

## Progetto iBBT (ID 5273-172)

Pavimentazione, rivestimenti e illuminazione innovativi  
per gallerie

### LINEE GUIDA



WP6

## **Impressum**

**I contenuti delle presenti linee guida provengono dai seguenti autori:**

### **Universität Innsbruck**

Institut für Infrastruktur - Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Mailer

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Stephan Tischler

Univ. Ass. M.Sc. Ferdinand Pospischil

### **Università Politecnica delle Marche**

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura - Settore Strade, ferrovie e aeroporti

Prof. Ing. Maurizio Bocci

### **Amt der Tiroler Landesregierung**

Ing. Martin Außerlechner

Ing. Werner Enk

Dipl.-Ing. Bernhard Hampel

### **Ripartizione Servizio Strade - settore gallerie**

Ing. Alessandro Lunelli

P.i. Helmut Verginer

Ing. Alberto Piserchio

### **Ufficio Geologia e Prove Materiali**

Dott. Volkmar Mair

Geom. Renza Espen

Dott. Gernot Stadler

Geom. Herbert Mahlke

### **Traduzione:**

Dott.ssa Martina Stefani

Dott. Claudio Carraro

Dott. Ulrich Obojes

### **Layout:**

Doris Hofer

### **Stampa:**

Tipografia Provincia Autonoma di Bolzano

### **Coordinazione generale:**

Dott. Volkmar Mair

Geom. Renza Espen

Dott. Gernot Stadler

Bolzano, settembre 2014

Il progetto triennale „**Pavimentazione, rivestimenti e illuminazione innovativi per gallerie**“ è cofinanziato dal programma Interreg IV Italia-Austria, Fondo Europeo per lo sviluppo regionale dell'Unione Europea.

## 20-00 Linee guida

Un riepilogo dei risultati del progetto Interreg IV - Pavimentazione, rivestimenti e illuminazione innovativi per gallerie

## 20-01 Indice

20-02	Aspetti generali del progetto iBBT .....	2
22-01	Requisiti, stato dell'arte e raccomandazioni .....	5
22-10	Illuminazione.....	5
22-20	Rivestimenti .....	10
22-30	Pavimentazione .....	13
22-40	Introduzione alle pavimentazioni scelte per la stesa in Alto Adige .....	18
23-11	Attività di laboratorio per la determinazione degli aggregati.....	21
23-12	Caratterizzazione dei materiali e studio delle miscele .....	24
24-10	Realizzazione delle pavimentazioni chiare in Alto Adige.....	36
24-21	Realizzazione degli interventi galleria Seehoftunnel, B 181 Achenseestraße.....	40
24-31	Realizzazione rivestimento galleria Rattenberg, B 171 Tiroler Straße .....	44
25-10	Controlli e monitoraggi delle pavimentazioni chiare in Alto Adige .....	46
25-20	Controlli e monitoraggi galleria Seehoftunnel, B 181 Achenseestraße.....	53
25-30	Controlli e monitoraggi nella galleria Rattenberg, B 171 Tiroler Straße .....	57
26-10	Valutazione energetica delle gallerie Narano 1 e 2 .....	64
26-21	Valutazione energetica galleria di Seehof .....	66
	Bibliografia.....	67

## 20-02 Aspetti generali del progetto iBBT

La presente linea guida è stata elaborata all'interno del workpackage 6 (WP6) del progetto Interreg IV Italia – Austria: „Pavimentazione, rivestimenti e illuminazione innovativi per gallerie“ (ID 5273-172) allo scopo di fornire un quadro dei risultati e delle attività progettuali. Le informazioni di base, le direttive e le spiegazioni dettagliate così come i riferimenti si trovano nel manuale del progetto.

## 20-03 Descrizione del progetto

Con la crescita dello sviluppo economico, delle esigenze di comfort e di sicurezza viaria, le richieste nei confronti delle prestazioni delle infrastrutture stradali diventano sempre più consistenti. Nelle regioni montane le gallerie risolvono in misura efficace tali richieste. Le gallerie, oltre a fornire grandi vantaggi in termini di linearità del tracciato stradale, di contenimento del rumore e di riduzione dell'inquinamento ecc. sono una sfida importante per utenti e manutentori. L'automobilista vede la galleria come un potenziale pericolo. In realtà a parità di condizioni di traffico, la probabilità che ci sia un incidente in galleria è molto inferiore, qualora dovesse accadere, le conseguenze sarebbero sicuramente di gravità maggiore.

Per questo motivo i progettisti e i manutentori delle gallerie pongono particolare attenzione agli impianti di esercizio e di sicurezza. Gli elementi strutturali più importanti nella percezione della carreggiata e nell'andamento del tracciato sono costituiti dalla pavimentazione stradale chiara, dal rivestimento delle pareti e dagli impianti di illuminazione.

L'obiettivo che si pone questo progetto consiste nel ricercare e migliorare la luminosità nelle gallerie. Tale traguardo è stato raggiunto tramite la realizzazione di pavimentazioni stradali, di rivestimenti delle pareti e impianti d'illuminazione innovativi. Oltre all'aumento della sicurezza è stato possibile ridurre i costi per l'illuminazione nelle gallerie.

## 20-04 Organigramma del progetto

Leadpartner:

Provincia Autonoma di Bolzano – Alto Adige, Ripartizione 11 – Edilizia e Servizio tecnico, Ufficio 11.6 Geologia e Prove Materiali

Partner:

- Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Verkehr und Straße
- Provincia Autonoma di Bolzano – Alto Adige, Ripartizione 12 – Servizio Strade

Partner associati:

- Autostrada del Brennero SpA
- Collegio dei Costruttori Edili della Provincia di Bolzano
- Gestrata, Gesellschaft zur Pflege der Straßenbautechnik mit Asphalt
- Provincia Autonoma di Bolzano – Alto Adige, Ripartizione 11 - Infrastrutture

Coordinamento scientifico:

- Universität Innsbruck, Fakultät für Technische Wissenschaften, Institut für Infrastruktur – Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme
- Università Politecnica delle Marche (Ancona), Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

## 20-05 Impostazioni del progetto

L'obiettivo del progetto è l'ottimizzazione dei tre elementi principali della galleria, quali l'impianto di illuminazione, il rivestimento delle pareti e le pavimentazioni stradali in prospettiva un'ottimizzazione dei mezzi finanziari. Questo dovrebbe risultare dalla combinazione dello stato attuale della tecnica con la ricerca nel campo degli impianti illuminotecnici (tipologie di lampade e apparecchi di regolazione), delle pavimentazioni stradali e dei rivestimenti delle pareti.

Nel dettaglio si tratta di confrontare i vari tipi di lampade e di individuare quali tra queste permettono un risparmio energetico maggiore, garantendo il grado di efficienza (in termini di luminosità, frequenza e investimento manutentivo).

Lo stesso approccio viene adottato per la scelta del tipo di rivestimento delle pareti (vernici e additivi) e delle diverse pavimentazioni stradali chiare. Il fine è quello di ottenere un miglioramento della luminosità, con conseguente abbattimento della spesa energetica e del rischio soggettivo. Si presta particolare attenzione alla vita utile e alla sostenibilità ambientale dei materiali utilizzati.

## 20-06 Obiettivi

Gli obiettivi raggiunti in questo progetto e documentati dalla presente linea guida sono i seguenti:

- (1) Individuazione delle richieste e analisi delle problematiche nei tre ambiti principali della galleria, quali le pavimentazioni stradali, i rivestimenti delle pareti e gli impianti di illuminazione.

- (2) Panoramica e riassunto della situazione giuridica generale in materia: leggi, direttive, linee guida e manuali sia a livello Europeo che a livello statale, nello specifico in Austria e Italia e in parte anche negli stati limitrofi (Germania e Svizzera)
- (3) Tecnologie sperimentate
- (4) Conclusioni riassuntive, supporti decisionali e prospettive future

## 20-07 Struttura e organizzazione

La presente linea guida è suddivisa nei tre ambiti del progetto, i quali a loro volta sono suddivisi in fasi progettuali (workpackages) realizzate da ogni Stato.

Indice	20-00
Introduzione	20-01
Descrizione del progetto	20-02
<b>WP2 Stato dell'arte</b> (Tecnologie degli asfalti e gli impianti di illuminazione e loro impiego nella costruzione di gallerie)	22-xx
<b>WP3 Ricerca ed attività di laboratorio</b> (Sviluppo dei manti stradali e combinazione con l'illuminazione ed i rivestimenti delle pareti)	23-xx
<b>WP4 Realizzazione</b> (Allestimento, preparazione tecnica e organizzazione dei misurazioni delle singole aree di prova)	24-xx
<b>WP5 Monitoraggi</b> (Elaborazione del programma di controllo ed esecuzione dei controlli dei tratti di prova)	25-xx
<b>WP6 Considerazioni energetiche</b> (Calcolo del risparmio grazie all'impiego di materiali innovativi)	26-xx

## 20-08 Numerazione

2 0 - x x



secondo l'indice delle singole  
aree tematiche

Numero dei workpackages (2 = WP2,  
3 = WP3, 4 = WP4, 5 = WP5), 6 = WP6)

**Linea guida Progetto iBBT (ID 5273-172)  
Pavimentazione, rivestimenti e  
illuminazione innovativi per gallerie**

## 20-09 Risultati

### WP6 Analisi, interpretazione e pubblicazione

Il risultato di questo WP è la redazione di un manuale/linea guida per progettisti, direttori lavori e committenti. Queste linee guida dovranno descrivere i sistemi analizzati, esporre i risultati delle analisi e delle indagini e proporre informazioni per la messa in opera e la lavorazione dei prodotti. Le linee guida dovranno essere pubblicate nei media a maggior diffusione e costituire un aiuto transfrontaliero per future realizzazioni.

## 22-01 Requisiti, stato dell'arte e raccomandazioni

Per garantire una migliore lettura i singoli capitoli delle linee guida sono stati riordinati e contengono le prescrizioni prestazionali, lo stato dell'arte e le raccomandazioni che riguardano l'illuminazione, i rivestimenti e le pavimentazioni delle gallerie.

Per ogni ambito sono da prendere in considerazione i seguenti punti legati all'economicità dell'intervento:

- costi di progettazione
- costi di produzione (del materiale)
- dispendio per posa/incarico
- vita utile
- costi di manutenzione e frequenza di manutenzione
- consumo energetico
- riciclabilità / costi di smaltimento

## 22-10 Illuminazione

Oltre ai requisiti di economicità i sistemi di illuminazione possono essere valutati in base ai seguenti criteri:

- potenza [W]
- flusso luminoso [lm]
- uniformità
- efficienza luminosa del sistema [lm/W]
- tonalità del colore
- tempo di accensione [min]
- temperatura della luce

- resa di esercizio
- manutenzione

La manutenzione dell'illuminazione e dei dispositivi di controllo e regolazione dovrebbe avvenire possibilmente senza influire sul traffico. Questo è utile non solo per non interferire sul traffico, ma anche per aumentare la sicurezza del personale addetto.

Sono state analizzate le seguenti tipologie di lampade, che sono descritte nel capitolo 12-41 del manuale:

- lampade a vapore di mercurio ad alta pressione
- lampade a vapore di sodio ad alta pressione (SAP)
- lampade a vapore di sodio a bassa pressione
- tubi fluorescenti
- lampade ad alogenuri metallici (HIT)
- diodo luminoso (LED)

Una prolungata vita utile, i minori costi di manutenzione e il minor consumo energetico delle lampade LED se rapportate alle lampade a vapore di sodio ad alta/bassa pressione e ad alogenuri metallici, permettono un ammortamento veloce dei costi di acquisto. Nonostante ciò, bisogna prendere in considerazione l'economicità dell'intero sistema. Infatti va osservato che, a differenza dei sistemi di illuminazione convenzionali, come ad esempio le lampade a vapore di sodio, questi apparecchi luminosi devono essere sí sostituiti dopo una durata di utilizzo di ca. 60.000 - 100.000 ore, ma va prevista la sostituzione non solo della lampada ma di tutta l'unità di illuminazione.

Il consumo energetico deve essere mantenuto il più basso possibile. E' possibile ottenere un risparmio energetico presso l'imbocco di accesso, riducendo l'illuminazione artificiale a seconda dell'intensità luminosa che si registra nel corso della giornata. Al momento i costi per l'energia elettrica per l'illuminazione in galleria per le strade del Tirolo ammontano a 650.000 € l'anno. La lunghezza complessiva delle gallerie è di ca. 23.000 m, il che corrisponde ad una spesa di meno di 30 € per metro lineare di illuminazione all'anno (Ripartizione costruzione strade, Tirolo del Nord, 2012).

Questa stima dei costi non differenzia gallerie aperte e gallerie con illuminazione ausiliaria di accesso, illuminazione di accesso e illuminazione del tratto interno, e va quindi presa in considerazione a titolo orientativo.

L'illuminazione impiegata più frequentemente in galleria al momento è la lampada a vapore di sodio ad alta pressione, che verrà però probabilmente prevaricata in futuro dall'illuminazione a LED, la quale è caratterizzata da evoluzione continua e da un costante abbassamento del costo di investimento. Al momento, il **punto di pareggio** è raggiunto nei tratti di galleria interni, già dopo ca. 3 anni di esercizio.

Con l'impiego della tecnologia LED si può prevedere un **risparmio energetico** dal 30% fino al 50 %, valore che deve essere ricalcolato tenendo conto delle maggiori spese di investimento. (fonte di riferimento: diverse aziende che lavorano con LED, 2012).

Nella galleria Tellsplatte (234 m) dove è stata installata un'illuminazione a LED è stato possibile fare le seguenti considerazioni:

#### Vantaggi lampade a LED:

- *Necessità di installazione di solo 23 [lampade LED] al posto di 39 [lampade SAP]*
- *Risparmio energetico fino al 30%*
- *Il costo delle lampade LED viene ammortizzato dopo 20 anni (altri tipi di apparecchi di illuminazione dopo 30 anni) [non si tiene conto di sostituzioni necessarie di unità di controllo oppure degli alimentatori].*
- *Costruzione modulare: l'installazione poco onerosa, riciclaggio delle componenti*

#### Svantaggi delle lampade LED:

- *La gestione del calore dei LED è più complicata*
- *Mancano i risultati per l'impiego a lungo termine*

In media, è dunque possibile di risparmiare il 30% di energia elettrica con le lampade LED rispetto alle lampade tradizionali. Confrontando i LED con sistemi ancora più datati è possibile risparmiare il 50%. Alla luce di questi risultati e dal punto di vista economico non è comunque sostenibile sostituire a tappeto tutti gli impianti di illuminazione.

(USTRA, Strade e traffico - numeri e fatti, 2012)

Secondo lo stato attuale della tecnologia, le lampade a vapore di sodio trovano il maggior impiego nei sistemi di illuminazione. La pratica dimostra che in rapporto alle lampade LED queste non hanno le stesse proprietà di intensità luminosa e vita utile, ma raggiungono comunque

i valori di luminosità necessari con costi di installazione modesti.

La tecnologia LED è stata applicata fino ad'ora solo in alcune gallerie di prova. Va evidenziato che i progressi tecnologici nei sistemi di illuminazione a LED disponibili sul mercato sono molto rapidi e la presente relazione può tenere conto solo dello stato attuale.

#### **A riguardo della disposizione degli apparecchi di illuminazione si possono fare le seguenti affermazioni:**

- Il posizionamento su entrambi i lati richiede il raddoppiamento del numero degli apparecchi di illuminazione e della lunghezza dei cablaggi (altrimenti la seconda corsia rimarrebbe in ombra in caso del passaggio di un autocarro). Comporta però il vantaggio di mantenere l'illuminazione nel caso di sviluppo di fumi. E' da prendere in considerazione il potenziale abbagliamento dei conducenti di autocarri (seduti più in alto) nelle gallerie a traffico unidirezionale. Con questo tipo di posizionamento, la manutenzione e la pulizia risultano più semplici e sicuri ma devono essere pulite il doppio numero di lampade.
- Il posizionamento maggiormente usato e raccomandato è quello che prevede la disposizione eccentrica rispetto al colmo della galleria sopra la corsia d'entrata. L'eccentricità permette di cambiare l'illuminazione in caso di chiusura di una corsia.
- In generale si consiglia di realizzare degli imbocchi artificiali con aperture laterali, da poter illuminare la zona d'ingresso anche con luce naturale. In questo caso le gallerie artificiali con aperture laterali sono da preferire all'esecuzione di lucernari, poiché questi ultimi sporcano facilmente e la

pavimentazione deve essere sottoposta a manutenzione invernale (Ripartizione costruzione stradale, Tirolo del Nord, 2012).

Onaygil et al. consigliano, se possibile, di realizzare il più scuro possibile il tratto di avvicinamento alle gallerie per poter mantenere bassa l'illuminazione della zona d'imbocco (Onaygil, Güler, & Erkin, 2002).

Un rapporto di ricerca dell'ufficio federale svizzero per le strade consiglia di apportare, se possibile, poche modifiche al sistema di illuminazione, perché queste comportano a loro volta la percezione dello spostamento della carreggiata. Anche interruzioni e disomogeneità rendono il conducente più insicuro e quindi lo inducono a frenate improvvise. (Ufficio federale delle strade USTRA, 2012).

I sistemi di illuminazione in gallerie a funzionamento unidirezionale sono realizzati al momento con il principio dell' illuminazione controflusso. Occasionalmente, per testare il sistema, è stato utilizzato anche il principio di co-flusso, come per esempio nella galleria Amras lungo la A12-Inntalautobahn (autostrada della Valle dell'Inn). Si segnala però che il principio di co-flusso necessita di maggiore luminanza e comporta quindi costi maggiori.

In gallerie con traffico bidirezionale per il tratto interno si applica il principio di illuminazione simmetrica. Esiste la possibilità di realizzare un sistema di illuminazione co-flusso con l'ausilio di lenti, ma questo sistema risulta relativamente costoso.

**Per l'installazione si raccomanda quanto segue:**

In tratti di accesso chiari (soleggiati) sono consigliabili lampade a vapore di sodio perché dotate di un alto flusso luminoso.

In tratti di accesso scuri (ombreggiati) l'utilizzo dei LED è paragonabile con l'impiego di SAP.

In tratti interni alla galleria si consiglia l'utilizzo di lampade a LED. Qui si raggiunge la redditività già dopo 2 - 3 anni.

criteri	lampade a vapore di mercurio ad alta pressione		lampade a vapore di sodio ad alta pressione (SAP)		lampade a vapore di sodio a bassa pressione		tubi fluorescenti		lampade ad alogenuri metallici (HIT)		diodo luminoso (LED)	
potenza [W]	50 - 1.000		50 - 1.000		18 - 180		80		75 - 250			
flusso luminoso [lm]	1.800 - 58.000		3.500 - 120.000		1.800 - 33.000		6150		5.500 - 20.000			
uniformità												
efficienza luminosa [lm/W]	36-58		39 - 150		200		52-104		57-73			
tonalità	bianco caldo, bianco		giallo oro, bianco caldo,		verde giallo		bianco caldo, bianco		bianco caldo tonalità <95			al momento fino a 250
tempo di accensione [min]	4 - 5		4 - 5		12		< 2 sec.		4 - 5			tutti i colori sono
temperatura della luce	3200-4200K											0
			spettro luminoso ritenuto piacevole, alta variabilità della prestazione, alta efficienza luminosa	+	acuità visiva, ottima efficienza luminosa, buon attraversamento di proiezioni d'acqua	+	montaggio a fascia di luci - illuminazione uniforme, buona resa cromatica	+	ottima resa cromatica, buona stabilità del colore			consumo energetico basso, alta brillantezza del colore, resistenza alle vibrazioni, pochi guasti iniziali, raggi UV e IR assenti, tipo di costruzione compatta, regolazione senza gradini
			scarsa resa cromatica, riaccensione possibile solo dopo raffreddamento, grande distanza fra punti luminosi in caso di guasto/ regolazione di singole lampade	-	scarsa resa cromatica	-	flusso luminoso minore rispetto a SAP - necessarie più lampade	-	lungo tempo di riaccensione di 15-20 min, dal 2017 disposizioni in materia di efficienza più rigide da parte dell'UE, regolazione della luce richiede molta tecnologia			sono necessarie più lampade per avere la stessa illuminazione all'interno della galleria (ca. +30)
costi di installazione			100%				ca. 120%					ca. 120% per gallerie piccole
durata di vita della lampada [h]	16.000		12.000 - 16.000		12.000		18.000		6.000 - 10.000			80.000 - 100.000
costi di manutenzione e frequenza di manutenzione			controllo degli apparecchi di									ricambio ogni 5 anni di alimentatori e dispositivi
descrizione breve del tipo di controllo e funzionamento	necessario regolatore di corrente, accensione attraverso elettrodi		La luce viene creata attraverso una scarica di gas fra due diodi all'interno di un		vapore di sodio, libero da mercurio, emette dopo l'accensione della scarica una		principio della scarica di gas a bassa pressione, vapore di mercurio emana raggi UV che		sviluppo della lampada a mercurio ad alta pressione, necessari regolatore di			cristalli semiconduttori stimolati in modo elettrico emanano luce, alto potenziale

efficienza funzionale / idoneità all'uso

**Tabella 1 - Confronto fra le tecnologie di illuminazione per gallerie**

## 22-20 Rivestimenti

Il rivestimento degli elementi in calcestruzzo in galleria, ha la duplice funzione di proteggere da sostanze contenenti ioni cloruri e ottenere una superficie che risponda ai requisiti di riflessione, colore, resistenza al lavaggio e resistenza al graffio (Meier & Martinola, 2006).

In Austria, il rivestimento delle pareti della galleria viene eseguito di regola, secondo le prescrizioni RVS 09.01.23, fino ad un'altezza di almeno 4 m. In Italia, nella gran parte dei casi, si riveste tutta la galleria. In questo modo l'automobilista riconosce la galleria come un tutt'uno e ha informazioni sulla sua geometria. In linea di massima è possibile applicare diversi sistemi: applicazione a strati, impiego di pannelli, verniciatura o la posa spritzbeton chiaro.

La **funzionalità e l'idoneità** dei rivestimenti può essere suddivisa in base ai seguenti criteri:

- **Resistenza al distacco/ adesione**
- **permeabilità al vapore acqueo**
- **permeabilità al CO<sub>2</sub>**
- **resistenza ai sali**
- **Comportamento in caso di collisione**
- **Luminosità/ insudiciamento/ riflessione**

Per risanare e/o posare il rivestimento delle pareti di gallerie stradali è necessario preparare accuratamente la superficie di fondo. *Il fondo deve essere pulito, privo di parti mobili, polvere, oli o altre sostanze che potrebbero provocare distacchi. Le resistenze alla trazione delle superfici devono corrispondere alle caratteristiche indicate nelle disposizioni tecniche in materia.* (MC-Bauchemie; PCT swiss Protection & Cleaning Technologies, 2012).

Oltre alle condizioni sopra esposte devono essere risanati tutti gli ammaloramenti presenti nel rivestimento in calcestruzzo.

