essere eseguito manualmente utilizzando un file BAT. Il file BAT contiene la chiamata al kernel di calcolo e può essere visualizzato e modificato con un editor di testo. Una tipica chiamata al programma si presenta in questo modo:

### **.\Kernel\bin\sonARMS ..\ProjektXY.wlp p bmfr**

Il senso della riga precedente è: 'Esegui *sonARMS*, che si trova nella cartella *Kernel\Bin*. Carica il file di progetto *ProjektXY* ed esegui il calcolo per punti singoli (parametro **p**) con i moduli di calcolo **b** per BASIC, **m** per METEO, **f** per FOREST ed **r** per REFLECT'. Rispetto alla posizione del file BAT, il kernel si trova in una sotto-cartella mentre il file di progetto si trova nella stessa cartella. **r** può essere utilizzato in alternativa al parametro **p**. In quel caso non viene eseguito un calcolo per singoli recettori, ma per un'intera griglia, che può essere utilizzata per creare mappe acustiche. Se si desidera, i parametri **m**, **f** e **r** possono essere omessi e quindi i moduli di calcolo METEO, REFLECT e FOREST disattivati.

Fintanto che le impostazioni corrispondenti nel file *PathsSonArms.txt* non sono state modificate, il kernel salva durante il calcolo messaggi di stato, di avviso e di errore nella cartella denominata *Logfiles*. In ogni caso, vengono generati un file di log e un file di stato. Se vengono chiamati in esecuzione più moduli, viene creato un file per ogni modulo. Il nome del file è costituito dal nome del progetto (es. *ProjectXY*), dal nome del modulo (base, meteo, foresta o riflessione) e dall'estensione 'Log.txt' o 'Status.txt'. Il file di stato viene continuamente aggiornato e mostra la percentuale di calcolo già eseguita e la stima per l'intero tempo di calcolo. Nel file di log i singoli passaggi vengono documentati e i messaggi di avvertimento e di errore vengono registrati. Gli avvisi riguardano irregolarità che vengono compensate dal kernel di calcolo. Di solito si tratta di problemi con i dati di input, ad esempio se non sono state specificate le proprietà superficiali di un ostacolo (viene utilizzato un valore predefinito) o se un poligono dell'edificio non è chiuso (viene chiuso). Il calcolo non viene quindi interrotto. Tuttavia, è sempre consigliabile seguire le avvertenze nel file di log e correggere le corrispondenti discrepanze nei dati di progetto. Gli errori sono eventi che rendono impossibile eseguire correttamente il calcolo. Ciò può accadere, ad esempio, se il modulo balistico segnala che il bersaglio non può essere raggiunto con un colpo o se non è possibile accedere a un file richiesto. Gli errori causano l'interruzione del calcolo. Durante la costruzione del modello ci si è preoccupati di poter rilevare gli errori il prima possibile per non dover interrompere i calcoli dopo diverse ore di processo. Se il calcolo deve essere interrotto, viene creato un terzo file con estensione 'Err.txt' in cui viene memorizzato il corrispondente messaggio di errore.

## **4.5 Parametri del sonARMS**

Nel file *SonArmsParameter.txt* sono presenti tutti i parametri del modello e le ulteriori impostazioni che influenzano il funzionamento del kernel. Oltre ai parametri generali, contiene anche impostazioni specifiche per *sonARMS* così come per gli altri due programmi *sonRAIL* e *sonAIR*. Tutti i parametri sono forniti con suggerimenti per l'impostazione. Una descrizione dei vari parametri si trova nella documentazione.