A questo proposito possono essere utilizzati i seguenti materiali (StoCretec, 2008):

- **calcestruzzo**
- **spritzbeton**
- **malta o calcestruzzo polimerici, su base cementizia (PCC – Polymer Cement Concrete)**
- **malta o calcestruzzo polimerico, su base cementizia posto in opera a spruzzo (SPCC – Sprayed Polymer Cement Concrete)**
- **malta o calcestruzzo con resine polimeriche (PC – Polymer Concrete)**

E' necessario rispettare la corretta temperatura di posa. Secondo (Glantschnigg, 2005) non è possibile applicare alcun sistema di rivestimento, affinché la temperatura del calcestruzzo non superi di almeno 2°C la temperatura di gelo dell'aria. Quindi risulta necessario rispettare la pausa invernale prima di per procedere alla posa in opera.

Segue un **breve elenco dei possibili sistemi** di rivestimento, la descrizione dettagliata è descritta nel manuale del progetto iBBT.

- **Rivestimenti con tecnologia nano**
- **Rivestimenti in ceramica**
- **Rivestimenti a base di resine epossidiche**
- **Colore acrilico**
- **Calcestruzzo autocompattante**

Il problema principale dei rivestimenti è la copertura dei giunti, la difficoltà di ancoraggio alla superficie e la tendenza a formare crepe e fessure.

In caso di nuova costruzione di galleria, se la tecnica di avanzamento lo permette, si consiglia di utilizzare calcestruzzo autocompattante ad alta luminosità e resistenza al fuoco (Krispel & Peyerl, Selbstverdichtender Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit und Helligkeit, 2011). Anche se questa tecnologia non raggiunge per ora gli stessi valori di luminosità dei rivestimenti con resine epossidiche, le si attribuisce un grande potenziale per il futuro.

In caso di risanamento si consiglia l'impiego di resine epossidiche con una copertura finale di nanotecnologia. Da questo sistema ci si aspetta migliori caratteristiche autopulenti. Per la posa dei diversi sistemi sono importanti il buon adattamento alle condizioni del fondo e lo stucco utilizzato. Inoltre per una superficie più resistente allo strapazzo, possono essere posti in opera dei teli all'interno dei rivestimenti. Questo metodo non è ancora stato sperimentato e non è pertanto possibile valutarlo.

Per determinare il sistema idoneo è necessario definire i criteri di scelta. Nel caso di gallerie corte non è vantaggioso prevedere cambi del sistema di rivestimento. Per gallerie di lunghezza maggiore, di regola l'area di accesso dovrebbe essere realizzata con la variante qualitativamente più alta. Altri criteri, oltre alla lunghezza della galleria, possono essere l'altitudine alla quale è situata la galleria, l'uso (traffico unidirezionale o bidirezionale) oppure la quantità di traffico giornaliero medio. Per gallerie corte con poco traffico si consiglia il rivestimento della sezione fino a 2 m di altezza previa una verniciatura fino ad una altezza di 4 m. In caso di maggior traffico è consigliabile eseguire un riempimento delle cavità

da ritiro da 2 m a 4 m di altezza. Per i tratti interni alla galleria non è necessario applicare un rivestimento così dispendioso. È sufficiente la stuccatura delle cavità da ritiro fino a 2 m di altezza. Altezza, che è da prolungare a 4 m, in caso di gallerie caratterizzate da traffico pesante, seguito poi da un'applicazione di vernice fino ad un'altezza di 4 m. (Enk, 2014)

criteri	interni chiari della galleria senza rivestimento	rivestimento fotocatalitico	rivestimento epossidico	vernici combinate di polimeri		rivestimenti in ceramica
efficienza funzionale / idoneità all'uso	resistenza al distacco	+ qui non esiste uno strato aggiuntivo	+ in caso di stesa corretta > 2,0 N/mm <sup>2</sup>		0	
	permeabilità al vapore acqueo		+ l'impiego di fibre in polipropilene diminuisce lo sfaldamento	+ permeabilità al vapore acqueo		
	permeabilità alla CO2		+ effetto barriera alla CO2	+ alta impermeabilità per il biossido di carbonio		
	resistenza contro sali		+ scarsa resistenza del rivestimento nell'area di ingresso	+ resistenza contro sali da spruzzo	+ buona resistenza	
economicità	luminosità				- all'inizio buono, dopo alcuni lavaggi opaco	
	costi di produzione (€/m <sup>2</sup> )					
	dispendio per stesa/applicazione	+ poco dispendio aggiuntivo perchè la messa in opera avviene durante la realizzazione dell'interno	+ messa in opera veloce; tolleranza agli errori in caso di superamento di spessori; penetrazione dell'indurimento veloce	+ messa in opera veloce mediante rullo e spruzzo airless		
	frequenza di manutenzione	+ intervalli di manutenzione maggiori	- stuccatura in corrispondenza dei giunti di dilatazione può essere problematica		- ogni 3-6 mesi; possono essere dilavati da lavaggi e perdere rendimento	
descrizione breve	SCC (Self Compacting Concrete) - intradosso della galleria, p.es. cls denominato C25/30/ISP/SCC/F66/GK16/Hell		sistema a due componenti, resina e indurente; applicazione dei diversi strati nell'arco di poche ore	combinazione acquosa di polimeri a due componenti	possono essere rullati o spruzzati; oppure applicati come pannello	
descrizione/ scopo	aggiunta di diverse percentuali del pigmento bianco biossido di Titanio e farina di roccia calcarea alla ricetta del cls	<p>rivestimenti fotocatalitici attivi migliorano la qualità dell'aria: decompongono sostanze nocive come p.es. ossidi di azoto, ozono e composti organici volatili (VOC); autopulizia mediante la messa in opera di particelle nano di biossido di Titanio</p>	<p>non è necessario un trattamento successivo; buona tenuta; buona lavabilità; alta resistenza all'abrasione; formule resistenti allo sporco</p>	<p>inserendo uno strato di tessuto non tessuto nel primo strato si può aumentare la capacità di resistenza alle sollecitazioni</p>		
produttori (esempi)	produttori di cls in generale	Sto, Inno-X GmbH	Mapei, Sto	MC Bauchemie	Ceramicoat Limited	

**Tabella 2 - Confronto fra le tecnologie di rivestimento delle pareti con sistemi di verniciatura e stuccatura**

## 22-30 Pavimentazione

Per la pavimentazione in galleria valgono generalmente le stesse direttive delle pavimentazioni eseguite su strada non coperta, come per esempio valore di Los Angeles, CLA, ecc.

L'efficienza funzionale di pavimentazioni in gallerie stradali è suddivisa in base ai criteri sottoindicati, fermo restando che rimangono comunque sempre valide le prescrizioni delle strade non coperte:

- **Luminosità**

La chiarezza del manto stradale non deve diminuire (sporcarsi) con la durata dell'esercizio. In galleria, infatti, l'apporto di acque può essere solo di tipo artificiale e quindi la naturale pulizia attraverso la pioggia, avviene in maniera limitata.

- **Caratteristiche di riflessione**

Il tipo di sovrastruttura nelle gallerie, come per esempio quella eseguita nella galleria di Amras della A12 ha dimostrato, che non sono stati raggiunti – misurando subito dopo l'ultimazione della posa - i valori di luminanza e le caratteristiche di riflessione (per la descrizione vedere il manuale) previste dalla RVS per manti in conglomerato bituminoso di nuova costruzione ( $q_0 = 0,07 \text{ cd/m}^2\text{lx}$ ). A questo punto è necessario puntualizzare, che le caratteristiche di riflessione delle pavimentazioni in calcestruzzo diminuiscono con l'esercizio, a causa dell'inquinamento e dell'intasamento dei pori con polveri e sporcizia. Al contrario, per le pavimentazioni in asfalto, è il sottile strato di bitume che ricopre gli inerti ad inibire la riflessione della luminosità di questi ultimi. Questo film viene asportato

dall'azione del traffico in un periodo di tempo che varia da ca. 1 a 3 anni, ed è solamente dopo questo periodo che emerge la completa azione di riflessione degli inerti (Bocci, 2012). Dato che in Austria, già al momento del collaudo devono essere garantite determinate caratteristiche di riflessione della superficie della pavimentazione, vengono applicati diversi procedimenti per eliminare superficialmente il film di bitume e fare emergere le caratteristiche chiare degli inerti e delle rocce. Nella zona d'imbocco della galleria di Amras sono state impiegate macchine sabbiatrici - pallinatrici. Queste spogliano la superficie mediante abrasione meccanica. Tale procedimento equivale ad un grado di consumo pari al passaggio del traffico per una durata di 1 - 2 anni (tuttavia omogeneamente sull'intera superficie), con una spesa di ca. 2–3 €/m<sup>2</sup> (Wierer, 2012). Questo trattamento non invecchia anticipatamente la pavimentazione.

- **Aderenza**
- **Resistenza alla deformazione**
- **Resistenza all'abrasione**
- **Sicurezza antincendio**
- **Vita utile**

Di seguito saranno valutati i **diversi sistemi di prodotto** in base ai criteri sopraccitati: va osservato che non esistono esperienze dirette per tutti i sistemi elencati, oppure non è stato possibile reperire informazioni in merito. Per tutti i sistemi va annotato che la stesa, alle

nostre latitudini, avviene in genere fra maggio e ottobre.

In generale le pavimentazioni in galleria sono costituite da carreggiate eseguite in calcestruzzo oppure in conglomerato bituminoso. A seguito del grave incidente nella galleria dei Tauri (1999) con 12 morti, la RVS ha proibito la posa in opera di pavimentazioni in conglomerato bituminoso all'interno delle gallerie di classe di pericolosità III e IV e nelle gallerie con una lunghezza superiore a 1000 m; prescrivendo la realizzazione di carreggiate in calcestruzzo. La versione delle RVS 09.01.23 del 14 dicembre 2010 ha annullato questa prescrizione, perché non è stato possibile dimostrare un carico d'incendio aggiuntivo a da parte del conglomerato bituminoso. E' quindi nuovamente possibile utilizzare pavimentazioni sia in conglomerato bituminoso che in calcestruzzo. Un confronto fra queste due possibilità è riportato nel capitolo 12-12 Direttive del Manuale.

Il dimensionamento sottostà alle direttive e alle prescrizioni in vigore per tratti stradali non coperti. E' possibile utilizzare sostanze schiarenti che secondo (Meseberg, 2009), portano evidenti vantaggi economici. Un confronto tra i due tipi di tecnologie è riportato nel capitolo 12-33 del manuale.

L'impiego di sostanze schiarenti artificiali oppure naturali si ammortizza velocemente. Se dopo la posa in opera la luminosità richiesta non è raggiunta, p.e. a causa della presenza del film di bitume, che ricopre gli inferti, si può procedere alla sua rimozione mediante macchina pallinatrice.

Prima della la stesa di uno strato di usura, lo strato di usura preesistente deve essere fresato e il piano di posa deve essere successivamente preparato per assicurare una buona adesione e durabilità. Nel caso di asfalti drenanti si può rinunciare alla raschiatura o all'esecuzione di una

ricarica, perché con la loro struttura granulometrica possono conguagliare la irregolarità e rugosità del fondo in calcestruzzo (Dudenhöfer & Schumann, 2003). E' tuttavia necessaria una profilatura oppure la stesa di una membrana per garantire il deflusso dell'acqua.

Il materiale inerte deve essere costituito da rocce chiare, che rispettino le prescrizioni (LA, PSV) e provengano da cave possibilmente locali. Il manuale riporta al capitolo 13-11 un elenco delle rocce presenti in regione.

Per tutti i tipi di pavimentazione è indispensabile che il sottofondo non subisca cedimenti. Nel corso del risanamento è quindi necessario verificare la presenza di fessure e il loro eventuale propagarsi anche nello strato portante. In questo caso va sostituito non solo lo strato di usura, ma va risanata tutta la sovrastruttura stradale, perché altrimenti le fessure si ripresenterebbero nuovamente in breve tempo. In caso di sottofondi soggetti a movimenti, è corretto eseguire un progetto che prevede una sovrastruttura in solo conglomerato bituminoso e non in calcestruzzo. L'asfalto colato, essendo un sistema completamente rigido, non è idoneo per le superfici estese che si trovano in galleria.

Oltre agli aspetti prettamente costruttivi, una questione importante è la regolazione del traffico in galleria durante i lavori di risanamento. In caso di gallerie a traffico bidirezionale è spesso necessario eseguire i lavori su un unico lato. Questo procedimento è di più facile realizzazione per le pavimentazioni in asfalto che in quelle in calcestruzzo. Nel caso di gallerie brevi, il calcestruzzo può essere posato in opera a mano, il che rende possibile la chiusura al traffico di una carreggiata; soluzione altresì dispendiosa.

## Le pavimentazioni chiare possono essere realizzate nei seguenti sistemi costruttivi:

- **Pavimentazione in calcestruzzo**

Si posa uno strato di 20 cm ca., costituito da calcestruzzo normale avente il 100% di aggregati frantumati. Durante la posa è necessario controllare l'aderenza completa di quest'ultimo per evitare che sia posato su uno strato di ghiaia; altrimenti possono verificarsi rigonfiamenti sui bordi, soprattutto lungo i giunti di dilatazione trasversali, dovuti a differenze di umidità fra il lato superiore e quello inferiore del calcestruzzo (Werner, www.betonstrassen.bvbe.ch, 2003). I giunti di dilatazione richiedono molta manutenzione e la presenza di inerti frantumati rende difficoltosa la posa all'interno dell'armatura. La base di calcestruzzo dovrebbe essere fresata e le zone ammalorate dovrebbero essere risanate. Esiste la possibilità di trattare il calcestruzzo con pigmenti bianchi. Lo spessore del manto in calcestruzzo deve essere di almeno 6 cm. Il problema principale al momento del collaudo riguarda l'aderenza superficiale.

Il vantaggio di una pavimentazione in calcestruzzo è dato dalla vita utile - fino a 50 anni (con risanamento dei giunti di dilatazione ogni 20 anni), dall'ottimo valore di luminanza e dal semplice ripristino di quest'ultima mediante pallinatrici o pulizia ad alta pressione. Il costo della posa è sicuramente maggiore di quello per pavimentazioni in conglomerato bituminoso, ma si ammortizza grazie alla maggiore durata (ca. 45 – 50 €/m<sup>2</sup>). Per la posa in opera è

consigliabile una chiusura totale della galleria al traffico.

- **Pavimentazione semirigida (o semi-flessibile)**

Pavimentazioni semirigide possono essere realizzate utilizzando inerti chiari, come ignimbriti riodacitiche i cui pori vuoti vengono riempiti con malte cementizie di colore bianco. Per questo tipo di pavimentazione in Tirolo del Nord non esiste ancora una base giuridica, perché il CEM I non possiede i requisiti necessari al suo impiego nelle costruzioni stradali. Questa tecnologia è stata testata nella seconda galleria sperimentale di Narano e nella galleria di Seehof nell'ambito del presente progetto. Questo tipo di pavimentazione trova normalmente la sua applicazione in aeroporti, fermate di autobus e rotatorie. Nel corso della posa in opera va tenuto conto del tempo di presa del cemento che si allunga ed ha bisogno di un'accurato trattamento successivo. Le prime misure di luminanza per la galleria Narano hanno dato il risultato di 13 cd/m<sup>2</sup> (misura eseguita sul campione di laboratorio non in galleria). Su tratti all'aperto la vita utile della pavimentazione è stimata in 15 anni, in galleria può essere maggiore, vista l'assenza dell'azione dei raggi UV. Il prezzo di ca. 20-25 €/m<sup>2</sup> risulta contenuto.

- **Pavimentazione in conglomerato bituminoso**

Manti in conglomerato bituminoso possono essere di vario tipo e di solito

sono eseguiti con uno spessore variabile di 3 - 5 cm:

- Con inerti chiari (ignimbrite riocattolica o granito chiaro; calcare, che spesso non ha la dovuta resistenza alla levigabilità e non è quindi idoneo)
- Bitume secondo ÖNORM 36.10 e RVS 08.97.05, bitume trasparente oppure leganti colorati sinteticamente

E' necessario tenere conto che, nel caso dell'impiego di bitumi speciali, è necessaria una pulizia completa delle finitrici e degli impianti di miscelazione. Leganti sintetici (vedi capitolo 14-10) hanno un tempo di raffreddamento maggiore e l'asportazione del film di bitume da parte del traffico veicolare avviene più velocemente, mettendo in luce più rapidamente il colore delle rocce impiegate. Se non viene impiegato un bitume speciale, si può procedere con una pallinatura per accelerare i tempi di spogliamento, e far affiorare la roccia chiara. Nel caso di impiego di rocce acide può essere necessario l'uso di attivanti di adesione secondo RVS 08.97.05.

Le pavimentazioni in conglomerato bituminoso sono state eseguite in diverse gallerie, con l'impiego di bitume trasparente nella prima galleria di prova del progetto iBBT a Narano (vedi capitoli 14-11 del manuale).

Tappeti di usura di tipo Splittmastix chiari possono essere realizzati con bitume modificato con polimeri in aggiunta a quarzite di Taunus chiara oppure flint e luxovite. Questo tipo di pavimentazione è stato già utilizzato a Monaco di Baviera,

nella gallerie di Baregg e Kappelberg. La vita utile della SMA può essere stimata in più di 20 anni. Questa pavimentazione viene posata come uno SMA convenzionale con spessori di strato maggiori di 3 cm. In Germania si applica sullo strato superiore una granigliatura di pietrisco depolverato e senza bitume e in Austria questa procedura non è prevista dalla RVS 08.97.05.

L'impiego di asfalto drenante in galleria non è permesso per via del pericolo di incendio (liquidi combustibili potrebbero infiltrarsi nei i pori e non sarebbe più possibile spegnere o soffocare l'incendio con sabbia).

- **Strato sottile a caldo**

Questa tecnologia può essere realizzata con bitume trasparente con polimeri. E' stata impiegata nella galleria di Gräfelting ed è descritta nel capitolo 12-33. Anche dopo 3 anni di esercizio si registrano buoni valori di luminosità. (Autobahndirektion Südbayern-direzione autostradale Baviera Sud, 2012)

- **Strato sottile a freddo**

La tecnologia dello strato sottile a freddo è stata applicata finora solo all'aperto. Per l'impiego in galleria dovrebbe essere usato pietrisco chiaro e possibilmente bitume decolorato. Con bitume normale lo strato sottile è stato già applicato in gallerie allo scopo di aumentare l'aderenza. Difficoltà da segnalare sono un addensamento e un'incollatura insufficienti. Poiché per l'indurimento del manto sono richieste temperature maggiori, di quelle raggiunte in galleria.

Non avviene un indurimento completo del manto. Inoltre, nel caso di bitume normale, se il traffico elimina la frazione di inerte grosso prevale il colore del mastice, il che comporta uno scurimento del manto.

- **Asfalto colato**

L'asfalto colato è stato posato, ad oggi, in poche gallerie. Come lo SMA, è sottoposto a granulatura con pietrisco. Sono stati però registrati elevati rumori dati dal transito veicolare e i valori di riflessione prescritti non sono stati raggiunti. Un'ulteriore problema è dato dalla rigidità di questa pavimentazione, in quanto non contrasta la risalita di fessure nel caso di assestamenti anche minimi del sottosuolo. Inoltre bisogna prendere in considerazione i maggiori oneri per la posa in opera di chiusini di fognatura e altre interruzioni nella continuità del manto stradale.

- **White-Topping**

La tecnologia del White-Topping è stata finora applicata raramente in galleria, per la difficoltà della sua esecuzione. Inoltre, per la posa in opera, è necessaria una chiusura completa al traffico. (Werner, Gespräche zu Betonbelägen in Tunnel, 2014).

## 22-40 Introduzione alle pavimentazioni scelte per la stesa in Alto Adige

Nell'ambito di questo progetto tra le attività a carico della Provincia Autonoma di Bolzano sono state valutate le proprietà meccaniche e fotometriche di tappeti di usura chiari per la pavimentazione di gallerie stradali al fine di ridurre i consumi energetici legati all'illuminazione e di migliorare le condizioni di sicurezza.

- 1) La prima consiste nella realizzazione di un'usura chiara caratterizzata da aggregati chiari e **legante trasparente** (fig. 1);
- 2) La seconda soluzione riguarda una **pavimentazione semiflessibile** costituita da un tappeto di usura drenante, ad elevata porosità, successivamente intasato con una malta cementizia fluida di colore bianco (fig. 2).



**Fig. 1** - Tappeto con aggregati chiari e legante trasparente



**Fig. 2** - Pavimentazione semiflessibile (tappeto di usura drenante intasato con una malta cementizia)

Le due diverse pavimentazioni sono state realizzate in due gallerie vicine situate in località Narano del comune di Tesimo, lungo la SS 238 delle Palade.

Per esigenze organizzative dei lavori il tappeto con legante trasparente è stato posto in opera nel mese di luglio 2012, mentre quello drenante

intasato con malta cementizia di colore chiaro è stato realizzato nel mese di luglio 2013.

La caratterizzazione dei materiali, lo studio delle miscele, le prove di controllo durante l'esecuzione dei lavori ed il monitoraggio successivo hanno visto coinvolti il Laboratorio Prove Materiali della Provincia Autonoma di Bolzano e il Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche (Ancona).

## 22-41 Le pavimentazioni chiare in galleria

Negli ultimi anni è andato via via crescendo l'interesse per l'applicazione di pavimentazioni chiare nelle gallerie stradali, al fine di ottenere una riduzione dei consumi energetici legati all'illuminazione ed un miglioramento delle condizioni di sicurezza. Tali benefici sono legati alle elevate proprietà fotometriche dei manti di usura chiari. Secondo l'European Asphalt Pavement Association (EAPA) le pavimentazioni chiare risultano superiori rispetto ai tradizionali conglomerati bituminosi "neri" sia in termini di luminanza (capacità di riflettere le onde luminose) che di contrasto alla segnaletica orizzontale (European Asphalt Pavement Association, 2008). Inoltre recenti indagini sperimentali hanno constatato un risparmio energetico nell'illuminazione delle gallerie fino al 30 - 40% in presenza di superfici chiare (St-Jacques M., Brosseaud Y, 2006).

Come già menzionato la superficie stradale viene "usurata" dal contatto con i pneumatici dei veicoli in transito. Subito dopo la stesa del tappeto di usura gli aggregati lapidei sono ricoperti dal legante ma, dopo pochi mesi, gran parte del legante viene asportato e vengono messe a nudo le facce superiori degli aggregati. Il

legante che resta visibile è quello collocato in forma di malta (legante, filler e parte fina della sabbia) o di mastice (legante e filler) tra gli interstizi dei granuli più grossi. Tale fenomeno è più o meno rapido in relazione alla natura degli aggregati e al tipo di legante utilizzato. Ne deriva che la colorazione più o meno chiara della pavimentazione dipende prevalentemente dal colore degli aggregati e dal colore del legante.

Le pavimentazioni chiare devono pertanto essere costituite da aggregati e da leganti di colore chiaro.

Mentre per gli aggregati la scelta del materiale da utilizzare dipende dalla sua reperibilità nella zona e dall'incidenza dei costi di trasporto, per il legante la questione è più complessa.

Nei paesi tradizionalmente legati alla realizzazione di pavimentazioni rigide in calcestruzzo, il tipo di legante viene ricercato tra i vari tipi di cemento. La pavimentazione in calcestruzzo oltre a garantire in generale una vita utile molto lunga, presenta nelle gallerie anche la peculiarità di essere ignifuga, con evidenti vantaggi in caso di incendio. Per contro si tratta di una pavimentazione molto costosa, difficile da realizzare e soprattutto con notevoli difficoltà di manutenzione in relazione al mantenimento dei livelli di aderenza da garantire per la sicurezza degli utenti.

Nel campo delle pavimentazioni flessibili i leganti per la realizzazione di pavimentazioni chiare possono essere bitumi a basso tenore di asfalteni o resine sintetiche che assumono una colorazione ambrata molto chiara.

L'introduzione sul mercato di leganti chiari nasce dall'esigenza di integrare le pavimentazioni stradali con il paesaggio circostante, sia urbano che extraurbano, mitigando l'impatto estetico altrimenti provocato dalla colorazione scura dei

leganti bituminosi tradizionali, che penalizza gli ambienti di elevato valore naturale o storico monumentale.

Le **proprietà fotometriche** di una pavimentazione flessibile chiara dipendono da:

- tipologia di legante – a seconda della natura chimica e della tecnica di produzione i leganti deasfaltizzati possono avere una differente limpidezza, luminosità e tonalità di colore;
- presenza di pigmenti (tipo biossido di titanio) o di filler “bianchi” (tipo calce idrata) che conferiscono una colorazione molto chiara al mastice filler – bitume;
- tipologia di aggregati: inerti di diversa mineralogia assumono colorazioni differenti che influenzano la luminanza della pavimentazione in virtù della trasparenza del legante;
- tipologia della miscela di aggregati: tappeti di usura tradizionali (ricchi di sabbia) e splittmastix assumono una differente tonalità di colore legata alla diversa granulometria (in particolare al contenuto di frazione fine) e al contenuto di legante.

**Tra le soluzioni con pavimentazioni rigide e quelle con pavimentazioni flessibili si inseriscono i tappeti di usura semiflessibili.**

La tecnica del tappeto semiflessibile consiste nella stesa di un conglomerato bituminoso fortemente poroso (con una percentuale di vuoti compresa tra il 25 e il 30%) e nella successiva saturazione dello strato con una malta cementizia fluida, fibrorinforzata, di colore chiaro.

**Tale procedura presenta i seguenti vantaggi:**

- le fasi di realizzazione del tappeto (stesa del conglomerato drenante ed intasamento con la malta cementizia) risultano semplici e di rapida esecuzione;
- viene ovviato al problema del giunto grazie allo “scheletro” in conglomerato bituminoso, che consente di evitare fessurazioni termiche e da ritiro;
- la sovrastruttura ottenuta risulta estremamente performante poiché il materiale eredita sia la flessibilità e la duttilità di un conglomerato bituminoso che la rigidità di un calcestruzzo;
- la pavimentazione rimane di colorazione chiara per la presenza in superficie della malta cementizia collocata tra gli interstizi degli aggregati più grossi.

## 23-11 Attività di laboratorio per la determinazione degli aggregati

### La tempistica nella ricerca degli aggregati chiari

La ricerca degli aggregati per l'impiego in conglomerati bituminosi si suddivide in due fasi principali, nelle quali sono state eseguite le prove di laboratorio per la determinazione delle proprietà fisico - meccaniche, termiche e fotometriche.

Per rispettare i tempi previsti dal progetto e per tarare il programma sperimentale sono stati individuati in una prima fase di preselezione

quattro aggregati: il Porfido Grigio e la Diorite di Campodazzo in parte già in uso, il Granito di Bressanone della Galleria di base del Brennero e il basalto umbrese come pietra di riferimento.

Successivamente è stata estesa la ricerca e sono state analizzate 21 tipologie di rocce differenti. I risultati sono documentati nella tabella riassuntiva (vedi pagina 23).

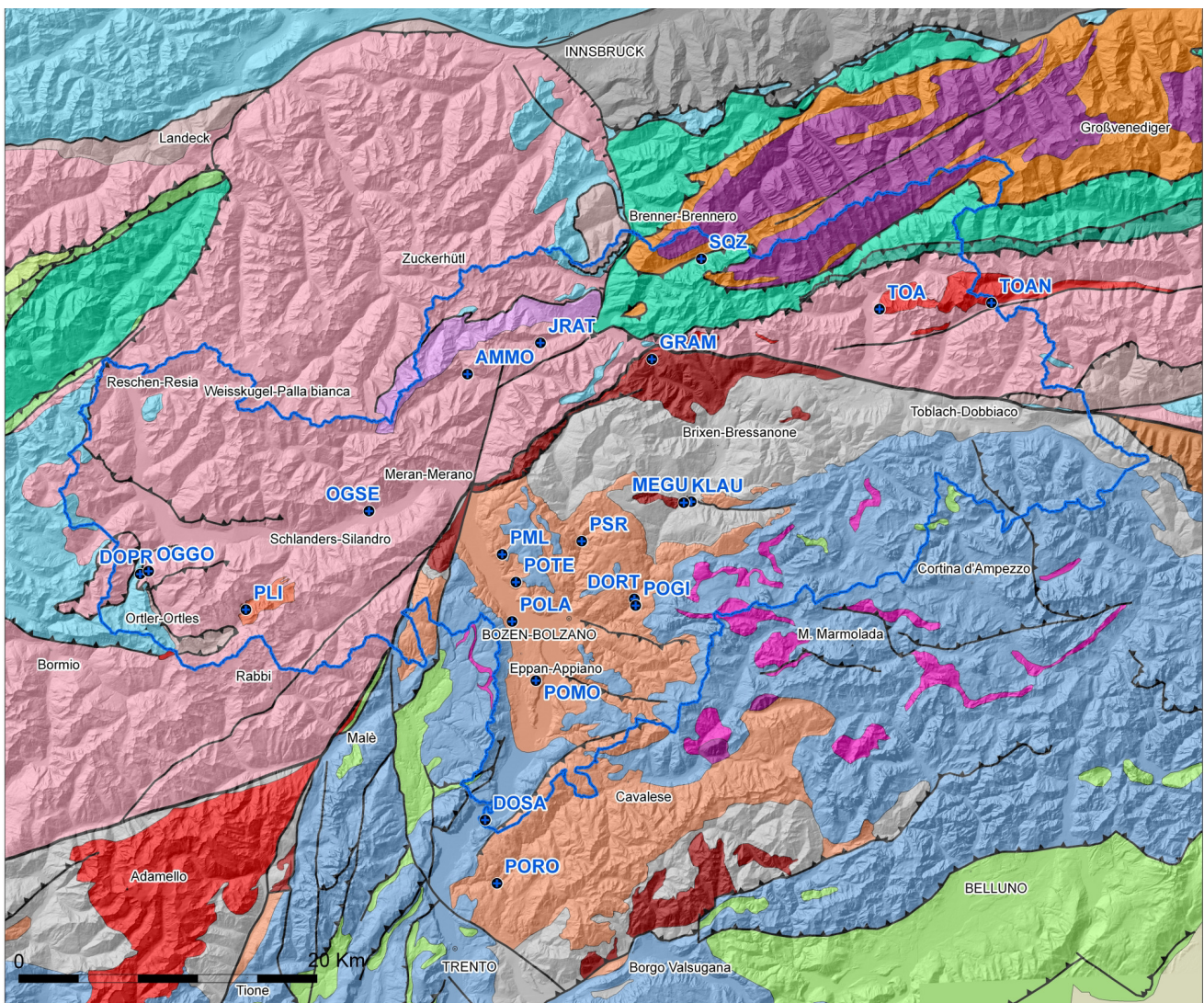


Fig. 3 - Inquadramento geografico dei luoghi di prelievo indicati sulla carta geologica

## Ubicazione dei luoghi di campionamento

Il prelievo dei campioni di roccia è stato eseguito nei luoghi indicati in figura 3, sia in Alto Adige che nel Trentino.

## Descrizione breve delle prove eseguite

In seguito il riassunto delle prove eseguite. La descrizione si trova dal capitolo 13-11 del manuale:

- Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati
  - Metodi per la determinazione della resistenza alla frammentazione secondo EN 1097-2 Los Angeles
  - Determinazione del valore di levigabilità secondo EN 1097-8 PSV, CLA
- Prove per determinare l'affinità tra il bitume e l'aggregato (prove di spogliamento secondo CNR 138)
- Prove per determinare le proprietà termiche e la degradabilità degli aggregati (determinazione della resistenza al gelo e disgelo secondo EN 1367-1)
- Prove per determinare le proprietà fotometriche degli aggregati

## I valori limite per gli aggregati idonei

Le prove sono state eseguite in diverse fasi, solo in caso di raggiungimento del criterio prestabilito si è proseguito con la prova successiva.

Come parametri limite sono stati scelti i seguenti valori:

- **Resistenza alla frammentazione LA < 30%**
- **Valore di levigabilità CLA > 45 BPN**
- **Resistenza al gelo e disgelo F < 1%**

- **Valori di luminanza L > 8 cd/m<sup>2</sup>**

## Interpretazione dei risultati

Dalle prove eseguite si evince che le caratteristiche meccaniche e termiche determinate su ogni singola roccia dipendono non solo dalla loro genesi, dai processi di alterazione e deformazione tettonica subiti, ma anche dal luogo del loro affioramento, dalla modalità di prelievo e dalla preparazione dei provini analizzati.

## Risultati delle prove eseguite per la caratterizzazione della roccia idonea per l'impiego come aggregato in conglomerati bituminosi chiari

N.	Denominazione / Bezeichnung	Sigla / Kürzel	LA (EN 1097-2) [%]	PSV (EN 1097-8) [BPN]	F gelività / Frost-Tau-Wechsel (EN 1367-1)	LA' gelività / F-T-W (EN 1097-2) [%]	Luminanza / Leuchtdichte [cd/m2]		Spogliamento a 40°C con e senza attivanti / Haftverlust bei 40°C mit und ohne Haftanreger (CNR138) [%]		Descrizione petrografica / Petrographische Bezeichnung	Provenienza / Herkunft	AQD (IBBT) aggregate quality designation = LA (-30%) + PSV (60%) + Ldry (10%)
							dry	wet	con / mit	senza / ohne			
1	Porfido Grigio Campodazzo / Grauer Porphyr Atzwang	POGI	13	50	0,2	14	13,2	4,7	0	0	Ignimbrite rioclastica Rhyodazitische Ignimbrit	Campodazzo / Atzwang	27,4
2	Klausenite / Klausenit	KLAU	12	49	0,3	12	12,1	5,9	0	0	Dorite diorit	Chiusa / Klausen	27,0
3	Porfido Sarentino / Sarner Porphyr	PSR	18	51	0,2	18	15	3,1	1	0	Ignimbrite riolitica Rhyolitische Ignimbrit	Val Sarentino / Sarntal	26,7
4	Lava andesitica Campodazzo / Andesitische Lava Atzwang	DORT	12	46	0,3	12	14,4	4,5	0	0	Lava andesitica Andesitische Lava	Campodazzo / Atzwang	25,4
5	Profido rosso Val di Cembra / Roter Porphyr Cembratal	PORO	18	49	0,11	18	12,9	4,1	10	0	Ignimbrite riolitica Rhyolitische Ignimbrit	Val di Cembra / Cembratal	25,3
6	Granito Bressanone / Brixner Granit	GRAM GRAD GRAB	30	52	0,2	30	22,4	11,7	5	0	Granito Granit	Mules / Mauls	24,4
7	Metagabbro Gudon / Metagabbro Gufidaun	MEGU	30	52	0,4	31	8,0	2,6	0	0	Metagabbro Metagabbro	Gudon / Gufidaun	23,0
8	Tonalite Anterselva / Tonalit Antholzertal	TOAN	26	48	0,16	29	19,3	10	30	10 *	Tonalite Tonalit	Anterselva / Antholzertal	22,9
9	Ortogneiss Trus / Orthogneiss Trus	OGGO	25	46	0,1	28	14,5	5,8	0	0	Ortogneiss Orthogneiss	Stelvio / Stilfs	21,6
10	Granito Val Martello / Marteller Granit	PLI	34	49	0,2	36	23,1	12,4	0	0	Granito Granit	Val Martello / Martellital	21,5
11	Porfido Mellina / Möltner Porphyr	PML	23	56	1,5	24	8,8	2,4	55	3	Ignimbrite rioclastica Rhyodazitische Ignimbrit	Mellina / Mölten	27,6
12	Ortogneiss Val Senales / Orthogneiss Schnalstal	OGSE	27	46	0,2	32	11,9	4,2	5	1	Ortogneiss Orthogneiss	Val Senales / Schnalstal	20,7
13	Dolomia Salorno / Dolomit Salurn	DOSA	19	39	-	-	20,7	15,2	-	-	Dolomia Dolomit	Salorno / Salurn	19,8
14	Dolomia Prato / Dolomit Prad	DOPR	21	36	0,08	21	9,1	3,1	0	0	Dolomia Dolomit	Prato a. Stelvio / Prad a. Stj.	16,2
15	Porfido Monticolo / Montiggler Porphyr	POMO	25	38	0,37	25	8,5	3,5	80	0	Ignimbrite rioclastica Rhyodazitische Ignimbrit	Appiano / Eppan	16,2
16	Anfibolite Moso / Amphibolit Moos	AMMO	29	40	0,2	30	6,3	1,3	0	0	Anfibolite Amphibolit	Moso in Passiria / Moos in Passeier	15,9
17	Lava Adriano / Lava Andrian	POLA	32	37	1,34	32	12,6	5,7	-	-	Lava riolitica Rhyolitische Lava	Andriano / Andrian	13,9
18	Marmo Racines / Marmor Ratschings	JRAT	53	36	-	-	41,6	30,7	-	-	Marmo Marmor	Racines / Ratschings	9,9
19	Quarzite argentea Val di Vizze / Pflitscher Silberquarzit	SQZ	37	38	-	-	-	-	8	-	Quarzite Quarzit	Val di Vizze / Pflitscher Tal	-
20	Profido Terlano / Terlaner Porphyr	POTE	35	-	-	-	-	-	-	-	Lava riolitica Rhyolitische Lava	Terlano / Terlan	-
21	Tonalite Val Aurina / Tonalit Ahrtal	TOA	37	-	-	-	-	-	-	-	Tonalite Tonalit	Val Aurina / Ahrtal	-

Valori limiti / Grenzwerte	I.cats23 II.cat. 23xsx25	I.cat≥42 II.cat. 40xsx42	≤1%				0	0
----------------------------	--------------------------	--------------------------	-----	--	--	--	---	---

### Idoneità per l'impiego come aggregato per conglomerati bituminosi Verwendbarkeit als Zuschlagstoff für Asphaltmischgut

# Utilizzabile / Verwendbar	# Valore determinante per la non idoneità / Ausschliessender Wert für die Verwendbarkeit	# * Possibilità di ripetizione prova con attivante di adesione differente / Möglichkeit Probe mit anderen Haftanreger zu wiederholen
# Utilizzabile dal 2014 / Seit 2014 verwendbar	# Valore determinato nel Laboratorio di Strade Università Ancona / Ermittelter Wert im Straßenbaulabor der Universität Ancona	- Prova non eseguita a causa della non idoneità dei risultati delle prove precedenti / Probe nicht durchgeführt aufgrund unzureichender Ergebnisse vorheriger Proben
# Non utilizzabile / Nicht verwendbar	# Valore determinato nel laboratorio Ufficio Geologia e Prove Materiali / Ermittelter Wert Labor Amt für Geologie und Baustoffprüfung	AQD Valore sommatorio sviluppato nell'ambito del progetto IBT per indicare la qualità delle rocce / Für das Projekt IBT entwickelter Sammelwert für die Gesteinsgüte

## 23-12 Caratterizzazione dei materiali e studio delle miscele

Una volta individuate le due tipologie di tappeti chiari da utilizzare nella sperimentazione è stato predisposto un programma sperimentale per la caratterizzazione dei diversi materiali e per lo studio delle miscele cercando sempre di perseguire l'obiettivo di pavimentazioni chiare, ferme restando le prestazioni usualmente richieste in termini di durabilità (resistenze meccaniche) e sicurezza (regolarità ed aderenza).

Alcune indagini, come quella per l'individuazione di aggregati chiari reperibili nella zona dell'Alto Adige, sono risultate comuni alle due tipologie di tappeto di usura, altre sono state diversificate in relazione alla specificità della soluzione proposta.

Per la scelta degli aggregati grossi (trattenuti al setaccio da 4 mm) sono stati valutati i parametri: resistenza alla frantumazione e alla levigazione.

Gli aggregati fini sono stati sempre costituiti da materiale calcareo di colore bianco.

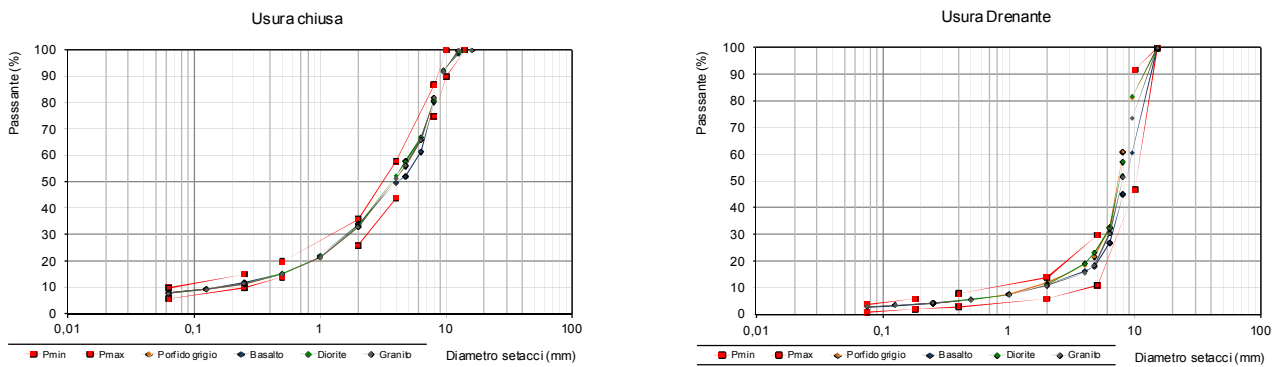
L'assortimento granulometrico delle diverse miscela degli impasti (conglomerati bituminosi) di laboratorio è stato scelto facendo riferimento ai fusi prescritti dal Capitolato Speciale d'Appalto per Lavori Stradali della Provincia Autonoma di Bolzano (tabella 3 e figure 4).

## 23-13 Programma sperimentale

Al fine di individuare le soluzioni ottimali per le due tipologie di tappeti chiari da realizzare, sono state valutate differenti tipologie di aggregati, di leganti, di miscele, di filler e differenti quantità di biossido di titanio (TiO<sub>2</sub>) come pigmento di colorazione del conglomerato. Il riassunto del programma sperimentale, con l'indicazione delle norme utilizzate, si trova nel capitolo 13-12 del manuale.

Tipo di tappeto	Tipo di aggregato grosso	Pezzature									
		porfido 8/12	porfido 4/8	basalto 8/12	basalto 4/8	diorite 8/12	diorite 4/8	granito 8/12	granito 4/8	sabbia calcarea	filler
Usura chiusa	Porfido	35 %	17 %	-	-	-	-	-	-	43 %	5 %
	Basalto	-	-	2 %	48 %	-	-	-	-	45 %	5 %
	Diorite	-	-	-	-	30 %	22 %	-	-	43 %	5 %
	Granito	-	-	-	-	-	-	35 %	17 %	43 %	5 %
Usura drenante	Porfido	78 %	5 %	-	-	-	-	-	-	15 %	2 %
	Basalto	-	-	39 %	45 %	-	-	-	-	14 %	2 %
	Diorite	-	-	-	-	68 %	17 %	-	-	13 %	2 %
	Granito	-	-	-	-	-	-	65 %	20 %	13 %	2 %

Tabella 3 - Proporzionamento delle singole pezzature per tappeti d'usura chiusa e drenante



**Fig. 4 - Curve granulometriche per la formazione di tappeti di usura chiusi e di usura drenanti**

Nella successiva tabella 4 sono riportate le principali caratteristiche degli aggregati esaminati: massa volumica apparente, assorbimento d'acqua, resistenza alla frammentazione (Los Angeles) e levigabilità accelerata (CLA).

I risultati delle prove eseguite sono riportati nella tabella 5.

Sugli stessi aggregati, al fine di determinarne il contributo alla colorazione chiara del tappeto di usura, sono state eseguite le prove di luminanza in condizione di materiale asciutto e di materiale bagnato (solo aggregati grossi, senza legante).

Caratteristiche	Metodo di prova	Unità di misura	Porfido grigio	Basalto	Diorite	Granito	Sabbia calcarea
Massa volumica apparente	EN 1097-6	[g / cm <sup>3</sup> ]	2,67	2,76	2,71	2,68	2,73
Assorbimento d'acqua	EN 1097-6	%	1,42	1,54	1,61	0,78	1,71
Resistenza alla frammentazione (Los Angeles)	EN 1097-2	%	13	13	12	30	/
Valore di levigabilità (CLA)	EN 1097-8	BPN	50	51	46	52	/

**Tabella 4 - Caratterizzazione meccanica degli aggregati**

Caratteristiche	Unità di misura	Porfido grigio	Basalto	Diorite	Granito
Valore di luminanza - materiale asciutto	cd/m <sup>2</sup>	69,3	55,7	54,9	125,1
Valore di luminanza - materiale bagnato	cd/m <sup>2</sup>	21,8	11	20,4	75,1

**Tabella 5 - Caratteristiche di luminanza degli aggregati**

## 23-14 Caratterizzazione dei leganti

Per quanto attiene i leganti trasparenti sono stati analizzati i prodotti Kromatis e Biokromatis della Società Pretrolifera Total.

Il Kromatis è un bitume a cui sono stati tolti gli asfalteni e sono stati aggiunti polimeri elastomerici. Il Biokromatis si ottiene con lo stesso



Fig. 5 - Kromatis



Fig. 6 - Biokromatis

procedimento del Kromatis, ma i componenti aromatici vengono sostituiti con oli vegetali. Questo consente di ottenere un legante più chiaro e trasparente (figura 5 e figura 6).

I risultati delle singole prove eseguite sui due tipi di bitumi trasparenti si trovano nel capitolo 13-12 del manuale.

## 23-15 Proprietà fotometriche

Per valutare in termini quantitativi la capacità dei conglomerati bituminosi chiari di riflettere le radiazioni luminose sono state utilizzate differenti grandezze fotometriche: luminanza (L), coefficiente di luminanza retroriflessa ( $R_L$ ), coefficiente di luminanza in condizioni di illuminazione diffusa ( $Q_d$ ) e il fattore di luminanza  $\beta$ .