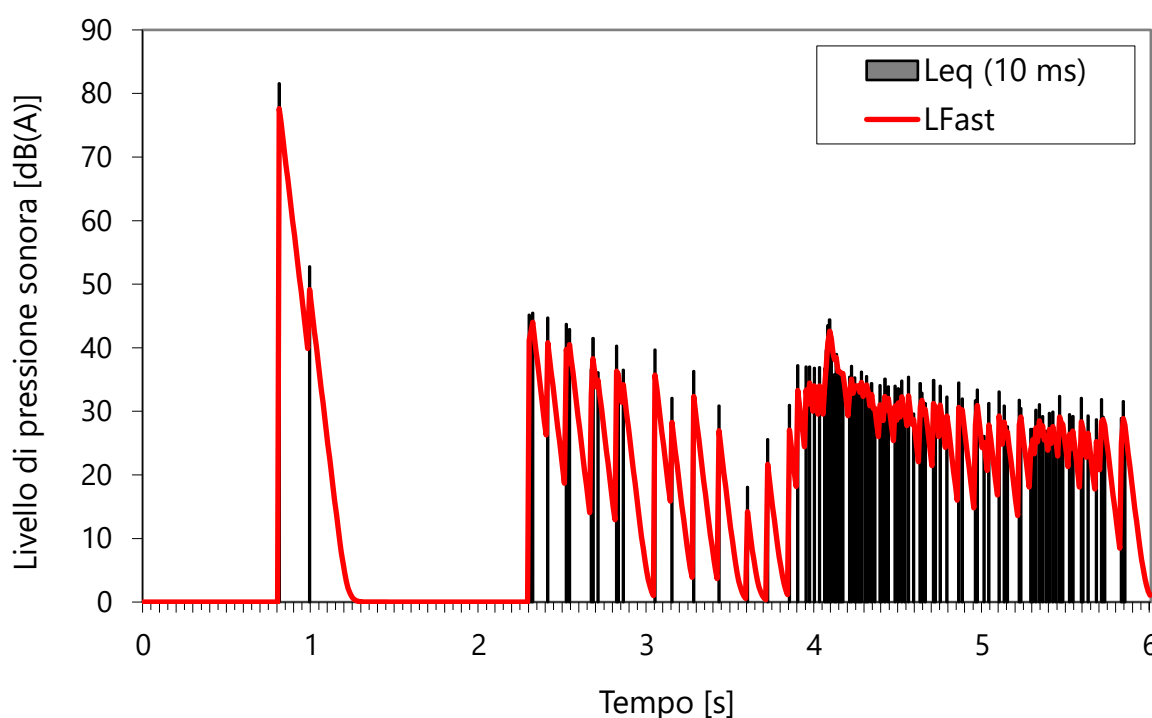
## **5 Risultati del calcolo**

Nella cartella *Output* sono archiviati quattro tipi di risultati:

- Nei file con estensione *WLR* (R per Risultati) sono riassunti i risultati per i calcoli dei singoli punti in forma tabellare compressa. La tabella contiene nove colonne. Nelle prime quattro colonne sono elencati il nome del recettore, l'edificio pertinente (se presente), il nome della sorgente e l'arma utilizzata in base alle specifiche del progetto. Le quattro colonne seguenti contengono i risultati dei livelli degli eventi di colpo singolo ponderati A  $L_{AE}$ , separati per l'esplosione alla bocca, l'onda balistica, la detonazione e per la somma delle tre sorgenti parziali. L'ultima colonna contiene il livello massimo ponderato A con la costante di tempo FAST  $L_{AFmax}$  per un singolo evento.
- I file con estensione *WLM* (M per Mappa) contengono i risultati dei calcoli della mappa acustica. Vengono creati due file, uno contenente i livelli di evento  $L_{AE}$  e l'altro i livelli massimi  $L_{AFmax}$ . I livelli sono memorizzati in una tabella rettangolare che copre l'intera area definita per la mappatura acustica. I punti della griglia al di fuori dell'area definita, che non sono stati calcolati, ottengono un valore

di -1000. Poiché questi file possono diventare molto grandi, i livelli vengono memorizzati nell'unità Centibel per risparmiare spazio (ad esempio 96.3 dB = 963 cB).

- Per analizzare i risultati dei calcoli a punto singolo vengono utilizzati i file con estensione WLD (D per Dettagli). I risultati di dettaglio vengono forniti come spettri in bande di terzi d'ottava da 25 Hz a 5 kHz per ciascuna combinazione sorgente-recettore e per ciascuna sorgente secondaria. Essi contengono vari risultati intermedi o attenuazioni parziali che permettono di ricostruire i singoli livelli di sparo risultanti. Il contenuto di questi risultati di dettaglio è spiegato nel seguito. Oltre all'identificazione del recettore, della fonte e del tipo di arma, le coordinate della fonte vengono visualizzate nella riga di intestazione. Ciò è particolarmente utile per l'onda balistica, in quanto in questo modo le coordinate della sorgente dell'onda balistica lungo la traiettoria possono essere identificate per ogni recettore.
- Opzionalmente, le curve di livello temporali, così come ricostruite dal modello, possono essere memorizzate in file con estensione WLT (T per Tempo). Queste curve di livello temporale servono ad analizzare i contributi delle diverse sorgenti parziali e le loro riflessioni e per tracciare l'origine del livello massimo  $L_{AFmax}$ . Le curve di livello temporale sono generate analogamente ai risultati di dettaglio per ogni combinazione sorgente-recettore. Per ogni evento, il tempo di arrivo al recettore dei singoli pacchetti energetici e i corrispondenti livelli medi ponderati a breve termine vengono memorizzati riga per riga con una risoluzione standard di 10 ms per ciascuna delle tre fonti parziali e per la somma di queste tre fonti parziali. I livelli massimi risultanti per ogni sorgente parziale vengono utilizzati per i risultati dettagliati, mentre il livello massimo, che risulta dalla somma di tutte le sorgenti parziali, viene utilizzato per i risultati WLR. La figura 3 riporta un esempio della curva di livello temporale per l'evento mostrato nella tabella 9. L'allegato 2 mostra anche l'algoritmo utilizzato per determinare il valore RMS mobile.



**Figura 3** Curva di livello temporale per l'evento mostrato in tabella 9. Il rumore diretto arriva dopo 0.81 s. Le riflessioni sugli edifici e sullo stand dei tiratori sono concentrate in un tempo di arrivo di 0.99 s. Gli ulteriori contributi che arrivano fra 2 e 6 s sono dovuti alle riflessioni dei boschi. Poiché il contributo del suono diretto è chiaramente superiore alle diverse riflessioni, il livello massimo è determinato esclusivamente dal rumore diretto.



Regolando le impostazioni nel file `SonArmsParameter.txt` è possibile generare diversi risultati intermedi, che vengono memorizzati nella cartella *Logfiles*. Ad esempio, è possibile registrare sezioni di terreno o i profili meteo utilizzati. Tuttavia, tali funzionalità sono state fornite principalmente per lo sviluppo e la convalida dei modelli e non sono destinate al funzionamento pratico.