Fig. 7 - Roller Compactor

Al fine di valutare l'effetto dello spogliamento superficiale del tappeto, legato all'usura dovuta al traffico, le prove di misurazione delle grandezze fotometriche sono state previste sia sui campioni di conglomerato appena compattati che a seguito della sabbiatura superficiale delle lastre.



Fig. 8 - Lastra compattata

Nella tabella 6 sono riportati i risultati acquisiti su lastre di conglomerato bituminoso (300 mm x 300 mm) realizzate in laboratorio.

dovrebbe essere rapidamente rimosso con il passaggio dei veicoli.

Miscela	Legante	Filler	Aggregato	L [cd·m <sup>-2</sup> ]	R <sub>L</sub> [mcd·m <sup>-2</sup> ·lux <sup>-1</sup> ]	Q <sub>d</sub> [mcd·m <sup>-2</sup> ·lux <sup>-1</sup> ]	β [-]
Usura chiusa	Kromatis	Omya + 0,5% TiO <sub>2</sub>	Porfido grigio	20,36	15,6	79,8	25,0
Drenante intasato	Bitume tradizionale	di recupero	Porfido grigio	40,95	47,1	174,5	54,6

**Tabella 6 - Risultati delle prove fotometriche**

Di seguito si riporta una serie di istogrammi che mettono a confronto i valori di luminanza delle diverse miscele. Dal grafico di figura 9 si può osservare che:

- i conglomerati bituminosi chiari hanno una luminanza pari a circa 3 volte quella di un conglomerato bituminoso tradizionale;
- delle quattro tipologie di aggregato, il granito sembra garantire una luminanza leggermente superiore rispetto agli altri inerti, che assumono valori tra loro confrontabili;
- il tappeto di usura chiuso risulta migliore rispetto al tappeto di usura SMA in virtù della maggiore percentuale di frazione sabbiosa (di natura calcarea) più chiara;
- l'utilizzo del filler con calce (Calfill) in alternativa al filler di recupero non determina alcun incremento della luminanza della miscela;
- il tappeto di usura drenante intasato con malta cementizia risulta nettamente superiore rispetto al conglomerato prodotto con bitume trasparente in quanto, al termine dell'intasamento, la superficie rimane rivestita da un film di malta di colore bianco molto chiaro; tuttavia tale film

Si evidenzia che tali risultati sono stati ottenuti su conglomerati appena miscelati, con gli aggregati rivestiti di bitume. Questo ha certamente penalizzato l'impasto con il bitume tradizionale "nero" e favorito il drenante intasato dove la malta cementizia bianca, usata per intasare i pori, ricopriva quasi totalmente la superficie degli aggregati.

Nelle figure 10 e 11 si evidenziano rispettivamente l'influenza del legante Biokromatis rispetto al Kromatis, la presenza di filler Omya (in alternativa a Calfill) e di biossido di titanio (1,5% di TiO<sub>2</sub> rispetto al peso del legante).

Dalla figura 10 si può osservare che il Biokromatis risulta migliore, in termini di luminanza delle miscele, rispetto al Kromatis, indipendentemente dalla tipologia di filler (di recupero o Calfill) e dalla tipologia di tappeto (chiuso o SMA).

La figura 12 mostra che il filler Omya permette di avere una luminanza superiore rispetto al filler Calfill, effetto che risulta amplificato mediante l'aggiunta di piccole percentuali (1,5% sul peso del legante) di biossido di titanio.

In figura 9 viene mostrato l'andamento della luminanza in funzione del contenuto di biossido

di  
titanio.  
Dal  
grafico  
si può

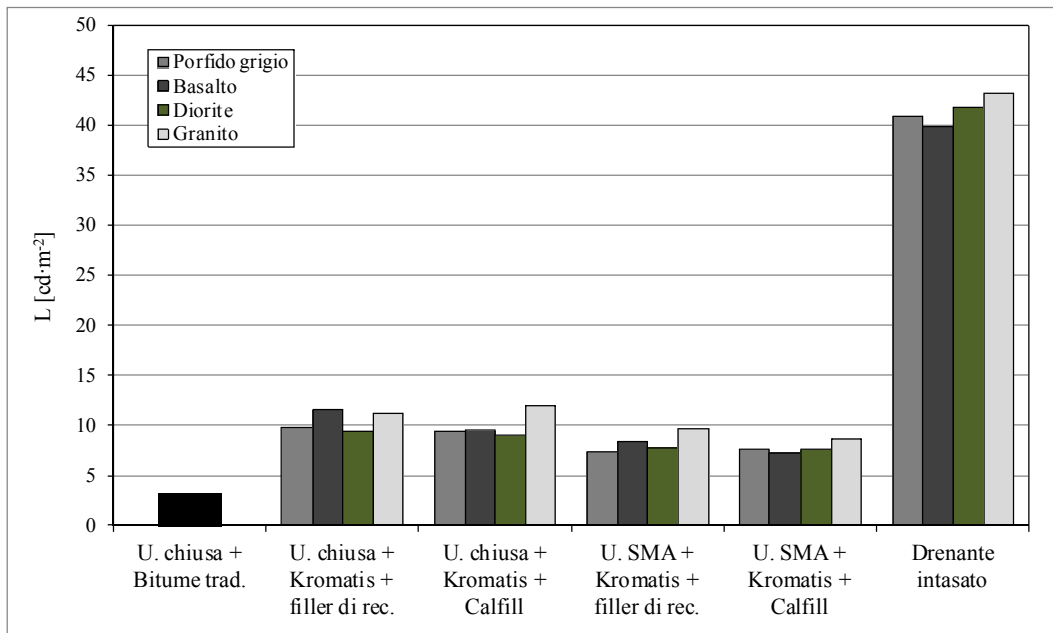


Fig. 9 - Risultati delle prove di luminanza

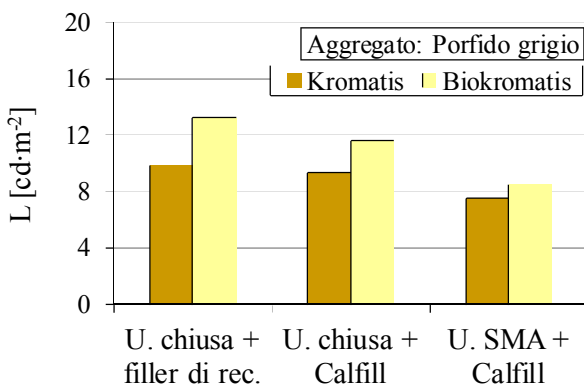


Fig. 10 - Influenza del legante Biokromatis

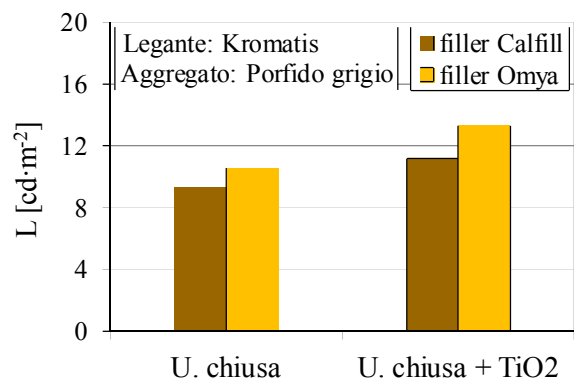


Fig. 11 - Influenza del filler Omya e del TiO<sub>2</sub>

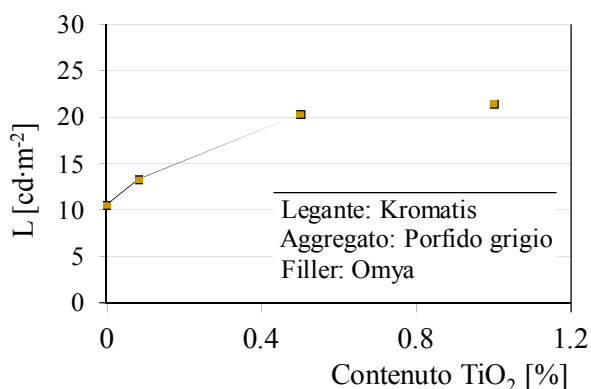


Fig. 12 - Luminanza in funzione del contenuto di TiO<sub>2</sub>

osservare che, al crescere del contenuto di TiO<sub>2</sub>, la luminanza tende a crescere. Al crescere del contenuto di TiO<sub>2</sub>, la luminanza tende ad assumere un valore massimo asintotico. Si può dunque affermare che, per ottenere una pavimentazione con ottime proprietà fotometriche, è sufficiente un contenuto di biossido di titanio pari allo 0,5% del peso degli aggregati.

## 23-16 Progetto SHRP della miscela con legante trasparente

Alla luce dei risultati sperimentali acquisiti dalle prove eseguite su aggregati e leganti e dalle prove fotometriche condotte sulle diverse miscele, tenendo in considerazione anche la reperibilità dei materiali e gli aspetti di natura tecnica ed economica, si è scelto, per la realizzazione del tappeto chiaro in galleria, il conglomerato bituminoso del tipo **usura chiusa** con aggregati di **porfido grigio** e **sabbia calcarea**, legante **Kromatis**.

La percentuale di bitume nella miscela è stata definita mediante un mix design volumetrico secondo il metodo SHRP (*Strategic Highway Research Program*). Tale studio è stato condotto sia sulla miscela con filler di tipo Calfill che filler di tipo Omya.

Per prima cosa è stata corretta la granulometria di

progetto in modo che la miscela risultasse più ricca di filler rispetto agli impasti realizzati per la caratterizzazione fotometrica. Questa scelta è stata presa al fine di garantire una maggiore rigidità e stabilità al conglomerato bituminoso, in quanto le miscele prodotte con legante trasparente risultano molto deformabili alle temperature medie di esercizio per rapporti filler/legante inferiori a 1,5.

Nella tabella 7 e nella figura 13 è riportata la curva granulometria utilizzata nel progetto della miscela.

Il progetto SHRP (*Strategic Highway Research Program*) della miscela si articola in 5 fasi:

- definizione del numero di giri iniziale  $N_{init}$ , di progetto  $N_{des}$  e finale  $N_{max}$  della pressa a taglio girevole per la compattazione dei provini;

d [mm]	vagli	Granulometrie singole frazioni				Curva miscela
		Porfido 6/12 G <sub>c</sub> 90/20	Porfido 4/8 G <sub>c</sub> 85/35	Sabbia calcarea 0/4 G <sub>f</sub> 85	Filler	
16	setaccio	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
12,5	setaccio	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
9,5	setaccio	76,4	99,6	100,0	100,0	<b>92,8</b>
8	setaccio	50,2	96,8	100,0	100,0	<b>84,6</b>
6,3	setaccio	15,3	74,8	100,0	100,0	<b>70,6</b>
4,75	setaccio	3,5	40,9	100,0	100,0	<b>61,6</b>
4	setaccio	1,0	21,8	98,6	100,0	<b>57,2</b>
2	setaccio	0,1	1,1	64,6	100,0	<b>39,3</b>
1	setaccio	0,1	0,3	38,1	100,0	<b>28,0</b>
0,5	setaccio	0,1	0,3	23,3	100,0	<b>21,9</b>
0,25	setaccio	0,1	0,3	15,2	98,6	<b>18,3</b>
0,125	setaccio	0,1	0,3	11,2	90,2	<b>15,6</b>
0,063	setaccio	0,1	0,2	9,3	77,6	<b>13,3</b>
<b>% di impiego in peso</b>		<b>30%</b>	<b>16%</b>	<b>42%</b>	<b>12%</b>	

Tabella 7 -Progetto della miscela di aggregati per il mix design SHRP

- determinazione della percentuale di bitume di primo tentativo  $P_{b(i)}$ ;
- compattazione mediante pressa giratoria di un provino con un contenuto di bitume pari a  $P_{b(i)}$  e determinazione della percentuale di vuoti della miscela per  $N = N_{des}$ ; quindi, con una formula empirica, correzione della percentuale di bitume in  $P_b$ ;
- compattazione di quattro gruppi di provini con percentuali di bitume rispettivamente pari a  $P_b - 0,5\%$ ,  $P_b$ ,  $P_b + 0,5\%$  e  $P_b + 1,0\%$  e determinazione delle percentuali di vuoti  $V_a$ , della percentuale di vuoti nella miscela di aggregati VMA e della percentuale di vuoti riempita di bitume VFA;
- determinazione della percentuale di bitume che per  $N = N_{des}$  fa riferimento a un contenuto di vuoti  $V_a$  pari al 4%, ad una percentuale di vuoti nella miscela di aggregati VMA  $> 13\%$  e ad una percentuale di vuoti riempita di bitume VFB compresa tra il 60% e l'80%.

Per entrambe le procedure di mix design, della miscela con Calfill e della miscela con Omya, sono stati assunti un  $N_{init} = 10$ , un  $N_{des} = 100$  ed un  $N_{max} = 180$ .

Nel mix design del conglomerato con filler Calfill è stata ipotizzata una  $P_{b(i)}$  pari al 6% del peso della miscela. Questa percentuale di legante di primo tentativo non è stata determinata mediante le formule empiriche proposte dalla SHRP, che fanno riferimento ai tradizionali conglomerati bituminosi "neri" e mal si adattano ai conglomerati con leganti trasparenti, ma è stata imposta sulla base di precedenti esperienze.

Il provino realizzato con un contenuto di legante  $P_{b(i)}$  ha mostrato un contenuto di vuoti a  $N_{des}$  pari a 4,76%, che ha portato alla determinazione di una  $P_b = 6,31\%$  sul peso della miscela. Per lo studio volumetrico della miscela con filler Calfill sono stati dunque definite le 4 percentuali di legante come mostrato in tabella 8.

Per la miscela con filler Omya non è stato ripetuto l'intero procedimento ma, sulla base

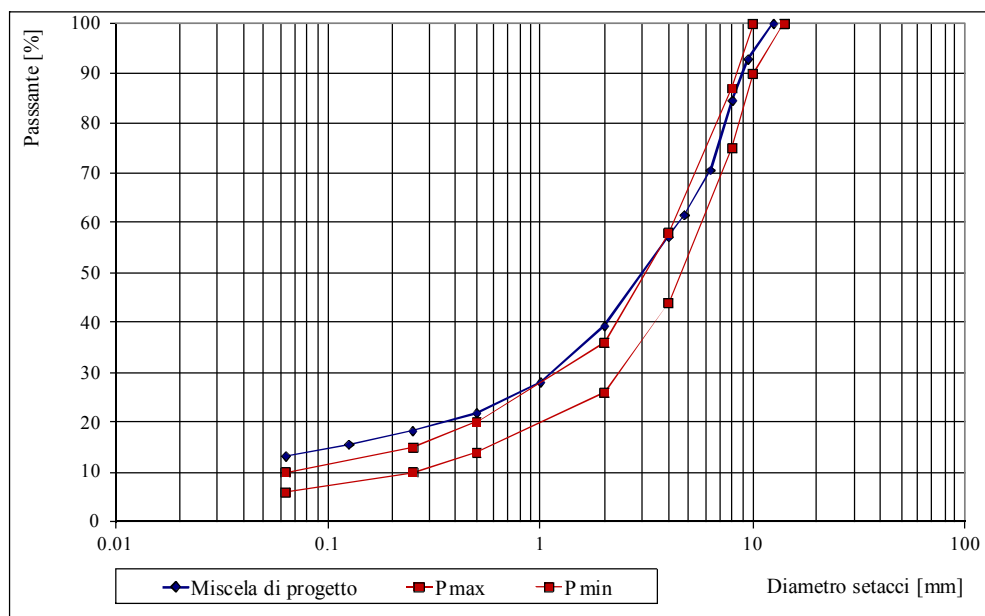


Fig. 13 - Curva granulometrica di progetto per il mix design SHRP

Miscela con filler Calfill	Miscela con filler Omya
$P_{b(A)} = 5,81\%$ sul peso della miscela	$P_{b(A)} = 5,00\%$ sul peso della miscela
$P_{b(B)} = 6,31\%$ sul peso della miscela	$P_{b(B)} = 5,50\%$ sul peso della miscela
$P_{b(C)} = 6,81\%$ sul peso della miscela	$P_{b(C)} = 6,00\%$ sul peso della miscela
$P_{b(D)} = 7,31\%$ sul peso della miscela	$P_{b(D)} = 6,50\%$ sul peso della miscela

**Tabella 8** - Percentuali di bitume per lo studio volumetrico

delle indicazioni fornite dallo studio sulla miscela con filler Calfill, sono state direttamente definite le 4 percentuali di legante per lo studio volumetrico come indicato in tabella 8.

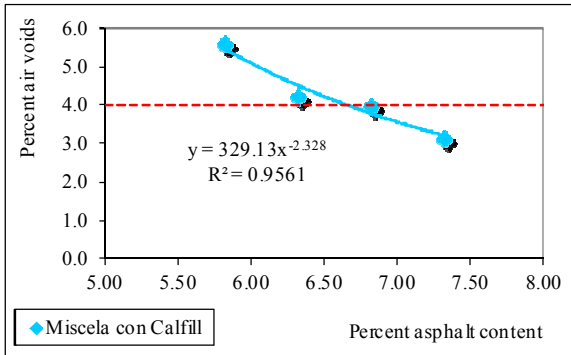
I risultati del mix design condotto sulle miscele con filler Calfill e con filler Omya sono mostrati rispettivamente in tabella 9, figure 14 a), b) e c)-17 e in tabella 10, figura 14 d) e e f).

Parametri	$P_{b(A)} = 5,81\%$	$P_{b(B)} = 6,31\%$	$P_{b(C)} = 6,81\%$	$P_{b(D)} = 7,31\%$
$V_a$	5,6	4,3	4,0	3,2
VMA	16,7	16,6	17,4	17,8
VFA	66,5	74,4	77,1	82,2
% bitume	5,81	6,31	6,81	7,31
$G_{mm}$	2,47	2,45	2,43	2,41
$G_{mb} (des)$	2,33	2,34	2,33	2,34
$C_{in}$	84,20	85,92	86,25	88,89
$C_{des}$	94,40	95,75	96,01	96,84
$C_{max}$	96,34	97,21	97,42	97,49

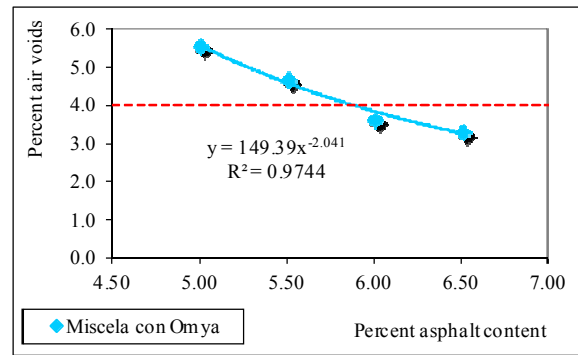
**Tabella 9** - Risultati del mix design SHRP sulla miscela con Calfill

Parametri	$P_{b(A)} = 5,00\%$	$P_{b(B)} = 5,50\%$	$P_{b(C)} = 6,00\%$	$P_{b(D)} = 6,50\%$
$V_a$	5,6	4,7	3,7	3,4
VMA	14,9	15,3	15,4	16,2
VFA	62,6	69,1	76,3	79,3
% bitume	5,00	5,50	6,00	6,50
$G_{mm}$	2,50	2,48	2,46	2,44
$G_{mb} (des)$	2,36	2,36	2,37	2,36
$C_{in}$	84,44	85,17	86,09	86,37
$C_{des}$	94,40	95,28	96,34	96,63
$C_{max}$	95,80	96,70	97,78	98,07

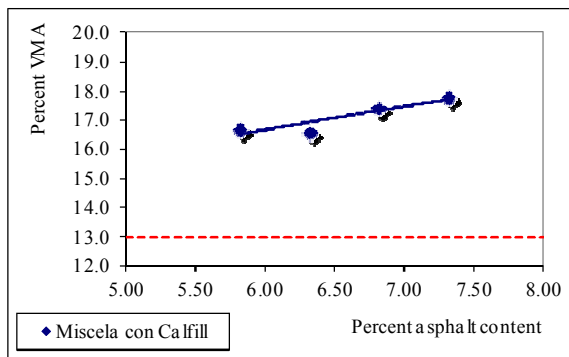
**Tabella 10** - Risultati del mix design SHRP sulla miscela con Omya



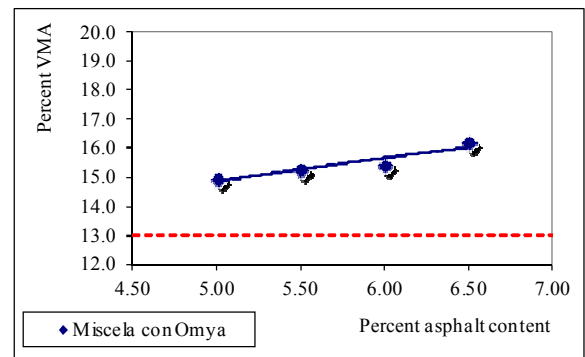
a) Percentuale di vuoti nel conglomerato bituminoso in funzione del contenuto di legante (miscela con filler Calfill)



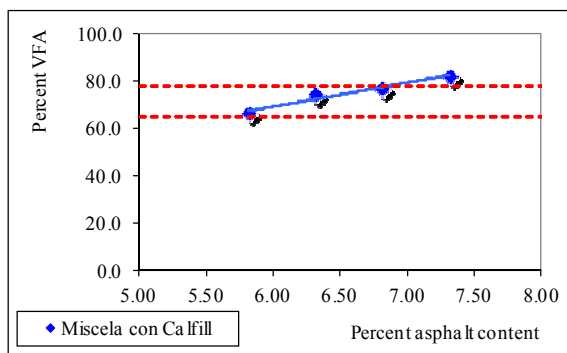
d) Percentuale di vuoti nel conglomerato bituminoso in funzione del contenuto di legante (miscela con filler Omya);



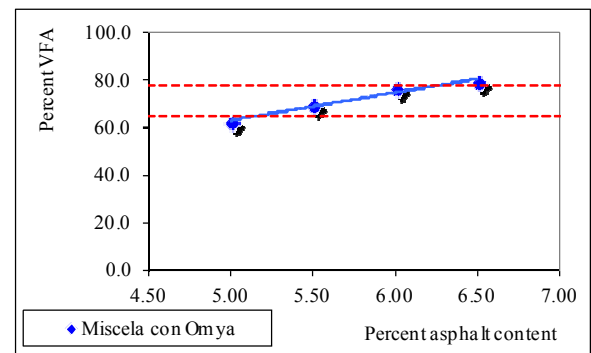
b) Percentuale di vuoti nella miscela di aggregati in funzione del contenuto di legante per la miscela con Calfill



e) Percentuale di vuoti nella miscela di aggregati in funzione del contenuto di legante per la miscela con Omya



c) Percentuale di vuoti riempiti di bitume in funzione del contenuto di legante per la miscela con Calfi



f) Percentuale di vuoti riempiti di bitume in funzione del contenuto di legante per la miscela con Omya

Fig. 14 - I risultati del mix design per i tipi di filler

Dai risultati ottenuti si può osservare che la miscela con Calfill richiede circa il 6,65% di legante sul peso della miscela per avere un contenuto di vuoti pari al 4% a  $N_{des}$  (figura 14 a), mentre la miscela con Omya richiede circa il 5,80% di legante sul peso della miscela a parità di addensamento (figura 14 d).

Si può quindi affermare che l'impiego di filler Omya consente di ottenere miscele con un contenuto di vuoti pari al 4% a  $N_{des}$  utilizzando un quantitativo minore di legante.

Sulla base delle prove eseguite è stata adottata la miscela costituita da aggregati grossi di **porfido grigio, sabbia calcarea** e filler di tipo **Omya**. Il dosaggio del legante trasparente (**Kromatis**) è stato assunto del **6,00% sul peso** degli aggregati (5,66% sul peso della miscela). Tale percentuale di

legante risulta leggermente inferiore a quella relativa a un contenuto di vuoti pari al 4% a  $N_{des}$ , ma è stata considerata adeguata per soddisfare i requisiti meccanici in termini di modulo di rigidezza e di resistenza a rottura in configurazione di trazione indiretta. Il dosaggio del pigmento (**TiO<sub>2</sub>**) di colore bianco è stato assunto pari allo **0,5% del peso** degli aggregati.

Nella successiva tabella 11 sono riassunti i dosaggi di tutti i componenti della miscela adottata.

d [mm]	vagli	Granulometrie singole frazioni				Curva miscela
		Porfido 6/12 G <sub>c</sub> 90/20	Porfido 4/8 G <sub>c</sub> 85/35	Sabbia calc. * 0/4 G <sub>f</sub> 85	Filler Omya	
16	setaccio	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
12,5	setaccio	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
9,5	setaccio	76,4	99,6	100,0	100,0	<b>92,8</b>
8	setaccio	50,2	96,8	100,0	100,0	<b>84,6</b>
6,3	setaccio	15,3	74,8	100,0	100,0	<b>70,6</b>
4,75	setaccio	3,5	40,9	100,0	100,0	<b>61,6</b>
4	setaccio	1,0	21,8	98,6	100,0	<b>57,2</b>
2	setaccio	0,1	1,1	64,6	100,0	<b>39,0</b>
1	setaccio	0,1	0,3	38,1	100,0	<b>27,4</b>
0,5	setaccio	0,1	0,3	23,3	100,0	<b>21,1</b>
0,25	setaccio	0,1	0,3	15,2	98,6	<b>17,5</b>
0,125	setaccio	0,1	0,3	11,2	90,2	<b>14,8</b>
0,063	setaccio	0,1	0,2	9,3	77,6	<b>12,7</b>
<b>% di impiego in peso</b>		<b>30%</b>	<b>16%</b>	<b>43%</b>	<b>10,5% + 0,5% TiO<sub>2</sub></b>	
<b>% di legante</b>		<b>6% sul peso degli aggregati</b>				

**Tabella 11 - Riepilogo dei componenti della miscela di progetto**

## 23-17 Il mix design del conglomerato bituminoso poroso

Per individuare la miscela degli aggregati si è fatto riferimento al fuso granulometrico normalmente utilizzato per i tappeti drenanti. Non avendo però il problema di garantire, come per il drenante, caratteristiche meccaniche consistenti a fronte di una porosità elevata, in quanto la miscela viene successivamente saturata con malta cementizia,

caratteristiche meccaniche (Los Angeles, CLA), sia perché sono stati già individuati per le pavimentazioni con legante trasparente. L'impiego degli stessi aggregati ha consentito poi di confrontare (nel breve e nel lungo periodo) le caratteristiche di luminanza di due tappeti chiari di concezione notevolmente diversa: uno con legante trasparente l'altro con malta cementizia.

MISCELA TAPPETO POROSO							
APERTURA		Bitum 6/16	Bitum 6/12	Bitum 4/8	Sabbia calc.	filler	Porfido
d [mm]	vagli	G <sub>c</sub> 90/10	G <sub>c</sub> 90/10	G <sub>c</sub> 85/35	0/4 G <sub>f</sub> 85		grigio
20	setaccio	99,5	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>99,8</b>
16	setaccio	98,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>99,1</b>
14	setaccio	87,4	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>94,3</b>
12,5	setaccio	69,9	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>86,5</b>
9,5	setaccio	51,3	76,4	99,6	100,0	100,0	<b>67,4</b>
8	setaccio	32,7	50,2	96,8	100,0	100,0	<b>47,3</b>
6,3	setaccio	0,3	15,3	74,8	100,0	100,0	<b>17,0</b>
4,75	setaccio	0,3	3,5	40,9	100,0	100,0	<b>11,7</b>
4	setaccio	0,1	1,0	21,8	98,6	100,0	<b>10,4</b>
2	setaccio	0,0	0,1	1,1	64,6	100,0	<b>7,6</b>
1	setaccio	0,0	0,1	0,3	38,1	100,0	<b>5,7</b>
0,5	setaccio	0,0	0,1	0,3	23,3	100,0	<b>4,7</b>
0,25	setaccio	0,0	0,1	0,3	15,2	98,6	<b>4,1</b>
0,125	setaccio	0,0	0,1	0,3	11,2	90,2	<b>3,5</b>
0,075	setaccio	0,0	0,1	0,2	9,3	77,6	<b>3,0</b>
fondo (<0,063)		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>0,0</b>
% di impiego in peso		45	45	0	7	3	-
% di bitume su inerti		4,5 %					

Tabella 12 - Miscela del tappeto drenante

volendo al contrario ottenere una porosità molto elevata per favorire l'assorbimento della malta, sono state ulteriormente (rispetto al drenante) ridotte le percentuali di sabbia e di filler.

Gli aggregati sono stati scelti tra il porfido grigio, sia perché associano alla colorazione chiara ottime

Come legante bituminoso è stato previsto l'impiego di bitume modificato di tipo hard.

La composizione della miscela di aggregati ed il dosaggio del legante sono riportati nella tabella 12. La curva granulometrica con il fuso di riferimento (usura drenante) sono riportati in figura 15.

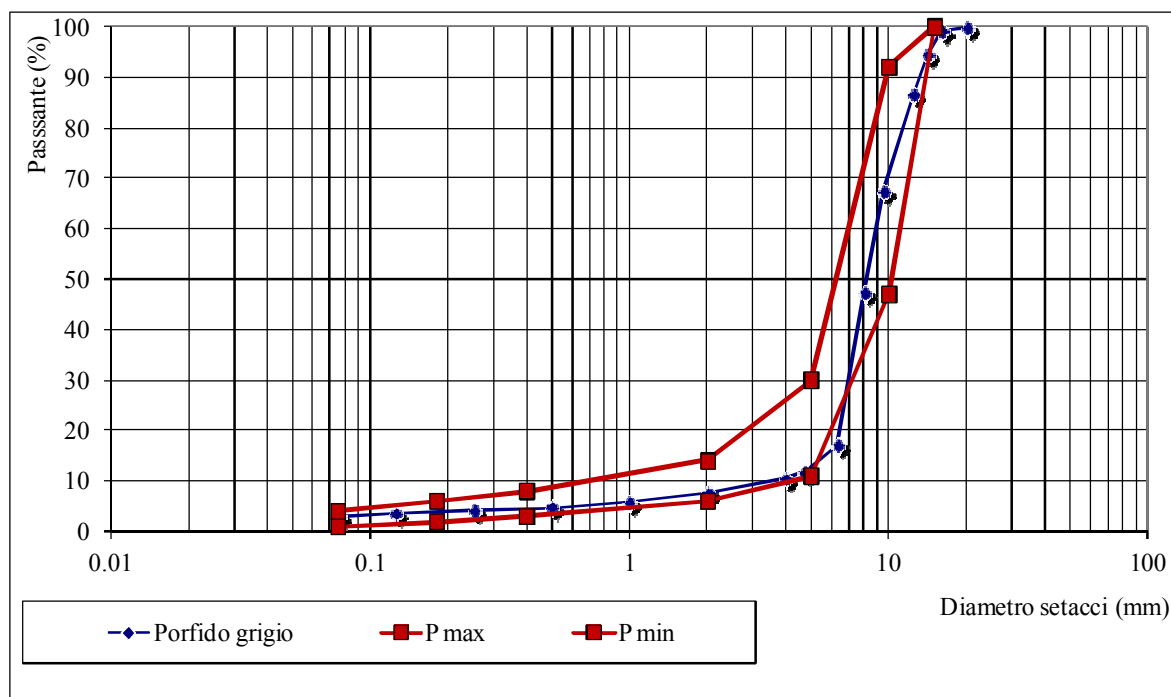


Fig. 15 - Curva granulometrica del tappeto poroso

## 23-18 La malta cementizia per l'intasamento

Il prodotto utilizzato per l'intasamento è un microlegante cementizio modificato con polimeri e formulato con fumo di silice ed opportuni additivi superfluidificanti, viscodepressori, anti essudazione ed antidilavanti.

Le principali caratteristiche della malta sono:

- elevata resistenza meccanica
- ottima fluidità
- assenza di segregazione
- ridotta presenza di cloruri solubili
- resistenza all'acqua, ai sali antigelo, ai carburanti, ai solfati e ai cloruri
- bassissima reattività agli alcali
- espansione igrometrica compensata

La monoliticità del massetto risultante, per post-espansione allo scheletro bituminoso, garantisce una elevata compattezza, resistenza allo sforzo di taglio dei pneumatici e resistenza all'abrasione per una eccellente durabilità dell'opera.

## 24-10 Realizzazione delle pavimentazioni chiare in Alto Adige

## 24-11 Galleria utilizzata per la sperimentazione

La Provincia Autonoma di Bolzano ha scelto per la sperimentazione la galleria di Narano 238G02 (comune di Tesimo frazione di Narano, dal km 26+290 fino a 26+460 della SS 238 delle Palade). Si tratta di una galleria lunga circa 174 metri con la particolare caratteristica di avere un'apertura a cielo aperto verso la sua metà che la divide in due tratte denominate nel seguito come galleria **Narano 1** (tratto più a monte in direzione Passo Palade) e galleria **Narano 2** (tratto più a valle in direzione Merano).

Nella galleria Narano 1 è stato steso il tappeto con legante trasparente nella notte tra il 4 ed il 5 luglio 2012. Nella galleria Narano 2 è stato realizzato il tappeto drenante intasato con malta cementizia di colore bianco nelle notti del 1 e del 2 luglio 2013.

Le due diverse pavimentazioni sono state poste in opera a distanza di un anno perché sulla galleria Narano 2 si è dovuta attendere l'ultimazione dei lavori di modifica dell'imbocco (ampliamento del raggio della curva).



Fig. 16 - Stesa a tutta larghezza – galleria di Narano 1

Il medesimo conglomerato con legante trasparente impiegato per la galleria Narano 1 è stato steso negli stessi giorni anche nella galleria n. 6 di Moso in Passaria (km 13+000 della SS 44bis del Passo Rombo). Poiché l'approvvigionamento del legante da una raffineria francese ha obbligato all'acquisto di un quantitativo minimo ben superiore a quello necessario per la sperimentazione. Si è pertanto deciso di pavimentare con lo stesso materiale anche quest'ultima galleria. Il che ha permesso di riscontrare i risultati delle prove ottenuti sulla galleria di Narano 1.



Fig. 17 - Scarico della miscela nella tramoggia della finitrice – galleria di Narano 1

## 24-12 Pavimentazione con legante trasparente

La produzione della miscela con legante trasparente e la sua posa in opera è documentata nel capitolo 14-11 del manuale. Si tratta di una miscela con legante “Kromatis” della TOTAL a cui è stato aggiunto il biossido di titanio nella quantità corrispondente allo 0,5% della miscela di aggregati. Per l’aggregato grosso (> 4,0 mm) è stato scelto il Porfido Grigio, uno dei materiali più chiari reperibili in Alto Adige. La temperatura della miscela all’impianto è stata impostata a 180 °C in modo da avere alla stesa circa 160 °C.



Fig. 19 - Stesa della malta

## 24-13 Il tappeto drenante intasato

La seconda tipologia di pavimentazione, il tappeto drenante intasato con malta cementizia, è stata posata nella galleria **Narano 2**, seconda parte della galleria 238G02 lato Merano. Le modalità di posa del tappeto poroso e la posa della malta di intasamento sono descritte nel capitolo 14-11 del manuale.

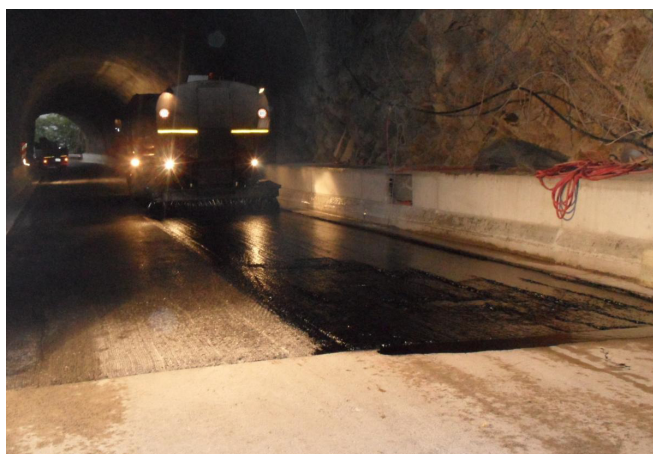


Fig. 18 - Stesa mano d’attacco

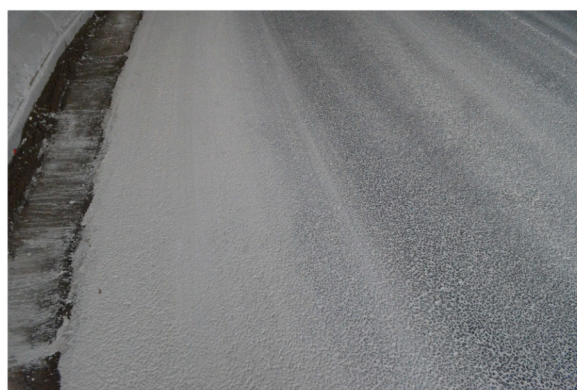


Fig. 20 - Malta superficiale rimossa dalle ruote dei veicoli

## 24-14 Pallinatura delle due pavimentazioni di Narano

Il 12 luglio 2013 sono state eseguite prove di aderenza mediante skid tester che hanno fornito valori elevati di BPN per la galleria Narano 2 (tappeto intasato) e valori molto bassi nella corsia in direzione Palade della galleria Narano 1 (tappeto con legante trasparente realizzato nel 2012).

Il forte calo dell'aderenza nella corsia in direzione Palade della Narano 1 è stato attribuito ai lavori eseguiti nella seconda galleria, in particolare al fatto che la malta di intasamento, rimasta in condizioni plastiche per molte ore (anche dopo la riapertura della strada al traffico) sia stata rimossa dalle ruote dei veicoli in transito e depositata nel tratto di pavimentazione immediatamente successivo. Tale circostanza ben percepibile a vista è stata anche avvalorata dal fatto che nella galleria di Moso in Passiria non sono stati rilevati decadimenti significativi dei valori di BPN.

Allo scopo di eliminare una situazione potenzialmente pericolosa si è deciso di procedere alla "pulizia" del tappeto della galleria Narano 1 mediante "pallinatura".



**Fig. 21** - Pavimentazione con legante trasparente – In primo piano la zona non trattata

Il giorno 5 settembre è stato eseguito il trattamento sulla prima galleria, con esclusione di un breve tratto all'aperto, dove le condizioni di aderenza erano soddisfacenti, appositamente lasciato per poter valutare l'evoluzione naturale dello spogliamento e dei conseguenti valori di luminanza (figura 21).

Nelle figure 22 e 23 sono riportate in dettaglio le differenze tra le zone trattate e non trattate con pallinatura.

La pavimentazione della galleria Narano 2, realizzata il 2 luglio 2013 con un tappeto drenante intasato con malta cementizia bianca, si presentava con diverse tonalità di colore in relazione alla maggiore o minore quantità di malta rimossa dalla superficie stradale dai veicoli in transito (figura 24).



**Fig. 22** - Differenza tra prima e dopo il trattamento



**Fig. 23** - Dettaglio



**Fig. 24** - Pavimentazione intasata con malta cementizia il 5 settembre 2013

Questo stato di fatto non consentiva una percezione nitida della carreggiata stradale. Inoltre lo spogliamento (perdita di malta e di bitume) sarebbe potuto avvenire nel breve periodo in modo selettivo (più consistente in corrispondenza del passaggio delle ruote dei veicoli), evidenziando ulteriormente le diverse

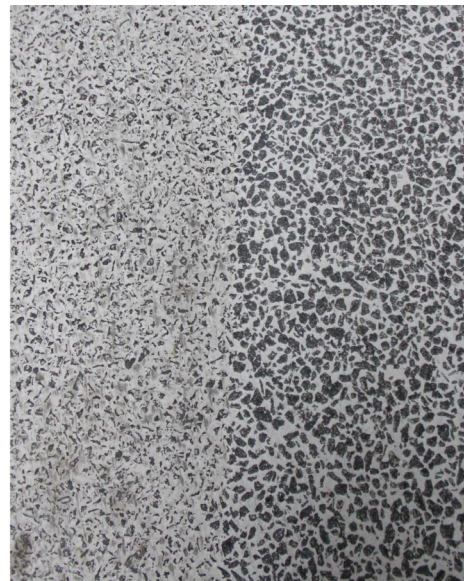
colorazioni tra una zona e l'altra della piattaforma stradale, si è pertanto proceduto, visto la disponibilità in loco delle attrezzature alla "pallinatura" anche della pavimentazione della Narano 2 (fig. 25, 26 e 27).



**Fig. 25 - Esecuzione della "pallinatura" nella seconda galleria**



**Fig. 26 - Differenza tra prima e dopo il trattamento**



**Fig. 27 - Dettaglio**

## 24-21 Realizzazione degli interventi galleria Seehoftunnel, B 181 Achenseestraße

## 24-22 Inquadramento geografico

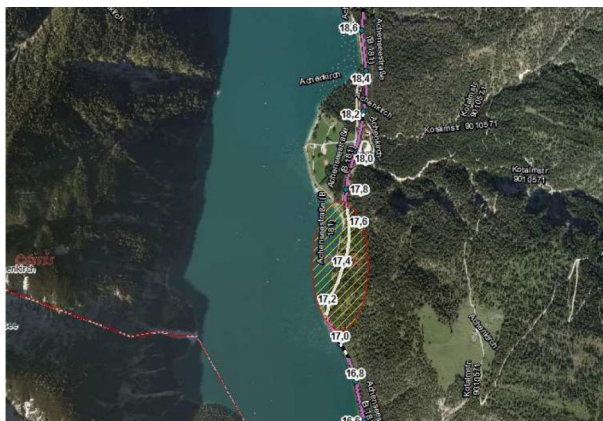


Fig. 28 - Ubicazione Galleria Seehoftunnel

## 24-23 Presentazione

La galleria Seehoftunnel è ubicata al km 17,0 sulla strada B181 Achenseestraße. Nell'ambito del risanamento la galleria è stata rivestita con un materiale innovativo composto da stucco bianco, con una nuova pavimentazione stradale (pavimentazione semiflessibile con aggregati chiari) e con un'illuminazione a LED orientata al futuro.

I provvedimenti di risanamento sono stati eseguiti negli anni 2012 e 2013.

## 24-24 Rivestimenti: Rivestimento dei piedritti con stucco bianco a spruzzo

La preparazione della superficie è stata eseguita fino ad un'altezza di 2 m con il metodo dell'

idroasportazione di 3 cm e la messa in opera di malta cementizia tradizionale. Dai 2m ai 4m il fondo è stato idroasportato per uno spessore di alcuni mm. Su tutta la superficie è stata spruzzata la massa innovativa a base di stucco bianco. Sono stati posti in opera due strati, il secondo dei quali è stato rasato. La superficie così lavorata permette di rinunciare ad ulteriori, costosi strati di verniciatura.



Fig. 29 - Galleria Seehoftunnel: Rivestimento delle pareti – posa in opera della malta cementizia

## 24-25 Pavimentazione stradale

### 24-25.a Generalità

I giacimenti rocciosi naturali del Tirolo sono caratterizzati da buone proprietà fotometriche ma da valori di CLA mediocri oppure da buoni valori di CLA e mediocri proprietà fotometriche. Esistono però delle rocce che possiedono entrambi i requisiti. Queste affiorano nel territorio a nord, presso i vicini settentrionali e sono ad esempio la Quarzite di Taunus.

Gli aggregati chiari vengono introdotti nel conglomerato bituminoso e trasportati in cantiere. La posa in opera viene eseguita tramite macchina finitrice tradizionale. Solo dopo che la pellicola bituminosa superficiale si è consumata sotto l'azione del traffico, delle condizioni meteorologiche, la luce UV e il servizio invernale, viene a luce l'aggregato che conferisce la caratteristica chiara alla pavimentazione. Questo processo "di invecchiamento" può essere accelerato tramite la pallinatura con sfere d'acciaio oppure corindone.

### 24-25.b Descrizione

Nell'ambito del presente progetto sono stati sostituiti circa 560m della vecchia pavimentazione con una nuova pavimentazione chiara ed innovativa.

Partendo dal portale settentrionale (**Achenkirch**) sono state poste in opera le seguenti tecnologie.

#### Tratte:

- **100ml, 5cm di tappeto d'usura semirigido intasato con malta cementizia**  
(Pos 16.2930C) PA11 PmB45/80-65,P4,G1, 5cm

- **200ml, 3cm di SMA11 tappeto d'usura con aggregati chiari reperibili in Regione - Ötztal (Ötztaler Granit)**  
(POS 16.2645A) SMA11 PmB45/80-65,S2,G1, 3cm Fahr/Abst
- **100ml, 3cm di SMA8 tappeto d'usura con aggregati chiari provenienti dalla Germania (Taunusquarzit)**  
(POS SMA8) PmB45/80-65,S2,G1, 3cm Fahr/Abst
- **160ml, 3cm di SMA11 con aggregati chiari reperibili in Regione - Ötztal (Ötztaler Granit)**  
(POS 16.2645A) SMA11 PmB45/80-65,S2,G1, 3cm Fahr/Abst

### 24-25.c Pavimentazione semiflessibile

Il normale campo d'applicazione delle pavimentazioni semiflessibili sono superfici sottoposte a carichi pesanti continui, come depositi, fermate dell'autobus, incroci, ecc. Durante la posa in opera si intasa un conglomerato bituminoso con elevato contenuto di vuoti, con una malta cementizia superfluida ad alta viscosità.



**Fig. 30** - Galleria Seehoftunnel: pavimentazione semirigida – posa in opera della malta cementizia fluida ed alta viscosità

Nella galleria di Seehof la pavimentazione semirigida è stata posta in opera su una pavimentazione in calcestruzzo preesistente.