Poiché per l'influenza del meteo i periodi del giorno, della sera e della notte sono presi in considerazione separatamente, esistono livelli sonori diretti separati per ciascuno dei tre periodi. Per questo motivo, vengono creati tre file per ogni tipo di risultato, che riassumono i risultati per ogni ora del giorno e sono integrati con ' Day', ' Eve' e ' Nig'.

La tabella 9 mostra, a titolo esemplificativo, i risultati dettagliati del progetto demo, fonte «SH300-Links\_Stgw90» e destinatario «E5a». I risultati dettagliati vengono discussi in modo più approfondito, poiché in questo modo è possibile illustrare il calcolo dei risultati.

[illegible]

	702381	SH300- Links_Stg w90	STGW90( 5.6MMG WPAT90)	Ge- schoss- knall	xyzh=	716441.4	248314.7	779.9	4.14			
E5a	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Lin	A	Max AF	
Ls	53.2	61.6	70.1	78.5	86.9	95.4	103.5	99.9	109.8	110.7	119.7	
Dc	0	0	0	0	0	0	0	0				
Adiv	24.4	24.4	24.4	24.4	24.4	24.4	24.4	24.4				
Aatm	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.8	2.9				
AgrBar	4	4	12.3	10.7	14	15.1	16.4	19.2				
Afol	0	0	0	0	0	0	0	0				
Alateral	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1				
Abottom	0	0	0	0	0	0	0	0				
Atrans	0	0	0	0	0	0	0	0				

Ameteo	0	0	0	0	1.5	0	-0.1	-0.2			
Abuild	0	0	0	0	0	0	0	0			
Ldir	25.4	33.6	33.6	43.5	47	55.7	62	53.6	68.1	68.8	77.7
Lfor	0	0	8	15.2	26.9	38	39	24.2	46.6	47.3	
Lrock	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Lrefl	9	17.4	25.8	34.1	40.8	50.3	54.1	48.7	56.6	57.4	
Ltot	25.5	33.7	34.3	43.9	47.9	56.9	62.7	54.9	68.4	69.2	77.7

Tabelle 9 Esempio con risultati dettagliati tratti dal progetto dimostrativo (detonazione alla bocca e al volo). Nota: per motivi di rappresentazione vengono mostrati solo i livelli delle bande di ottava.

- All'inizio del set di dati sono riportati il nome del punto di ricezione e della fonte sonora, il tipo di arma secondo la banca dati delle armi, la fonte parziale rappresentata (detonazione alla bocca, detonazione del proiettile o esplosione) e la posizione della fonte. Nel caso del rumore di bocca, alla fine viene indicato anche l'angolo di emissione verticale. Nelle righe di dati sono riportati i seguenti risultati intermedi:  $L_s$ : **Livello di emissione**

Nel caso di esplosione alla bocca e detonazioni, il valore di emissione ha il carattere di un livello di potenza sonora. Nel modello dell'onda balistica, l'emissione è data come livello di pressione sonora ad una distanza di riferimento di 1 m. Inoltre, la variazione spettrale dovuta ad effetti non lineari è già stata integrata nel livello di emissione dell'onda balistica. Per l'onda balistica, lo spettro di emissione dipende quindi dalla distanza.

Inoltre, per l'emissione sono specificati un livello totale lineare, un livello totale ponderato A e un livello massimo ponderato A; il livello massimo è generalmente superiore di 9 dB(A) al livello di energia sonora. (Questa assunzione è generalmente valida per eventi molto brevi, simili a impulsi.)

- $D_c$ : **Correzione per direttività** secondo la formula 1.

Per onda balistica e detonazione  $D_c$  è 0 in tutte le ottave.

- $A_{div}$ : **Attenuazione per divergenza geometrica**

Per l'onda balistica è integrata anche l'ulteriore attenuazione  $A_{nlin}$  per effetti non lineari.

- $A_{atm}$ : **Attenuazione per assorbimento dell'aria**
- $A_{grBar}$ : **Attenuazione per effetti suolo e schermo**
- $A_{fol}$ : **Attenuazione dei boschi**
- $A_{lateral}$ : **(negativo) Attenuazione dovuta a percorsi laterali di ostacoli** (vedere paragrafo 3.3).
- $A_{bottom}$ : **(negativo) Attenuazione dovuta a percorsi attraverso aperture** (vedere paragrafo 3.4).
- $A_{trans}$ : **(negativo) Attenuazione dovuta al passaggio del suono attraverso gli ostacoli** (vedere paragrafo 3.5).
- $A_{meteo}$ : **Attenuazione per influssi meteo**
- $A_{build}$ : **Correzione per recettori presso finestre aperte**

Con il parametro  $A_{build}$  è possibile introdurre una correzione indipendente dalla frequenza per i recettori assegnati ad un edificio e quindi interpretati come punti situati in una finestra aperta (vedere sezione 3). La correzione è elencata nel file dei parametri e disattivata per impostazione predefinita (vedi appendice 3). Esso è stato introdotto sulla base della comunicazione dell'UFAFP n. 7 del 1995, dalla quale si evince che i recettori collocati in corrispondenza di finestre aperte presentano in media livelli di immissione più elevati di 1 dB(A) rispetto ai punti in campo libero. Poiché  $A_{build}$  viene introdotto come attenuazione, questa correzione può essere considerata se  $A_{build}$  è impostato uguale a -1.0. La correzione viene applicata non solo al suono diretto, ma anche alle riflessioni (vedere l'equazione 4). Secondo studi recenti (cfr. rapporto Empa n.