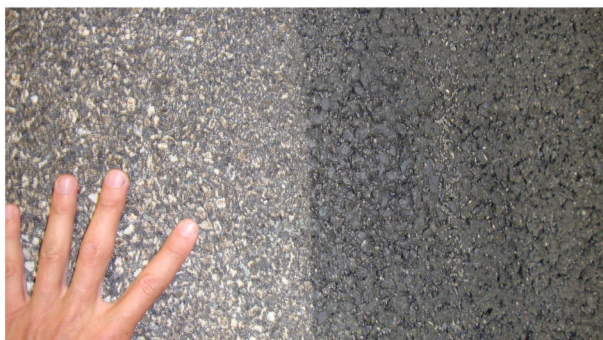
Inizialmente la superficie è stata pulita con getti d'acqua ad alta pressione, successivamente è stato posato uno strato di SAMI e di seguito il conglomerato bituminoso. La posa in opera del conglomerato aperto di 5cm è stata eseguita mediante macchina vibrofinitrice. Di seguito i vuoti sono stati intasati con una malta cementizia fluida ad alta viscosità. La posa della malta è avvenuta con l'ausilio di spatole di gomma.

## 24-25.d Tappeto d'usura con aggregati chiari

a. aggregati chiari Granito di Ötztaler

b. aggregati chiari Quarzite di Taunus della ditta Cemex

I tratti descritti in precedenza sono stati eseguiti in parte con il Granito di Ötztal della omonima valle e in parte con la Quarzite di Taunus della ditta Cemex di Heuchelheim (D). Gli aggregati utilizzati corrispondono alla classe granulometrica 5/8.



**Fig. 31** - Galleria Seehoftunnel: Tappeto con aggregati chiari, invecchiamento artificiale (pallinato) e tal quale

Prima della stesa sono stati eseguite la determinazione del coefficiente di levigabilità accelerata (CLA) e le prove di frammentazione (LA).

Contemporaneamente sono stati richiesti i valori di luminanza della Quarzite di Taunus.

Gli aggregati chiari hanno raggiunto e in parte superato i requisiti richiesti del servizio stradale del Tirolo (Tiroler Landesstraßenverwaltung).

Dopo la stesa è stata effettuata l'operazione di pallinatura nella zona di collegamento tra il Granito di Ötztal e la Quarzite di Taunus per una lunghezza di circa 50m. Questa asportazione artificiale esalta la presenza degli aggregati chiari, e diminuisce in modo poco incisivo la vita utile del tappeto d'usura.

## 24-26 Illuminazione

L'illuminazione delle gallerie stradali è una componente essenziale dell'impianto di allestimento e di sicurezza e incide in modo incisivo sull'analisi del rischio.

La scelta del tipo di illuminazione è caduta sul sistema con lampade a LED grazie alle maggiori possibilità di controllo del livello di illuminazione. Appositi misuratori di luminanza sono stati installati a una distanza di 65m dal portale d'ingresso. Grazie ad essi vengono forniti in tempo reale i valori di luminanza nella zona adiacente al portale d'ingresso e nella zona d'entrata.

Questi valori vengono confrontati con un luminanzimetro ubicato all'interno della galleria e servono alla regolazione diretta dell'illuminazione nella zona di entrata e di transizione, e indiretta dell'illuminazione della zona interna della galleria.



**Fig. 32** - Galleria Seehoftunnel: portale sud

Confrontando la tecnologia LED con gli impianti tradizionali, il grado di illuminazione in relazione alla spesa d'energia risulta essere eccezionale. Non richiede lunghi tempi di accensione delle lampade, la regolazione della luminanza può essere ridotta fino a quasi 5 percento e la luce garantisce ai 4500 Kelvin impiegati, una buona

resa e regala all'utente un elevato grado soggettivo di sicurezza.

Inoltre sono stati installati sulla corsia laterale rialzata, degli elementi LED autoilluminanti come elementi guida. Nella zona d'ingresso sono stati usati elementi di guida speciali sotto pavimento che resistono anche alle macchine spazzaneve più pesanti del servizio invernale.

Per questo impianto è stato possibile di collocare gli elementi attivi dell'illuminazione e gli elementi guida all'interno della stazione operativa. Il grosso vantaggio consiste che in caso di misurazione, di manutenzione degli elementi guida o di interferenze, non è necessaria una chiusura immediata della galleria.



**Fig. 33** - Galleria Seehoftunnel: illuminazione LED nelle zone di entrata e all'interno della galleria e elementi guida sulla corsia laterale

## 24-31 Realizzazione rivestimento galleria Rattenberg, B 171 Tiroler Straße

L'illuminazione è un elemento principale dell'impianto di esercizio e di sicurezza di una galleria stradale ed incide in modo significativo sull'analisi del rischio.

## 24-32 Inquadramento geografico

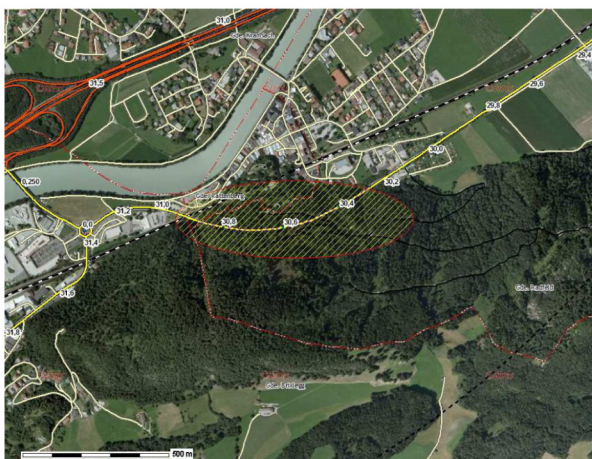


Fig. 34 - Ubicazione Galleria Rattenberg

## 24-33 Presentazione

La galleria Rattenberg sulla B171 Tiroler Straße al km 30,59 fu costruita negli anni 1994 -1996, per il decongestionare dal traffico la cittadina di Rattenberg.

La lunghezza complessiva è di 624m. Le sezioni trasversali sono state eseguite a volte.

Da Est ad Ovest la galleria si divide nelle tratte seguenti:

- **20m galleria finestrata**
- **12m tratto a cielo aperto**

- **584m galleria**
- **8m tratto a cielo aperto**

I piedritti di calcestruzzo della galleria sono rivestiti fino ad un' altezza di 4m. L'ingresso della galleria ad est non ha rivestimento. Il rivestimento esistente consiste in una malta fino ad un'altezza di circa 2m. Da 2 a 4m le cavità e i vuoti sono stati rivestiti puntualmente.

## 24-34 Rapporto di prova

Prima dell'intervento uno studio di ingegneria di Oberösterreich è stato incaricato con l'analisi dello stato attuale delle pareti nella galleria Rattenberg. Dalla relazione risulta che, per motivi di sicurezza, l'intero rivestimento delle pareti, fino ad un'altezza di 2m è da risanare. Sopra i 2m le pareti dovrebbero essere ricoperte con una vernice di protezione, dopo aver eseguito interventi di risanamento, dove necessario. Inoltre dal rapporto si evince che il punto debole del rivestimento è costituito dallo stucco.

## 24-35 Intervento di risanamento

L'Università di Innsbruck (AB Intelligente Verkehrssysteme) è stata incaricata nell'ambito del progetto Interreg IV – iBBT di elaborare un piano di intervento per il risanamento dei rivestimenti delle pareti in galleria.

Scopo del piano di intervento è quello di trovare una soluzione innovativa, di nuova concezione ed economicamente vantaggiosa nell'ambito dei rivestimenti.

## 24-36 Risultati & posa in opera

Come indicato nella ricerca dell'Università di Innsbruck sono state allestite sette aree aventi una lunghezza di ca. 12m, sulle quali sono stati testati diversi nuovi sistemi di rivestimento. La scelta è avvenuta in collaborazione con il servizio strade tirolese.

Per la posa in opera è stata incaricata un'impresa e la Direzione Lavori è stata affidata ad uno studio di ingegneria indipendente. Durante i lavori (di ca. due settimane) il traffico è stato regolato a senso unico alternato.

## 24-37 Osservazioni

Le superfici di prova sono sottoposte all'azione del traffico (inquinamento, agenti atmosferici, sali invernali ecc.) per un periodo di due o più anni e sottoposte ad un controllo visivo semestrale. Dopo il decorrere di questo periodo verrà scelto il miglior sistema dal punto di vista economico. A seguire l'intero rivestimento della galleria sarà eseguito con il prodotto "vincitore".



Fig. 35 - Galleria Rattenberg – Blocchi aree di prova

## 25-10 Controlli e monitoraggi delle pavimentazioni chiare in Alto Adige

Al momento della stesa delle due pavimentazioni chiare sono stati prelevati campioni di miscela sciolta e, nei giorni successivi, carote sia nella galleria di Narano che in quella di Moso in Passiria al fine di eseguire prove di controllo presso il Laboratorio Prove Materiali della Provincia Autonoma di Bolzano e presso il Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche.

Le due tipologie di pavimentazioni sono state inoltre sottoposte al monitoraggio della luminanza e dell'aderenza mediante prove di *skid tester*.

Si rimanda al capitolo 15-10 del manuale del progetto per i risultati delle prove sulla miscela sciolta e sulle carote del conglomerato con legante trasparente e delle prove fotometriche eseguite in laboratorio.

## 25-11 Misure fotometriche in sito

Le misure di luminanza sono state effettuate nei siti di stesa di Narano (1 e 2) e di Moso in Passiria. La luminanza è stata determinata come media di numerose determinazioni eseguite mediante lo stesso apparecchio (luminanzometro Konica Minolta LS-110) utilizzato per la determinazione della luminanza in laboratorio. Successivamente il confronto tra le varie pavimentazioni è stato effettuato attraverso il coefficiente di riflessione  $p$ .

Al fine di poter confrontare le caratteristiche fotometriche delle pavimentazioni in esercizio con quelle realizzate in laboratorio, la sola misurazione della luminanza risulta insufficiente poiché tale

grandezza, che esprime la quantità di luce riflessa da una superficie, dipende da un'altra proprietà fotometrica denominata illuminamento, che rappresenta la quantità di luce che investe una superficie. Di conseguenza è stato necessario determinare, mediante un apposito luxmetro, il valore di illuminamento in ogni punto di misura, sia in sito che in laboratorio.

Successivamente il confronto tra le varie pavimentazioni è stato effettuato attraverso il coefficiente di riflessione definito in precedenza.

## 25-12 Pavimentazione con legante trasparente

Nelle tabelle 13 e 14 sono riportati i valori del coefficiente di riflessione  $p$  della pavimentazione con legante trasparente rispettivamente per le pavimentazioni delle gallerie Narano 1 e Moso in Passiria determinate nel 2012. Le misurazioni sono state effettuate in punti casuali della pavimentazione in corrispondenza degli ingressi, della parte centrale. Inoltre sono state effettuate delle misure nei punti critici della superficie stradale in cui sono state individuate tracce di pneumatici dei veicoli oppure delle macchie di forma circolare (di diametro variabile tra 10 e 15 cm) più scure.

Ingresso lato Palade	Interno galleria	Interno galleria	Ingresso lato Merano	Pavimentazione macchiata
$\rho = 0,157$	$\rho = 0,129$	$\rho = 0,117$	$\rho = 0,189$	$\rho = 0,056$

**Tabella 13** - Risultati delle prove in sito 2012 – galleria di Narano 1

Interno galleria	Interno galleria	Ingresso sud	Ingresso nord	Interno galleria pavimentazione bagnata	Interno galleria traccia pneumatico
$\rho = 0,114$	$\rho = 0,167$	$\rho = 0,149$	$\rho = 0,117$	$\rho = 0,175$	$\rho = 0,117$

**Tabella 14** - Risultati delle prove in sito 2012 – galleria di Moso in Passiria

### 25-13 Tappeto drenante intasato con malta cementizia

Analogamente a quanto fatto per il tappeto con legante trasparente sono stati rilevati i valori di luminanza, illuminamento e coefficiente di riflessione per il tappeto drenante intasato della galleria Narano 2.

Osservando i risultati riportati in tabella 3 è possibile affermare che il tappeto drenante intasato – non pallinato – garantisce proprietà fotometriche nettamente superiori rispetto alla pavimentazione con legante chiaro, in virtù della colorazione bianca della malta cementizia. L'operazione di "pallinatura" determina per il

tappeto intasato una diminuzione della capacità riflettente, dovuta alla rimozione della pellicola di malta bianca dalla superficie degli aggregati più grossi e all'affioramento degli inerti grigi (porfido grigio) ancora parzialmente ricoperti di bitume. Comunque, anche dopo il trattamento superficiale, le proprietà fotometriche del tappeto drenante intasato sono risultate superiori rispetto sia in conglomerato bituminoso con legante trasparente dell'adiacente galleria, sia alla miscela "nera" di riferimento.

## 25-14 Pavimentazione in calcestruzzo nella galleria di Laives

Nel mese di dicembre 2013 sono stati ultimati i lavori ed è stata aperta al traffico la nuova galleria di Laives (Comune alla periferia sud di Bolzano) con una pavimentazione in calcestruzzo.

Trattandosi di una delle prime pavimentazioni in

calcestruzzo realizzate in Italia, peraltro in una zona molto vicina alle gallerie di Narano, si è ritenuto opportuno cogliere l'occasione per il confronto delle proprietà fotometriche delle due pavimentazioni chiare realizzate nelle gallerie di Narano con quelle della pavimentazione in calcestruzzo di Laives.

Periodo prove	Posizione	Illuminamento E [Lux]	Luminanza L [cd/m <sup>2</sup> ]	Coefficiente di riflessione ρ [-]
Giugno 2013	Narano 1 - non pallinata – dir. Merano	275.3	22.60	0.258
Giugno 2013	Narano 1 - non pallinata – dir. Merano	15.66	1.161	0.233
Giugno 2013	Narano 1 - non pallinata – dir. Palade	95.70	6.268	0.206
Giugno 2013	Moso in Passiria – non pallinata	45.1	2.35	0.164
Giugno 2013	Moso in Passiria – non pallinata	52.9	2.790	0.166
Dic. 2013	Narano 1 - non pallinata – dir. Merano	1447.7	44.03	0.096
Dic. 2013	Narano 1 - non pallinata – dir. Palade	1339.3	78.556	0.184
Dic. 2013	Narano 1 - pallinata – dir. Merano	265.5	12.31	0.146
Dic. 2013	Narano 1 - pallinata – dir. Palade	817.8	31.65	0.122
Dic. 2013	Narano 2 - non pallinata – dir. Palade	758.2	59.52	0.247
Dic. 2013	Narano 2 - pallinata – dir. Merano	752.5	41.86	0.175
Dic. 2013	Narano 2 - pallinata – dir. Palade	156.0	8.27	0.166
Dic. 2013	Laives – direzione sud	262.2	15.98	0.191
Dic. 2013	Laives – direzione nord	421.8	27.64	0.206
Luglio 2014	Narano 1 - pallinata – dir. Merano	280.0	21.13	0.237
Luglio 2014	Narano 1 - pallinata – dir. Merano	637.5	40.86	0.201
Luglio 2014	Narano 2 - pallinata – dir. Merano	296.3	24.15	0.256
Luglio 2014	Narano 2 - pallinata – dir. Merano	745.8	52.410	0.221
Luglio 2014	Laives – direzione sud	1803.3	64.92	0.113
Luglio 2014	Laives – direzione nord	1665.0	53.76	0.101

Tabella 15 - Valori di luminanza rilevati in tempi diversi

Osservando l'insieme dei risultati ottenuti nelle diverse misurazioni (tabella 15) è possibile rilevare che:

- la pavimentazione con legante trasparente dopo una prima diminuzione della luminanza, a luglio 2014 è tornata sui valori iniziali;
- la pavimentazione con drenante intasato con malta cementizia (Narano 2), dopo una diminuzione della luminanza a seguito della pallinatura è migliorata arrivando agli stessi valori della Narano 1;
- la pavimentazione in calcestruzzo di Laives, a seguito dell'apertura al traffico, ha quasi dimezzato il valore della luminanza;

- tutte le pavimentazioni analizzate hanno valori nettamente superiori ad una tradizionale pavimentazione "nera" nei primi anni di esercizio.

Tali risultati sono ancora in fase di evoluzione in quanto il processo di spogliamento del legante causato dal traffico non è ancora completato, neanche dove è stata eseguita la pallinatura.

Nella figura 36 è riportata, in forma grafica, l'evoluzione del coefficiente di riflessione nella galleria Narano 1, in riferimento ad una tradizionale pavimentazione "nera".

Nella figura 37 vengono poste a confronto le varie tipologie di pavimentazione analizzate

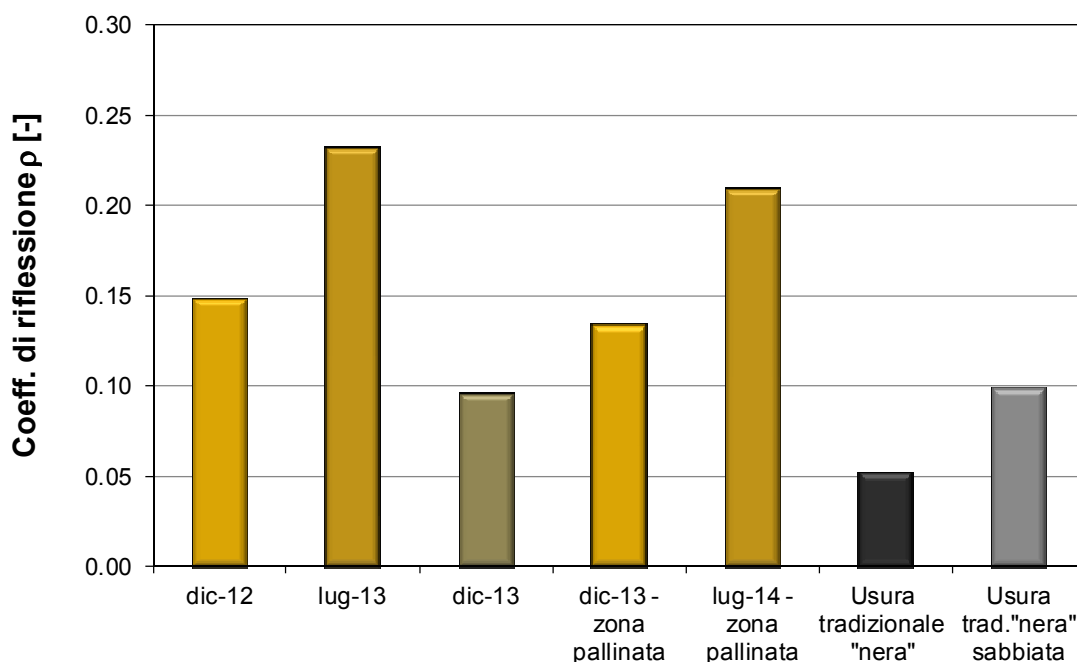


Fig. 36 - Evoluzione delle proprietà fotometriche nel tempo - Galleria di Narano 1

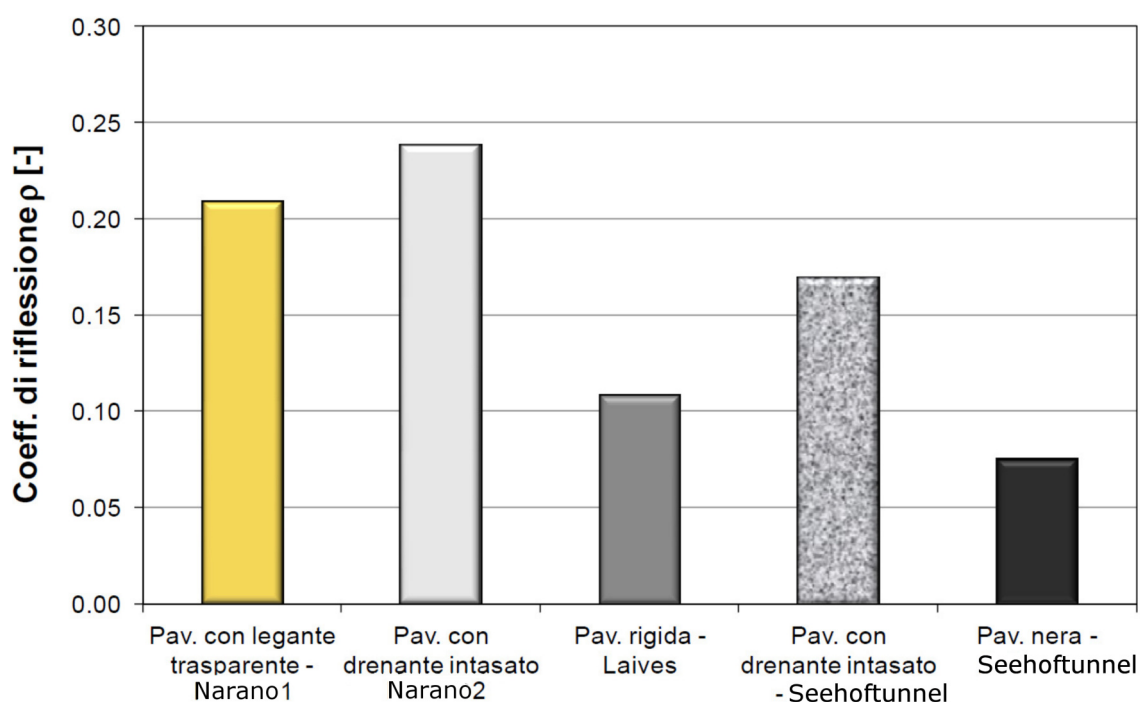


Fig. 37 - Confronto delle proprietà fotometriche delle pavimentazione analizzate (misure luglio 2014)

## 25-15 Controllo dell'aderenza

Sulle pavimentazioni chiare realizzate con legante trasparente (gallerie Narano 1 e Moso in Passiria) e con drenante intasato con malta cementizia (Narano 2) sono state periodicamente eseguite prove di *skid tester* per monitorare l'andamento delle caratteristiche di aderenza del manto di usura.

I risultati dei controlli dell'aderenza sono riportati nella tabella 16.

Il forte calo dell'aderenza del tappeto con legante trasparente (galleria Narano 1) nella corsia in direzione Palade, avvenuto nell'arco di un mese (tra il 13.6.2013 e il 12.7.2013) trova giustificazione nei lavori eseguiti il 2 luglio 2013 nella seconda galleria. Tale circostanza è stata avvalorata dal fatto che nella galleria di Moso in Passiria, nello stesso periodo, non sono stati rilevati decadimenti rilevanti dei valori di BPN.

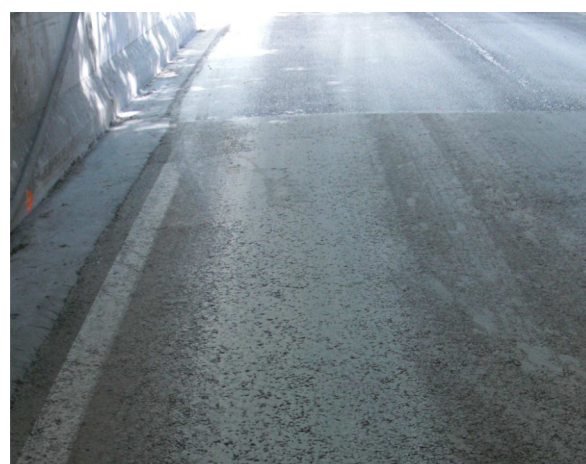
Nel corso di un sopralluogo eseguito il 31 luglio 2013 è stato possibile accertare che la corsia in direzione Palade della galleria Narano 1 (pavimentazione con legante trasparente) era stata ricoperta dalla malta impiegata per l'intasamento della seconda galleria. Tale fenomeno (ben visibile nelle figure 3 e 4) è stato attribuito al fatto che, in modo non previsto, la malta è rimasta in condizioni plastiche per molte ore, anche dopo la riapertura della strada al traffico. Pertanto le ruote dei veicoli hanno rimosso parte della malta superficiale depositandola nel tratto di pavimentazione immediatamente successiva.

Periodo	Narano 1 Direzione Palade	Narano 1 Direzione Merano	Moso in Pass. Direzione Moso	Moso in Pass. Direzione Passo Rombo	Narano 2 Direzione Palade	Narano 2 Direzione Merano
	BPN	BPN	BPN	BPN	BPN	BPN
09.07.2012	60	65	59	57		
12.07.2012	55	56	59	56		
19.07.2012	60	54				
26.07.2012	56	57	57	57		
06.09.2012	53	53	58	57		
09.10.2012	55	53				
28.11.2012	60	55				
13.06.2013	48	62	69.3	69.2		
05.07.2013						57.2
12.07.2013	41	56				57.8
31.07.2013	39	53				
05.09.2013	79	76				78
09.07.2014	60	61				64

**Tabella 16** - Evoluzione dei Valori BPN (skid resistance) nelle tre gallerie



**Fig. 38** - Giunto tra le due pavimentazioni – In primo piano la malta riportata sopra la pavimentazione



**Fig. 39** - Pavimentazione con legante trasparente ricoperta dalla malta - Corsia in direzione Palade

Meno evidente e più sporadico è lo “sporco” in direzione Merano dovuto alle operazioni di cantiere: traccia della ruota di un camion, schizzi di malta, ecc. (fig. 40)

Per eliminare la scivolosità della pavimentazione della galleria di Narano 1 si è deciso di procedere alla “pulizia” del tappeto mediante “pallinatura”.

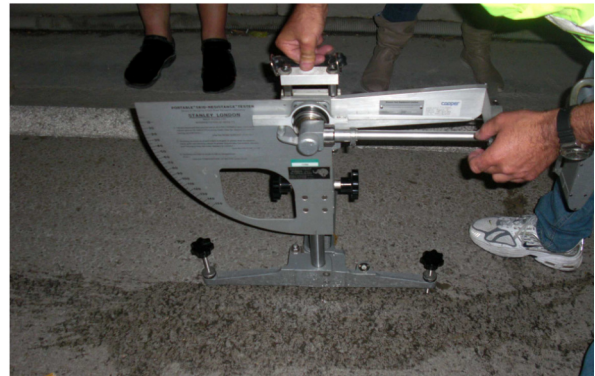
Il giorno 5 settembre 2013 è stato eseguito il trattamento nella prima galleria, con esclusione di un breve tratto all’aperto, dove le condizioni di aderenza erano soddisfacenti, appositamente lasciato per poter valutare l’evoluzione naturale dello spogliamento e dei conseguenti valori di luminanza.



**Fig. 40** - Traccia di pneumatico e schizzi sulla corsia in direzione Merano

Considerata la disponibilità in loco delle attrezzature si è ritenuto opportuno procedere alla “pallinatura” anche della pavimentazione della galleria Narano 2 al solo scopo di rendere omogenea la superficie stradale (per una migliore percezione della carreggiata da parte degli utenti)

che si presentava con diverse tonalità di colore in relazione alla maggiore o minore quantità di malta rimossa dalla superficie stradale dai veicoli in transito.



**Fig. 41** - Prove di skid resistance

I valori di BPN rilevati subito dopo la “pallinatura” (fig. 41) sono risultati molto elevati (vedere tabella 18).

## 25-20 Controlli e monitoraggi galleria Seehoftunnel, B 181 Achenseestraße

## 25-21 Pavimentazione in conglomerato bituminoso

Prima della stesa degli aggregati chiari (Quarzite di Taunus e Granito di Ötztal) sono state eseguite le prove per determinare la corrispondenza alla classe degli aggregati G1. Tutti i valori rispettavano le prescrizioni della normativa RVS 08.97.05.

La corrispondenza dei valori è stata verificata in parte dalla certificazione di un laboratorio accreditato, per il resto da prove eseguite presso il laboratorio della Landesstraßenverwaltung (servizio strade Land Tirol).

In figura 42 la tabella contenuta nelle RVS 08.97.05 indicante le prescrizioni delle classi degli aggregati.

Riferimento alla ÖNORM EN 13043:2004		Requisiti								
Parte	Criterio secondo marcatura CE	Classi aggregato e valori idonei								
		G1 <sup>a</sup>	G2 <sup>a</sup>	G3 <sup>a</sup>	G4	G5	G6	G7	G8	G9
4.1.3	Granulometria secondo ÖNORM EN 933-1	in generale le classi granulometriche 0/1, 0/2, 2/4, 2/5, 4/8,8/11, 11/16, 16/22, G <sub>C</sub> 90/15 G <sub>F</sub> 85			classi granulometriche e miscele di aggregati idonee G <sub>C</sub> 90/20, G <sub>F</sub> 85, G <sub>A</sub> 90					come G1
4.1.3.2	Granulometria secondo ÖNORM EN 933-1 per aggregati fini	G <sub>TC</sub> 20			G <sub>TC</sub> NR					come G1
4.1.4	Contenuto di fini secondo ÖNORM EN 933-1	grosso: $f_1$ fini: $f_{16}$			grosso: $f_2$ fini: $f_{NR}$					come G1
4.1.5	Qualità di fini secondo ÖNORM EN 933-9	MB <sub>F</sub> NR							MB <sub>F</sub> 10	
4.1.6	Forma particella per aggregati grossi secondo ÖNORM EN 933-4	SI <sub>15</sub>			-					SI <sub>15</sub>
	Percentuale in peso delle particelle non cubiche nella frazione $\geq 4$ mm secondo ÖNORM EN 933-4, riferito alla percentuale della frazione $\geq 4$ mm	-			$\leq 20$	$\leq 25$	$\leq 30$	$\leq 20$	$\leq 25$	-
4.1.7	Percentuale particelle frantumate dell'aggregato grosso secondo ÖNORM EN 933-5	C <sub>100/0</sub>	C <sub>90/1</sub>		-					C <sub>100/0</sub>
	Percentuale in peso delle particelle frantumate dell'aggregato grosso secondo ÖNORM EN 933-5, riferito alla percentuale $\geq 4$ mm Percentuale C <sub>c</sub> , in % Percentuale C <sub>c</sub> , in % Percentuale C <sub>fr</sub> , in %	-			$\geq 90$ $\geq 30$ $\geq 1$	$\geq 50$ - -	- - -	100 $\geq 90$ 0	$\geq 90$ $\geq 30$ $\leq 1$	$\geq 50$ - -
4.1.8	Spigolosità degli aggregati fini secondo ÖNORM EN 933-6:2002, parte 8	E <sub>C5</sub> 35			-					E <sub>C5</sub> 35
	Spigolosità degli aggregati fini inferiore a 2 mm di tutta la miscela secondo ÖNORM EN 933-6:2002, parte 8, tempo di deflusso in s	-			$\geq 35$	$\geq 30$	-	$\geq 35$	$\geq 30$	-
4.2.2	Resistenza alla frammentazione per aggregati grossi secondo ÖNORM EN 1097-2:1998, parte 5	LA <sub>20</sub>	LA <sub>25</sub>		LA <sub>30</sub>	LA <sub>40</sub>	LA <sub>25</sub>	LA <sub>30</sub>	LA <sub>20</sub>	

Fig. 42a - estratto della normativa RVS 08.97.05

Riferimento alla ÖNORM EN 13043:2004		Requisiti									
		Classe aggregato e valori idonei									
Parte	Criterio secondo marcatura CE	G1 <sup>a</sup>	G2 <sup>a</sup>	G3 <sup>a</sup>	G4	G5	G6	G7	G8	G9	GS <sup>a</sup>
4.2.3	Resistenza alla levigazione dell'aggregato grosso secondo ÖNORM EN 1097-8	PSV <sub>50</sub>	PSV <sub>44</sub>	PSV <sub>rich.</sub>	PSV <sub>NR</sub>			PSV <sub>richiesto</sub>		PSV <sub>50</sub>	
4.2.9.2	Resistenza al gelo e disgelo della classe 8/16 secondo ÖNORM EN 1367-1 <sup>b</sup>	F <sub>1</sub>			F <sub>2</sub>					F <sub>1</sub>	
4.2.10	Resistenza allo shock termico secondo ÖNORM EN 1367-5	non richiesto									
4.2.11	Affinità dell'aggregato grosso ai leganti bituminosi secondo ÖNORM EN 12697-11:2007, Metodo B, a 40°C; Bitume di riferimento: bitume tradizionale 70/100	numero degli aggregati non coperti: da dichiarare grado di copertura: da dichiarare <sup>c</sup>									
	Affinità dell'aggregato grosso ai leganti bituminosi secondo ÖNORM EN 12697-11:2007, Metodo B, a 40°C; Bitume di riferimento: legante secondo controllo primario	numero degli aggregati non coperti: da dichiarare grado di copertura: ≥ 80% <sup>c</sup>									
4.2.12	"Sonnenbrand" del basalto secondo ÖNORM EN 1367-3	SB <sub>LA</sub>									
4.3.4.3	Stabilità di volume di loppe d'acciaieria secondo ÖNORM EN 1744-1	V <sub>3,5</sub>			V <sub>6,5</sub>					V <sub>3,5</sub>	
<b>Senza riferimento alla ÖNORM EN 13043</b>											
-	Resistenza alla levigabilità di aggregati fini (PSW), secondo RVS 11.06.23 <sup>c</sup>	-									≥ 0,50

<sup>a</sup> Gli aggregati fini sono da reperire da una fonte di riferimento, gli aggregati grossi raggiungono un valore di LA<sub>20</sub> per G1 e GS così come LA<sub>25</sub> per G2 e G3.

<sup>b</sup> Per WA<sub>24</sub> 1 il valore di F<sub>1</sub> è soddisfatto, per WA<sub>24</sub> 2 F<sub>2</sub>. L'assorbimento dell'acqua secondo ÖNORM EN 1097-6 è da determinare sulle particelle >32 mm. Nel caso di assenza delle particelle >32 mm, l'assorbimento dell'acqua è da determinare sulla granulometria maggiore reperibile

<sup>c</sup> Nell'ambito della marcatura CE in modo volontario

Fig. 42b - estratto della normativa RVS 08.97.05

Il coefficiente di luminanza  $q_0$  dell'aggregato chiaro (Quarzite di Taunus) all'asciutto è risultato pari a 0,132 cd/(m<sup>2</sup> lx) (attestato di prova). Il valore minimo indicato nelle prescrizioni è pari a: 0,10 cd/(m<sup>2</sup> lx): la prescrizione è da considerarsi rispettata.

La prova di aderenza è stata eseguita con uno strumento portatile (pendolo). Le pavimentazioni in conglomerato bituminoso con aggregati chiari hanno raggiunto i valori prescritti di 55 SRT (BPN). Sulla pavimentazione semiflessibile (drenante intasato) è stato raggiunto un valore insufficiente pari a 38-42 SRT (BPN). E' stato eseguito su questo tratto un'idrolavaggio ad alta pressione, per rimuovere la malta cementizia superficiale, e l'aderenza ha raggiunto i valori prescritti di PTV 55 SRT (BPN).

## 25-22 Rivestimento delle pareti in galleria

Prima della posa in opera del rivestimento la superficie in calcestruzzo è stata trattata secondo le prescrizioni della scheda tecnica "sistemi di verniciatura di gallerie" dell'unione austriaca per calcestruzzi e tecnica edile. Questa scheda prevede la determinazione dell'adesione e la misurazione della rugosità della superficie del calcestruzzo. Inoltre sono stati eseguiti dei carotaggi per la determinazione del contenuto di cloruri.

Visto che si tratta di un materiale costituito esclusivamente da elementi di origine minerale, è stata trascurata la problematica del punto di disgelo, che per contro, deve essere determinato per i materiali a base di resina epossidica.

Prima della stagione invernale del 2012 / 2013 sono state realizzate due aree campione di ca. 1,5 m<sup>2</sup>. La differenza delle aree era costituita dalla differente rugosità delle superfici. Un'area è stata lasciata rugosa e l'altra è stata levigata con la spatola. Le due aree sono state monitorate per un periodo invernale. E' stata scelta l'area trattata, poiché dopo il suo lavaggio si presentava più pulita dell'area rugosa. Lo spessore prescritto (min. 5 mm sopra le punte) è stato controllato con continuità in corso d'opera.

## 25-23 Illuminazione

L'obiettivo è la realizzazione di un'illuminazione adeguata progettata secondo un concetto generale, che tiene conto delle caratteristiche di riflessione della pavimentazione e dei rivestimenti.

Con l'aiuto di uno studio tecnico di ingegneria specializzato è stato elaborato, per la galleria di Seehof un concetto di illuminazione in base alle

normative in vigore (RVS 09.02.41 Illuminazione del 28 gennaio 2014) che di seguito è stato messo in gara ed eseguito.

Per collaudare l'impianto di illuminazione (unità di controllo e apparecchi di illuminazione) è necessaria l'esecuzione della prima importante misurazione della luminanza, che tenga conto di fattori come il grado di illuminamento, la regolabilità in funzione delle indicazioni delle telecamere di luminanza, come anche dei valori di riflessione del colmo della galleria, delle pareti ed infine della pavimentazione. Le misurazioni sono state eseguite nelle ore notturne per escludere influenze di fonti di luce esterna.

Per la durata delle misurazioni le gallerie sono state chiuse al traffico. Viene determinato un numero di punti di misura sufficiente, e con un apparecchio speciale in ogni punto di misura vengono scattate almeno 5 immagini. Un software sviluppato per questo scopo, permette la rappresentazione visiva dei risultati.

### Apparecchi di misura:

Misuratore della luminanza: ditta Techno, Bildverarbeitung mbH, tipo: LMK mobile advanced

Misuratore dell'illuminamento: ditta PRC Krochmann, Typ: Radiolux 111 advanced

Per le misure di riferimento è stato utilizzato un apparecchio della ditta Gossen, Typ Mavolux 5032B.

### Metodo di misura:

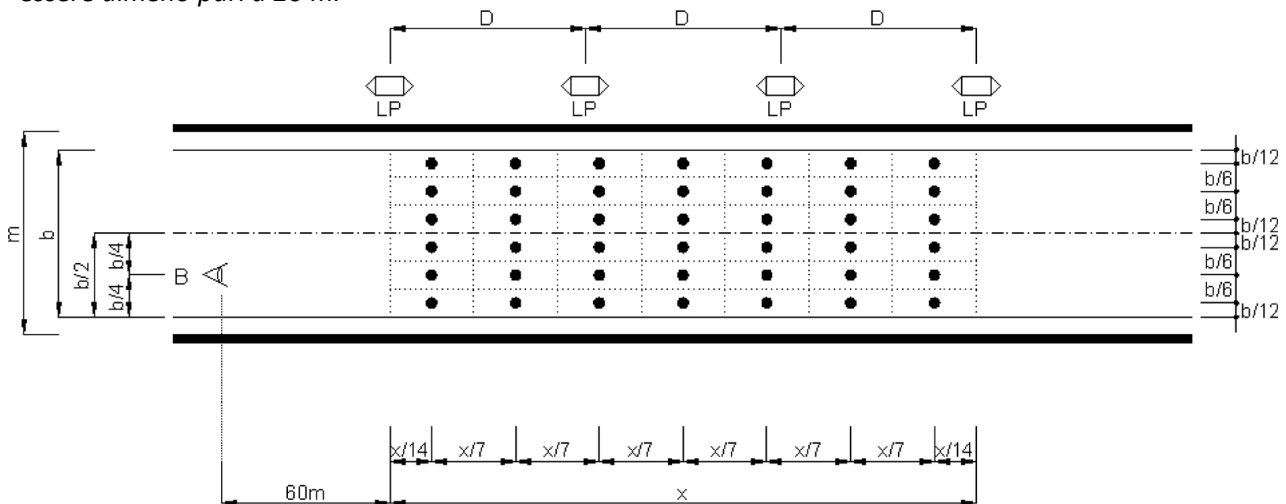
(estratto della normativa in vigore in Austria RVS 09.02.41 Illuminazione)

### Luminanza della pavimentazione:

Per gallerie a senso unico la misurazione è eseguita in direzione di marcia, in gallerie bidirezionali per il tratto interno alla galleria, in entrambe le direzioni (a causa dell'eccentricità della posizione degli apparecchi luminosi)

La luminanza della pavimentazione  $L_f$  e il valore dell'illuminamento orizzontale  $E_{hf}$  sono determinati trasversalmente in tre punti di misura per ogni corsia e sulle corsie di emergenza (quando presenti); e in sette punti di misura in direzione longitudinale.

La lunghezza dell'area di misura  $x$  nel tratto interno della galleria e nella zona d'entrata (uno o più intervalli degli apparecchi luminosi) deve essere almeno pari a 20 m.



Legenda:

- B osservatore - punto di misura di riferimento
- D intervalli degli apparecchi luminosi
- punto di misura

- X lunghezza dell'area di misura [m]
- B distanza tra i cordoli [m]
- m ampiezza [m]

Fig. 43 - reticolo di misurazione per la pavimentazione

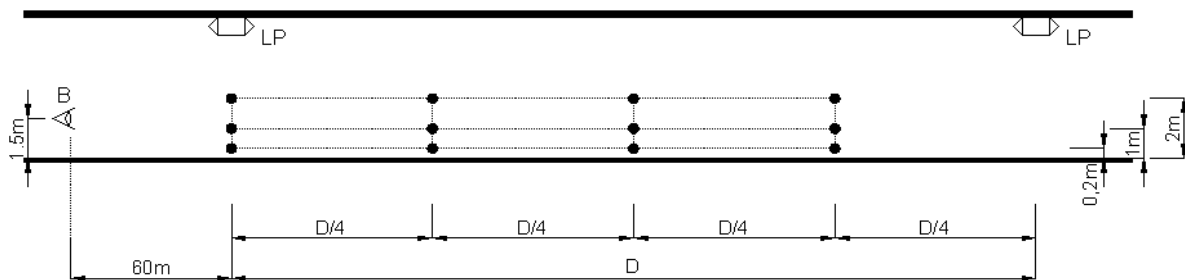
Nel caso in cui il primo tratto della zona d'entrata non superi i 30 m, è sufficiente eseguire una sezione. I sette punti di misura, rispetto all'asse longitudinale, si trovano al centro delle sotto-aree di misura ( $x/7$ ).

Nel caso di più di due corsie va preso come riferimento per la corsia più esterna la larghezza tra il cordolo e il confine tra corsia esterna e media, per le corsie intermedie, la propria larghezza.

L'andamento curvilineo dell'illuminazione nella zona d'entrata (che riguarda la seconda parte della zona di entrata e la zona transitoria) deve essere misurato ad intervalli di 6 m, dove la prima sezione corrisponde alla metà della distanza di d'arresto. In questo caso la distanza tra osservatore e la sezione di misurazione è costantemente di 60m.

### Luminanza delle pareti:

La luminanza delle pareti è da verificare sia nella zona interna che all'ingresso della galleria.



Legenda:

B osservatore -punto di misura di riferimento

D Distanza tra le lampade e lunghezza dell'area di misura [m]

D intervalli degli apparecchi luminosi

D / 4 distanza punti di misura in senso di marcia [m]

• punto di misura

H altezza di misura [m] → 0,2; 1,0; 2,0 m sopra la corsia rialzata

Fig. 44 - „Luminanza delle pareti“: reticolo delle misurazioni per le pareti

La misurazione è da eseguire secondo lo schema “luminanza della pavimentazione” tra due apparecchi luminosi. Se la distanza tra due singole lampade è inferiore a 12 m sono sufficienti due punti di misura. Viene eseguita la media aritmetica delle singole misurazioni. L’indicazione dell’altezza indicata nella figura “luminanza della pavimentazione” si riferisce alla corsia laterale rialzata.

Il punto di riferimento di misura per le misure della luminanza è il punto centrale della corsia destra ad un’ altezza di 1,50 m, a una distanza di 60 m dall’ area di misura.

Il punto di riferimento di misura della luminanza  $L_{20}$  viene generalmente determinato in base alla distanza di arresto.

Per la progettazione e le misurazioni sono da utilizzare ogni volta le stesse aree e gli stessi punti di misura.

I valori misurati determinano la luminanza. Per avere un confronto, a campione, sono stati misurati anche i valori del grado dell’illuminamento.

A secondo dell’insudiciarsi delle superfici in galleria, i valori di misura sulle superfici e quelli di riflessione subiscono variazioni. Per registrare

questi cambiamenti, le misurazioni sono state ripetute ciclicamente, mantenendo la stessa procedura, utilizzando gli stessi apparecchi e da parte della stessa impresa. Dopo un periodo di monitoraggio di ca. un anno, è possibile quantificare il **risparmio energetico** in una percentuale compresa tra il **25 e il 30%**.

## 25-30 Controlli e monitoraggi nella galleria Rattenberg, B 171 Tiroler Straße

## 25-31 Programma di ricerca rivestimento

Per la realizzazione delle aree di prova nella galleria di Rattenberg è stato elaborato dall’Università di Innsbruck in collaborazione con uno studio di ingegneria specializzato, un vasto programma di ricerca che riguarda sia l’esecuzione, che e il successivo monitoraggio. Le prove sono state eseguite dopo la preparazione della superficie di posa, durante la lavorazione e sulla superficie finita, secondo il seguente programma:

Dopo la preparazione della superficie di posa:

- **Resistenza al distacco della superficie irruvidita**
- **Rugosità della superficie di posa**
- **Determinazione del contenuto di cloruri sulla polvere del carotaggio a tre profondità di 1,5 cm cadauna (valori di riferimento)**

Durante la **posa in opera** (3 volte al giorno, all'inizio, durante e a fine lavori):

- **Umidità relativa dell'aria**
- **Temperatura dell'aria**
- **Temperatura della costruzione**
- **Punto di disgelo**
- **Umidità del calcestruzzo**
- **Creazione di tre aree pilota**
- **Prelievo di un campione di ogni materiale per riserva**

Sulla **superficie finita**:

- **Prova di distacco del rivestimento**
- **Spessore dello spatolato**
- **Spessore della verniciatura**
- **Grado di luminosità LRV secondo BS8493**

E' stato possibile eseguire tutte le prove durante la posa in opera e sulla superficie finita secondo quando previsto dalle prescrizioni. I lavori e le misurazioni in cantiere sono stati eseguiti sotto la supervisione della ÖBA (Ispettorato all'edilizia) e di uno studio di ingegneria. Le varie prove sono state eseguite da un laboratorio indipendente.