5214003130), tuttavia, l'aumento del livello nella finestra aperta è solo di 0.5 dB(A), motivo per cui si è deciso di non apportare alcuna correzione.

- **$L_{dir}$ : Livello di pressione sonora diretta**, calcolato secondo la formula 3.

Il calcolo avviene per bande di terzi d'ottava, anche se la tabella mostra, per chiarezza, solo i risultati in banda d'ottava. Il calcolo del rumore diretto avviene in base ai due casi riportati di seguito. Il motivo di tale decisione sarà motivato in un secondo tempo. Per il suono diretto sono indicati, in analogia all'emissione, il livello somma e il livello massimo.

$$L_{dir} = \begin{cases} L_s + D_c - [A_{div} + A_{atm} + A_{grBar} + A_{fol} + \text{Min}(A_{lateral}, A_{bottom}, A_{trans}, A_{meteo})]; A_{meteo} < 0 \\ L_s + D_c - [A_{div} + A_{atm} + A_{grBar} + A_{fol} + \text{Min}(A_{lateral}, A_{bottom}, A_{trans}) + A_{meteo}]; A_{meteo} \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

- **$L_{for}$ : Livello sonoro energetico dovuto alle riflessioni dei boschi**
- **$L_{rock}$ : Livello sonoro energetico dovuto alle riflessioni su superfici rocciose**
- **$L_{reflect}$ : Livello sonoro energetico dovuto a riflessioni su oggetti artificiali**

Il calcolo del livello sonoro diretto  $L_{dir}$ , compresa la suddivisione dei casi sopra indicata, viene effettuato separatamente per ogni situazione meteorologica. Per le attenuazioni parziali delle singole situazioni, come ad esempio quelle riportate nella tabella 9 per la somma, viene applicato il criterio minimo secondo la formula (3) per banda di terzine e, di conseguenza,  $A_{lateral}$ ,  $A_{bottom}$ ,  $A_{trans}$  o  $A_{meteo}$  vengono impostati a zero. Il livello sonoro diretto  $L_{dir}$  dipende quindi dalla situazione meteorologica.

Se viene eseguito un calcolo con più situazioni meteorologiche in modalità METEO, i risultati dettagliati vengono determinati come segue:

1. Partendo dai livelli sonori diretti delle singole situazioni, viene calcolata una media energetica ponderata di  $L_{dir}$  in base alla frequenza di occorrenza delle situazioni meteorologiche.
2.  $A_{lateral}$ ,  $A_{bottom}$  e  $A_{trans}$  vengono ripresi come in un calcolo con effetto meteorologico ostacolante (o senza effetto meteorologico), ovvero con il criterio minimo secondo la seconda riga della formula (3).
3. Successivamente, l'attenuazione  $A_{meteo}$  viene adeguata in modo tale che dalla somma delle attenuazioni parziali risulti il livello corretto del rumore diretto.

**Nota:** Nelle impostazioni del kernel è presente un'opzione per consentire all'effetto meteo determinato per il suono diretto di confluire nei livelli di immissione da REFLECT. Si consiglia di utilizzare questa opzione.

- **$L_{tot}$ : Livello di pressione sonora di un singolo colpo**

Lo spettro è calcolato come somma energetica in bande di terzi d'ottava dei contributi del suono diretto e delle riflessioni dovute a boschi, rocce e oggetti artificiali secondo l'equazione 4.  $L_{in}$  e  $A$  designano i livelli della somma lineare o ponderata A. Anche nel calcolo del livello massimo ponderato A con costante di tempo FAST ( $Max AF$ ), vengono presi in considerazione i contributi del suono diretto e della riflessione. Se la componente di riflessione è significativa, le differenze di livello rispetto al livello sonoro di energia possono essere notevolmente inferiori rispetto al solo suono diretto.

$$L_{tot} = [L_{dir} \oplus L_{for} \oplus L_{rock} \oplus L_{reflect}] + A_{build} \quad (4)$$

### Motivazione della distinzione dei casi nel calcolo del livello sonoro diretto secondo l'equazione 3 e della limitazione dei termini di attenuazione nella somma:

Analogamente ad  $A_{lateral}$ ,  $A_{bottom}$  e  $A_{trans}$  anche l'effetto meteo  $A_{meteo}$  rappresenta un perfezionamento del calcolo diretto del suono, che riguarda principalmente l'effetto schermo.

Mentre in  $A_{lateral}$  l'effetto di ostacolo viene ridotto a causa dei percorsi sonori laterali, in  $A_{bottom}$  a causa delle aperture e in  $A_{trans}$  a causa della trasmissione, in condizioni di propagazione favorevoli può verificarsi un superamento degli ostacoli, con conseguente riduzione dell'effetto schermato.. Poiché i gradienti di temperatura e del vento si verificano principalmente in verticale, trascurando la turbolenza, è consentito trattare

entrambi questi effetti separatamente. Nel complesso, tuttavia, occorre prestare attenzione a garantire che non si verifichi un aumento eccessivo delle immissioni. Se un ostacolo viene superato a causa delle condizioni atmosferiche, questa schermatura non più esistente non può essere ridotta correggendo per l'effetto laterale o per la mancata chiusura al terreno. Se sia  $A_{\text{lateral}}$  che  $A_{\text{bottom}}$  che  $A_{\text{trans}}$  e  $A_{\text{meteo}}$  hanno valori negativi nei singoli terzi d'ottava, viene considerata solo la più grande delle quattro correzioni. Se  $A_{\text{meteo}}$  è positivo, cioè le immissioni sono ridotte a causa delle condizioni meteorologiche, vengono sommate entrambe le attenuazioni.

Un'analoga considerazione si applica alla combinazione di  $A_{\text{lateral}}$ ,  $A_{\text{bottom}}$  e  $A_{\text{trans}}$ . Anche in questo caso viene utilizzata solo la correzione maggiore, poiché si vogliono evitare casi di sovracompensazione, ovvero casi in cui l'effetto di ostacolo viene ridotto sia in orizzontale che in verticale o in cui esiste un ulteriore percorso acustico significativo attraverso l'oggetto. Se si sommassero tutte le componenti che aumentano il livello, si otterrebbe alla fine un livello superiore a quello di una situazione comparabile senza ostacolo.

Va tuttavia osservato che in realtà tutti e tre gli effetti citati possono contemporaneamente portare ad una riduzione dell'effetto schermo. L'approccio scelto tende pertanto a sottovalutare l'effetto di riduzione dei livelli.

## 6 Incertezza del modello

Nel rapporto di ricerca Empa-Nr. 5211.01543.100-2 dell'anno 2019 sono stati riassunti i calcoli di confronto con le misurazioni del rumore da attività di tiro. In totale, sono state valutate e confrontate con i calcoli *sonARMS* 401 combinazioni sorgente-recettore da misurazioni in 19 aree diverse. La figura 4 mostra un riepilogo di tutti i casi di convalida. La deviazione media tra la misurazione e il calcolo è di -0.5 dB(A) e la deviazione standard in confronto alle singole situazioni è di 4.0p dB(A). Questo confronto descrive l'incertezza con cui una singola misura può essere riprodotta con un calcolo *sonARMS* in una determinata condizione meteorologica.

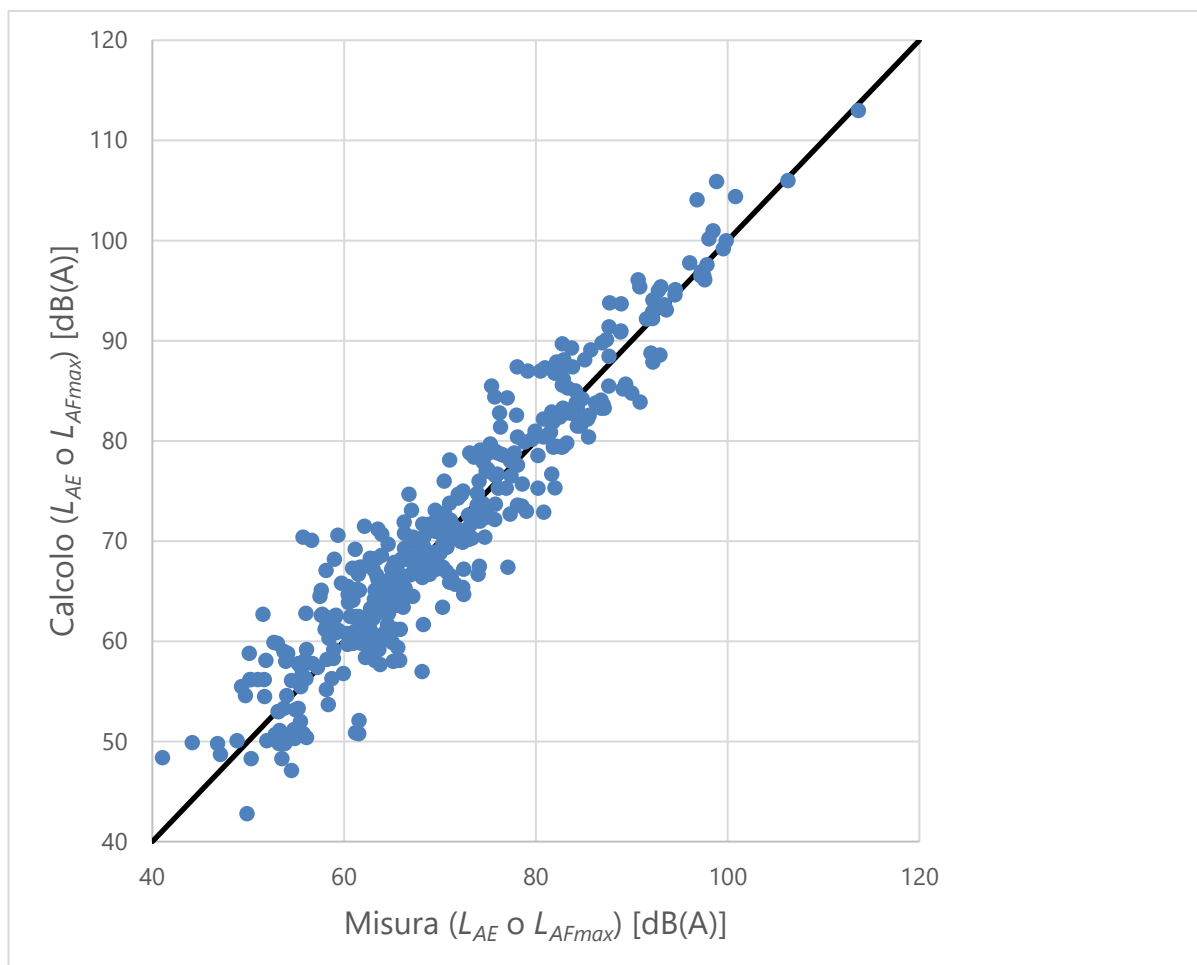


Figura 4 Confronto fra misure e rilievi per tutti i casi di validazione.

Dalla figura 4 si evince che la dispersione aumenta leggermente verso livelli di evento più bassi. Si tratta prevalentemente di situazioni di propagazione con grandi distanze, schermature significative del suono diretto e/o riflessioni dominanti. In particolare, le riflessioni forestali mostrano una grande dispersione situazionale, poiché le caratteristiche della vegetazione possono variare notevolmente da un luogo all'altro. In generale, tuttavia, si può affermare che sonARMS fornisce risultati affidabili su tutta la gamma di livelli e anche in situazioni di propagazione difficili.

La figura 5 mostra le differenze tra misurazione e calcolo sotto forma di box plot, dove oltre all'intero set di dati è stata effettuata anche una valutazione separata per le due grandezze di misura LAFmax e LAE. In 214 set di dati è stato valutato il livello massimo e in 187 il livello dell'evento. La mediana è di  $-1,3$  dB(A) per il livello massimo e di  $+0,3$  dB(A) per il livello dell'evento. Poiché nelle singole situazioni è stato registrato o LAFmax o LAE, non è possibile effettuare un confronto diretto. Tuttavia, per quanto riguarda il livello massimo, si può ipotizzare una tendenza alla sovrastima nei calcoli. Considerando l'intero set di dati, la mediana secondo la figura 5 è pari a  $-0,5$  dB(A), mentre i quartili 25 e 75 sono pari rispettivamente a  $+2,1$  dB(A) e  $-3,0$  dB(A). Il 50% dei dati rientra quindi in un intervallo di 5 dB(A).

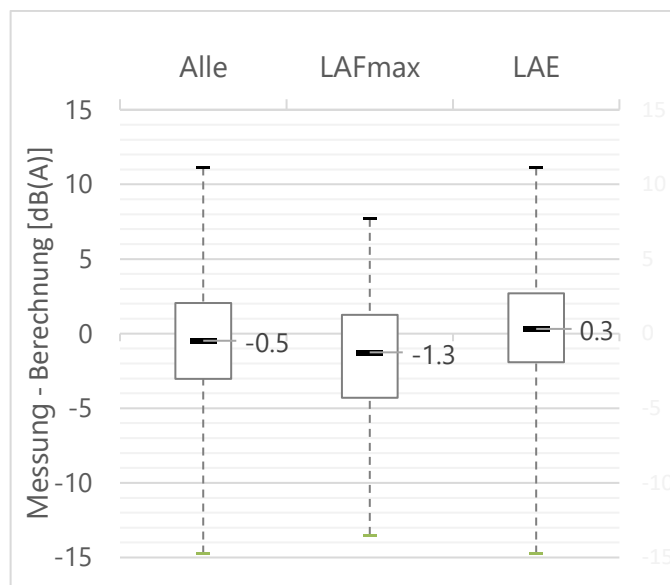
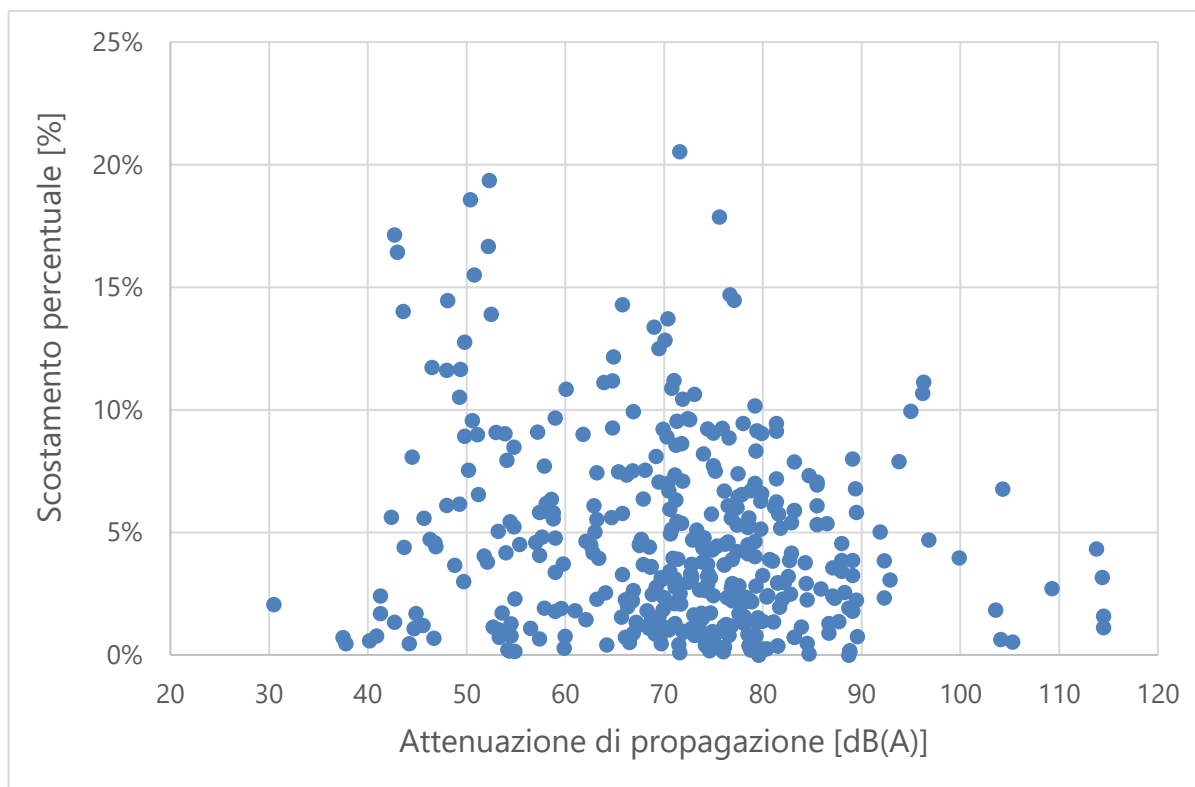


Figura 5 Influenza della grandezza acustica sulla differenza tra misurazione e calcolo.

### 6.1 Stima dell'incertezza media del modello e dell'accuratezza prevista dei livelli di valutazione

I requisiti di precisione per un modello di calcolo devono essere definiti in relazione alla complessità della situazione di propagazione. In altre parole: ci si può aspettare che un modello di calcolo riproduca situazioni di propagazione semplici con una precisione maggiore rispetto a condizioni impegnative, ad esempio a causa di lunghe distanze, schermature o riflessioni dominanti. Per misurare la complessità di una situazione, è possibile utilizzare l'attenuazione di propagazione, cioè la differenza tra il livello di potenza sonora e il livello dell'evento. La Figura 5 mostra gli scostamenti tra la misura e il calcolo relativi all'attenuazione di propagazione. La mediana per tutti i casi è del 3.7%.

Senza considerare un errore stocastico medio, si ottiene un'incertezza compresa tra 2.5 e 3.0 dB(A); considerando un errore medio stocastico l'incertezza si riduce a circa 0.5 dB(A). L'incertezza delle medie annuali in situazioni concrete dipende, da un lato, dal numero di fonti sonore parziali che contribuiscono in modo significativo ai livelli di valutazione risultanti e, dall'altro, dalla misura in cui l'ipotesi di errori puramente stocastici è giustificata. L'incertezza che ne risulta rientra in un intervallo di valori intermedio e può essere stimata in una deviazione standard di 1 - 2 dB(A).



**Figura 6** *Illustrazione degli scostamenti percentuali per tutti i casi di convalida. Valutazione dell'accuratezza delle previsioni dei livelli di valutazione.*

Le incertezze indicate descrivono la capacità del modello sonARMS di riprodurre singoli valori medi seriali. Ai fini della valutazione di situazioni concrete, tuttavia, non sono determinanti i livelli di singolo colpo, bensì i valori medi annuali dell'intera attività di tiro. Nel rapporto di validazione del 2013 è stata quindi effettuata una stima dell'incertezza dei livelli di valutazione determinati con sonARMS e per i valori limite di immissione con livello di sensibilità ES II o ES III è stata stimata una deviazione standard di 1-2 dB(A). A causa delle differenze minime nei risultati di validazione del 2019, questa affermazione è valida anche per la versione attuale di sonARMS.

## **6.2 Limiti di sonARMS**

Durante lo sviluppo di sonARMS si è cercato di rappresentare tutte le situazioni che si verificano nel settore civile e militare e tutte le misure di protezione acustica. Dal punto di vista concettuale esistono tuttavia dei limiti che rendono difficile l'applicazione in diversi casi o che rendono i risultati poco attendibili. Un aspetto centrale è che il calcolo del rumore diretto si basa su sezioni verticali che consentono solo un'altezza Z per ogni punto X-Y. Di conseguenza, in sonARMS non è possibile modellare strutture sporgenti. In particolare, i poligoni di tiro con una copertura parziale non possono essere modellati in modo appropriato. Anche la modellazione di soffitti a griglia e la combinazione di diverse misure di protezione dal rumore è molto impegnativa. In questi casi, si raccomanda di affidarsi a risultati di misurazioni o simulazioni con un modello teorico delle onde.

## Allegati

### **Formule per il calcolo dell'onda balistica secondo la ISO 17201-4**

#### **Calcolo dello spettro dell'onda balistica**

*Nota: la moltiplicazione della lunghezza effettiva del proiettile per un fattore di 1.7 rappresenta una modifica della norma ISO 17201-4, introdotta nel 2016.*

Calcolo del livello di emissione ad una distanza di riferimento di 1 m:

$$L_{E,s,bb} = L_0 + 10 \log \left( \frac{d_p^3}{(1.7 \cdot l_p)^{3/4} \cdot r_0^{9/4}} \right) + 10 \log \left( \frac{M^{9/4}}{(M^2 - 1)^{3/4}} \right) [\text{dB}] \quad (5)$$

con

$L_0$ : 161.9 dB

$d_p$ : Diametro maggiore del proiettile (calibro) [m]

$l_p$ : Lunghezza effettiva del proiettile (lunghezza dalla punta fino al diametro maggiore) [m]

$M$ : Numero di Mach del proiettile nella posizione locale come sorgente dell'onda balistica

$r_0$ : Distanza di riferimento = 1 m

Calcolo dello spettro dell'onda balistica:

$$L_{E,s}(f_i) = L_{E,s,bb} + C_i - C_{tot} \quad (6)$$

con

$f_i$ : Frequenza centrale del terzo di banda d'ottava da 12.5 Hz a 10 kHz

$C_i$ : Fattore di correzione del terzo di banda d'ottava  $i$  secondo la formula 7

$C_{tot}$ : Somma dei fattori di correzione  $C_i$  secondo la formula 8

$$\begin{cases} f_i < 0.65f_c: C_i = 2.5 + 28 \log \left( \frac{f_i}{f_c} \right) \\ f_i \geq 0.65f_c: C_i = -5.0 - 12 \log \left( \frac{f_i}{f_c} \right) \end{cases} \quad (7)$$

$$C_{tot} = 10 \log \sum_{i=11}^{40} 10^{C_i/10} \quad (8)$$

con

$f_c$ : Frequenza caratteristica secondo la formula 9

$$f_c = f_0 \frac{(M^3 - 1)^{1/4} \cdot (1.7 \cdot l_p)^{1/4} \cdot r_0}{M^{3/4} \cdot d_p \cdot r^{1/4}} \quad (9)$$

con

$r$ : Distanza in metri fra posizione sorgente e recettore

$f_0$ : Frequenza di riferimento = 175.2 Hz (bei 10°C)



### Attenuazioni specifiche di propagazione

Calcolo dell'attenuazione geometrica  $A_{div}$ :

$$\begin{cases} r < R_{coh}: A_{div} = 10 \log \left( \frac{r^2 k + r(M^2 - 1)}{r_0^2 k + r_0(M^2 - 1)} \right) \\ r \geq R_{coh}: A_{div} = 10 \log \left( \frac{r^2 k + r(M^2 - 1)}{r_0^2 k + r_0(M^2 - 1)} \right) + 25 \log \left( \frac{r}{R_{coh}} \right) \end{cases} \quad (10)$$

con

$k$ : Diminuzione locale al metro della velocità del proiettile,  
diviso per la velocità del suono  $c$ .  $k$  non deve risultare minore di  $10^{-8}$ .

$r_0$ : Distanza di riferimento = 1 m

$R_{coh}$ : Distanza di coerenza secondo la formula 11

$$R_{coh} = \text{Min} \left[ \frac{(M^2 - 1)(l_t/2)^2}{M^2 c_{am}/f_c}, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{\frac{3}{2} l_0 l_t^2 (M^2 - 1)}{M^2 \mu_0^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (11)$$

con

$l_t$ : Lunghezza totale della traiettoria fino al bersaglio o fino al punto  
in cui la velocità del suono locale raggiunge il numero Mach 1.01.

$l_0$ : Lunghezza di riferimento = 1.1 m

$\mu_0^2$ : Deviazione standard dell'indice fluttuante di rifrazione sonora, valore standard =  $10^{-5}$

$M$ : Numero di Mach locale al punto sorgente

$c_{am}$ : Velocità del suono locale [m/s]

Calcolo delle attenuazioni supplementari non lineari  $A_{nlin}$ :

$$A_{nlin} = 5 \log \left( 1 + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{(M^2 - 1)}{r_0 k}} \ln \left[ \frac{r + \frac{M^2 - 1}{2k} + \sqrt{r^2 + r \left( \frac{M^2 - 1}{k} \right)}}{r_0 + \frac{M^2 - 1}{2k} + \sqrt{r_0^2 + r_0 \left( \frac{M^2 - 1}{k} \right)}} \right] \right) \quad (12)$$

### ***Algoritmo per la stima numerica del valore RMS (efficace) mobile***

Il livello massimo di un evento corrisponde al livello massimo del valore RMS (efficace) mobile  $L(t)$ :

$$L(t) = 10 \log \left( \frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t \frac{p^2(\tau)}{p_0^2} e^{\frac{\tau-t}{RC}} d\tau \right) [\text{dB}] \quad (13)$$

con

$RC$ : Costante di tempo d'integrazione Fast = 0.125 s

$p(\tau)$ : Pressione sonora nel tempo

$p_0$ : Pressione sonora di riferimento =  $2 \times 10^{-5}$  Pa

La simulazione matematica fornisce tutti i  $\Delta t$  del valore quadratico medio relativo a questo intervallo di tempo.

$$\frac{\bar{p}^2(t)}{p_0^2} \quad (14)$$

La curva temporale del valore efficace quadratico mobile  $x_{\text{eff}}^2(t)$  può quindi essere specificata in modo iterativo:

$$x_{\text{eff}}^2(t + \Delta t) \approx x_{\text{eff}}^2(t) + \frac{\frac{\bar{p}^2(t + \Delta t)}{p_0^2} - x_{\text{eff}}^2(t)}{\frac{RC}{\Delta t}} \quad (15)$$

Conoscendo  $x_{\text{eff}}^2(t + \Delta t)$  si determina il livello del valore RMS in movimento  $L(t + \Delta t)$ :

$$L(t + \Delta t) = 10 \log (x_{\text{eff}}^2(t + \Delta t)) \quad (16)$$