## 25-32 Pulizia del rivestimento

La pulizia del rivestimento delle pareti è stata eseguita tramite l'apporto di appositi detergenti ed acqua pulita in rapida successione. Non è stata eseguita una pulizia meccanica.

Per valutare l'insudiciamento e l'efficienza della pulizia raggiunta, si è provato a ripulire la superficie con un panno.



Fig. 45 - Galleria Rattenberg – Pulizia delle pareti



Fig. 46 - Galleria Rattenberg – Prima della pulizia e dopo la pulizia

## 25-33 Valutazione preliminare del rivestimento delle pareti

Le differenze dell'accumulo dello sporco sulle aree di prova dopo la pulizia eseguita sono minime. In nessuna delle aree di prova si sono verificati distacchi del rivestimento.

Tutte le parti delle aree di prova, sulle quali è stata data una copertura con tecnologie nano si sono dimostrate più resistenti allo sporco rispetto alle aree non trattate.

Da una valutazione visiva il blocco numero 52 è quello che si è mantenuto più pulito.

Il presente progetto Interreg IV "iBBT - Pavimentazione, rivestimenti e illuminazione innovativi per gallerie" termina nel mese di ottobre 2014. Il partner Tirolo ha deciso di prolungare il tempo di osservazione per un anno (fino all'autunno 2015).

Questo permetterà di monitorare le aree pilota che saranno così esposte in maniera più severa e prolungata alle azioni di gelo disgelo e la presenza di sali così, come all'inquinamento.

## 25-34 Illuminazione

In contrapposizione alle misure di luminanza nella galleria di Seehof, dove è stato analizzato il funzionamento dell'illuminazione a LED, nella galleria di Rattenberg rimane in uso l'illuminazione esistente costituita da lampade a sodio ad alta pressione. Qui l'attenzione è stata posta sul rivestimento, che dopo la realizzazione delle aree pilota ha dato valori di riflessione differenti.

È stata utilizzata la stessa metodologia di misura della galleria di Seehof. L'espressione dei risultati è stata fatta attraverso lo stesso apposito software.

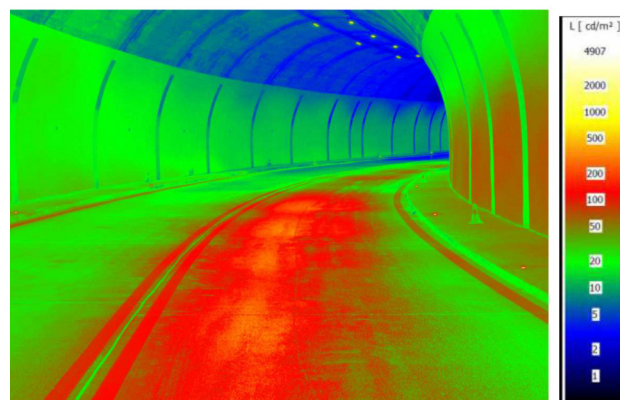


Fig. 47 - Ripresa di misura nella galleria Seehof



Fig. 48 - Immagine telecamera ca. 40m prima dell'immagine di misura

## Luminanza riferita alla pavimentazione

Luminanza della pavimentazione [cd/m <sup>2</sup> ]					
No.	Denom.	MEDIA	MIN	MAX	U <sub>0</sub>
1	Zona di entrata; -60m	110,1	17,0	244,5	0,2
2	Zona di transizione; 30m	101,0	16,0	254,1	0,2
3	Zona di transizione 90m	17,3	2,8	48,0	0,2
4	Zona interna 165m	6,4	0,8	23,6	0,1
5	Zona interna 240m	3,3	0,2	10,9	0,1
6	Zona interna 315m	3,6	0,4	22,3	0,1
7	Zona di transizione 365m	7,2	0,5	31,7	0,1
8	Zona di transizione 415m	11,1	1,9	38,0	0,2
9	Zona di transizione 465m	25,8	5,5	89,0	0,2
10	Zona di uscita 515m	45,6	7,1	189,1	0,2

Tabella 17 - Risultato del 24 luglio 2012 dalle 22:50 – 23:40 – “misura di riferimento”

Luminanza della pavimentazione [cd/m <sup>2</sup> ]							
Blocco	Regione	prima della pulizia			dopo della pulizia		
		Min	Max	Media	Min	Max	Media
54-50	1	11,0	213,6	100,2	27,9	241,6	113,6
49-46	1	9,0	115,8	52,7	13,5	117,2	56,4
45-44	1	3,8	44,8	19,5	7,0	60,9	29,2
43-42	1	3,2	34,4	16,0	6,1	47,1	21,9
41-40	1	2,3	31,1	12,0	3,7	37,1	15,0
39-38	1	1,3	24,4	10,3	3,3	26,2	12,3
37-36	1	0,8	24,1	6,6	1,7	16,8	5,3
35-34	1	0,8	6,9	2,7	0,6	6,0	2,1
33-32	1	0,7	7,2	2,8	1,3	9,7	4,0
31-30	1	0,6	6,0	2,1	1,3	9,8	4,2

Tabella 18 - Risultato 23.4.2014 e 8.5.2014 dalle 21:00 – 23:00 – (prima e dopo la pulizia)

### Risultato:

Per le misurazioni non è stato possibile utilizzare gli stessi punti di misura. Nonostante questo inconveniente è riconoscibile che il rivestimento delle aree di prova ha generato un notevole incremento del fattore di riflessione. La pulizia delle superfici, ha ulteriormente migliorato i valori di riflessione.

La comparazione dimostra che, in generale, nella galleria di Rattenberg il nuovo rivestimento ha comportato un notevole miglioramento, senza che sia ancora avvenuta la classificazione dei singoli prodotti utilizzati per il rivestimento (vedi figura 51 e 52).

Galleria Rattenberg, Lunghezza 640m				
Misurazioni 2012			Misurazioni 2014	
Valore medio	Immagine Nr.	Lunghezza	Blocco	Valore medio
101,00 cd/m <sup>2</sup>	2	12	54	102,00 cd/m <sup>2</sup>
		24	53	
17,30 cd/m <sup>2</sup>	3	36	52	
		48	51	
		60	50	
		72	49	52,70 cd/m <sup>2</sup>
		84	48	
6,40 cd/m <sup>2</sup>	4	96	47	
		108	46	
		120	45	19,50 cd/m <sup>2</sup>
		132	44	
		144	43	16,00 cd/m <sup>2</sup>
		156	42	
3,30 cd/m <sup>2</sup>	5	168	41	12,00 cd/m <sup>2</sup>
		180	40	
		192	39	10,30 cd/m <sup>2</sup>
		204	38	
		216	37	6,60 cd/m <sup>2</sup>
		228	36	
		240	35	2,70 cd/m <sup>2</sup>
3,60 cd/m <sup>2</sup>	6	252	34	
		264	33	2,80 cd/m <sup>2</sup>
		276	32	
		288	31	2,10 cd/m <sup>2</sup>
		300	30	

Fig. 49 - Le aree pilota del Tunnel Rattenberg

### Illuminazione riferita alla pavimentazione

No.	Denom.	Illuminamento [lx]
1	Zona di entrata; -60m	380
2	Zona di transizione; 30m	505
3	Zona di transizione 90m	320
4	Zona interna 165m	55
5	Zona interna 240m	43
6	Zona interna 315m	25
7	Zona di transizione 365m	28
8	Zona di transizione 415m	106
9	Zona di transizione 465m	163
10	Zona di uscita 515m	365

Tabella 19 - Misurazioni dell'illuminamento della pavimentazione in data 23.4.2014 e 8.5.2014 dalle ore 21:00 alle ore 23:00 (prima e dopo la pulizia)

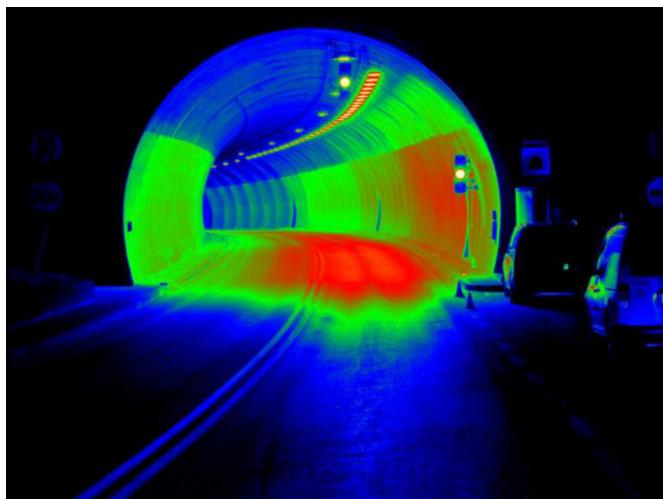


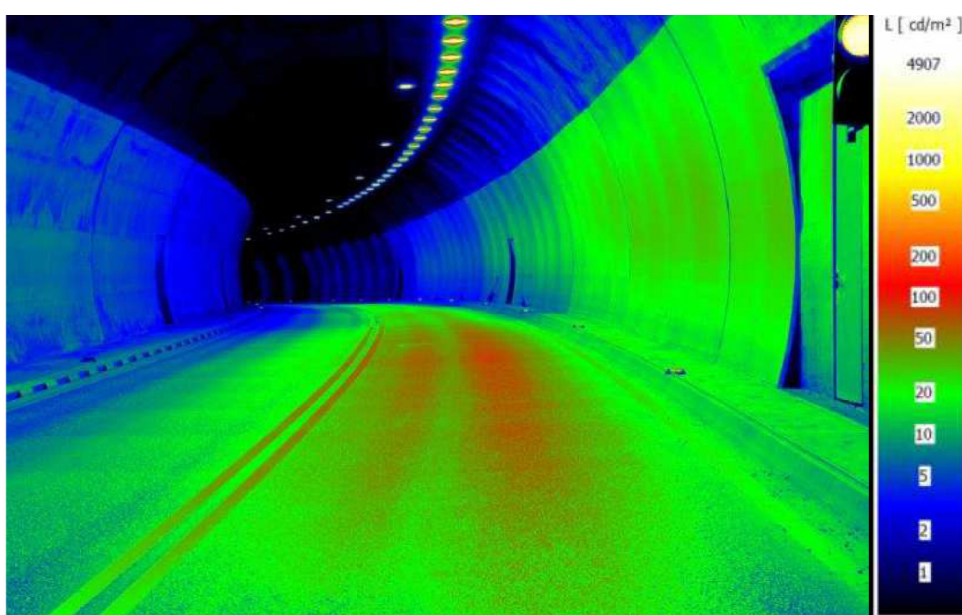
Fig. 50 - Galleria Rattenberg – Portale di ingresso

Illuminamento sulla pavimentazione [lx]			
Blocco	Regione	prima della pulizia	dopo della pulizia
		Media	Media
53	1	1180,0	1220,0
52	1	1070,0	1300,0
51	1	950,0	1010,0
50	1	525,0	550,0
49	1	530,0	620,0
48	1	345,0	370,0
47	1	275,0	360,0
46	1	305,0	360,0
35	1	19,0	31,0

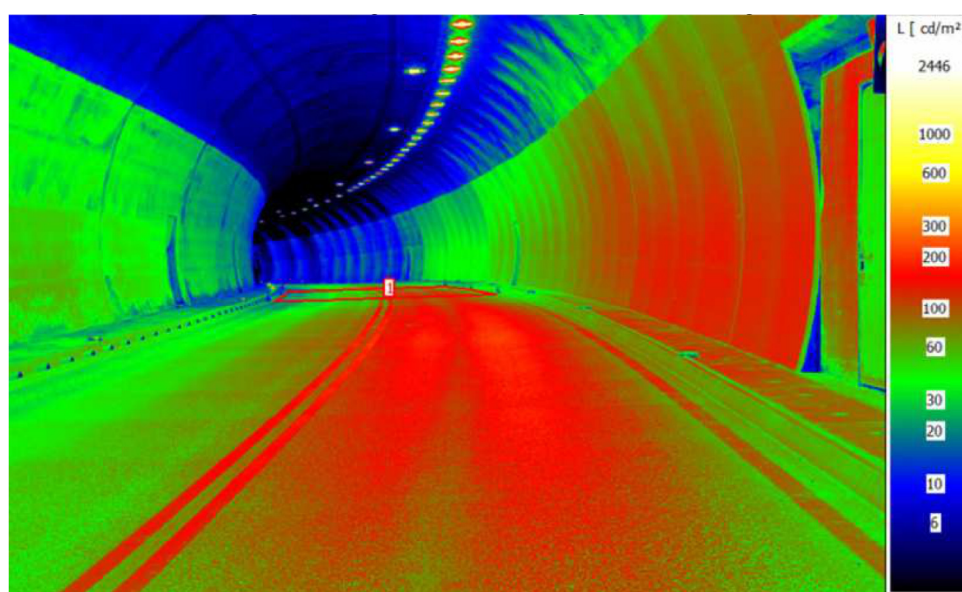
Tabella 20 - Misurazioni dell'illuminamento della pavimentazione: 24.7.2012 dalle ore 22:50 alle ore 23:40

Illuminamento della parete destra in senso di marcia (da ovest a est) [lx]									
Blocco	Regione	prima della pulizia				dopo della pulizia			
		0,2m	1m	2m	Media	0,2m	1m	2m	Media
53	1	800,0	630,0	570,0	666,7	850,0	959,0	800,0	869,7
52	1	670,0	660,0	560,0	630,0	850,0	780,0	810,0	813,3
51	1	670,0	700,0	540,0	636,7	770,0	750,0	670,0	730,0
50	1	400,0	420,0	310,0	376,7	420,0	350,0	380,0	383,3
49	1	330,0	340,0	320,0	330,0	520,0	590,0	330,0	480,0
48	1	230,0	210,0	185,0	208,3	210,0	220,0	200,0	210,0
47	1	220,0	200,0	240,0	220,0	210,0	200,0	210,0	206,7
46	1	190,0	190,0	150,0	176,7	200,0	220,0	190,0	203,3
35	1	8,3	8,0	6,6	7,6	12,0	16,0	13,0	13,7

**Tabella 21** - Inoltre nel corso delle misurazioni dei giorni 23.4.2014 e 8.5.2014 tra le ore 21:00 e le ore 23:00 è stato possibile effettuare delle misurazioni dell'illuminamento delle aree di prova.



**Fig. 51** - Misurazione della luminanza Galleria Rattenberg prima della realizzazione delle aree di prova.



**Fig. 52** - Misurazione della luminanza Galleria Rattenberg dopo della realizzazione delle aree di prova.

## 25-35 Conclusioni provvisorie sull'illuminazione

Al momento della redazione della presente linea guida si può affermare che la realizzazione del rivestimento di prova nella galleria cittadina di Rattenberg ha comportato un aumento netto dei valori di riflessione rispetto al rivestimento esistente, realizzato nel 1996.

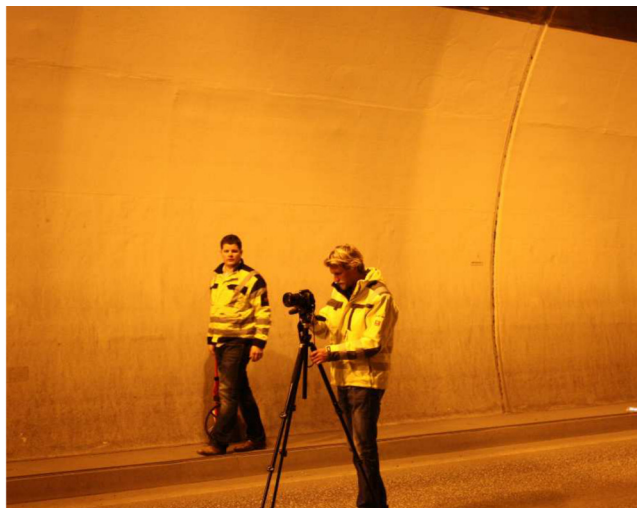


Fig. 53 - Misurazione



Fig. 54 - Le aree pilota iniziano dopo il locale tecnico verso il centro della galleria

## 26-10 Valutazione energetica delle gallerie Narano 1 e 2

### Confronto delle pavimentazioni innovative realizzate:

Per quanto riguarda gli aspetti squisitamente illuminotecnici, la pavimentazione stesa nella galleria di **Narano 1** fornisce dei risultati superiori a quella stesa nella galleria di **Narano 2**.

Infatti i risultati delle misure illuminotecniche effettuate dopo ca. 1 - 2 anni dalla messa in esercizio dell'infrastruttura portano a ritenere la pavimentazione di NARANO 1 come ascrivibile al novero delle pavimentazioni chiare ( $Q_0=0,11$ ), mentre quella di NARANO 2 come ascrivibile al novero delle pavimentazioni scure di media luminanza ( $Q_0=0,075$ ), secondo i criteri contenuti nelle norme italiane UNI 11095/11.

In termini economici, il **risparmio energetico** conseguibile dall'impiego di una pavimentazione chiara rispetto all'impiego di una pavimentazione scura, deriva dall'utilizzo di un minor numero di corpi illuminanti: **tale risparmio si aggira tra il 50 e il 60%**

### Confronto dei corpi illuminanti realizzati:

Per quantificare il risparmio economico nell'utilizzo dei corpi illuminanti a LED, rispetto all'uso dei tradizionali corpi illuminanti al sodio ad alta pressione (SAP), è stato messo a punto un foglio di calcolo.

### Questo foglio tiene conto di vari parametri:

1. delle ore di luce nella Provincia di Bolzano nei vari mesi dell'anno
2. della percentuale giornate nuvolose

3. del tempo in cui il fornace non è illuminato dal sole pieno
4. del costo dei proiettori a LED
5. del costo dei proiettori al sodio ad alta pressione
6. del costo energetico del kWh
7. dell'aumento percentuale (stimato) della bolletta energetica
8. delle norme contenute nella UNI 11095/11 sull'illuminazione permanente e permanente notturna

Nelle ipotesi di:

- a. una durata prevista per l'impianto pari a 20 anni
- b. di un costo del kWh pari a 0,22 €
- c. di un incremento annuo in bolletta pari al 3%
- d. eventuale impianto permanente al sodio non regolato da alcun regolatore di flusso

### Il foglio elettronico fornisce una serie di risultati:

1. l'eventuale risparmio economico complessivo dei costi iniziali
2. il costo (stimato) dei consumi con le lampade al sodio, ipotizzando lampade da 80W
3. il costo (stimato) dei consumi con le lampade a LED
4. il risparmio percentuale sui consumi utilizzando il LED rispetto al sodio

La spesa complessiva dopo 20 anni, considerando l'impiego di corpi a LED sarà di: 277.928,00 € mentre, utilizzando lampade al sodio, sarebbe stato di 363.078,00 €, il tutto, considerando anche l'IVA del 22%.

Il risparmio complessivo rispetto all'impiego di corpi al sodio ad alta pressione (SAP) sarà di 85.150,00 € pari al **23%**.

Il risparmio energetico in termini assoluti di kWh, sarà di: 432.514 kWh che porta ad un risparmio percentuale pari al **39%**.

## 26-21 Valutazione energetica galleria di Seehof

Per ciò che riguarda la valutazione del consumo energetico tra gli impianti d'illuminazione a lampada a sodio ad alta pressione e a lampade a LED con tecnologia a lenti, per l'illuminazione d'entrata e di transito sono stati eseguiti calcoli comparativi.

Il calcolo tiene conto esclusivamente del consumo energetico l'illuminazione.

Non sono stati presi in considerazione i costi di produzione, assistenza e manutenzione. Inoltre il calcolo non tiene conto dell'influenza dei rivestimenti e delle pavimentazioni. Tuttavia si può dichiarare che, nella galleria di Seehof, il rivestimento realizzato migliora ulteriormente il grado di efficienza dell'illuminazione.

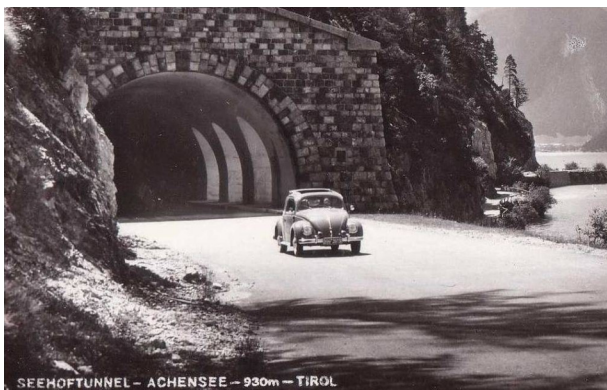


Fig. 55 - La galleria di Seehof negli anni 1960

Nella zona di ingresso è stato possibile progettare un'illuminazione di rinforzo con valori attorno a  $70\text{cd/m}^2$ , grazie al contributo dei viadotti, che, a Nord e a Sud permettono una buona incidenza di luce naturale. Supponendo l'utilizzo di corpi luminosi tradizionali a 250 Watt e 150 Watt, il dispendio energetico annuo calcolato risulta essere di 25.967kWh. Per l'illuminazione permanente sono necessari 35.394 kWh.

Di contro, l'impiego della tecnologia a lenti LED richiede per l'illuminazione di rinforzo un dispendio energetico annuo di 17.468 kWh e per l'illuminazione permanente (della zona interna) 27.255 kWh. Nel calcolo sono stati inoltre considerati il grado di efficienza, la riduzione notturna, la luminanza progettuale per la zona d'ingresso di ca.  $75\text{cd/m}^2$  e nella zona interna di ca.  $4\text{cd/m}^2$ .

### Illuminazione:

Considerando un prezzo di 0,1588 €, che comprende i costi energetici, i costi della rete, contributi pubblici e le tasse, il dispendio totale per l'illuminazione tradizionale di 9.750,22 € e per l'impiego dell'illuminazione a LED con tecnologia a lenti di 7.106,55 €.

Ciò significa un risparmio calcolato rispetto all'impiego di lampade a LED pari a **27%**.

Un altro vantaggio è dato dai brevi tempi di accensione delle lampade a LED. Non bisogna tenere conto dei tempi di riscaldamento delle lampade per la loro accensione. Dopo un calo di tensione l'impianto può essere riaccessibile immediatamente a pieno regime.

## Bibliografia

- Abteilung Straßenbau, Nordtirol. (2012). Innsbruck: Landesbaudirektion.
- Al-Qadi I. L., Weyers R. E., (1994) "Asphalt Portland Cement Concrete Composite: Laboratory Evaluation", Journal of Transportation Engineering, vol. 120, No. 1
- ANAS. (2009). Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali secondo la normativa vigente, seconda edizione. Bozen.
- ASFINAG, Merkblatt Tunnelanstrichsystem - Anlage zur Technischen Richtlinie. (2011). Wien: Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft.
- ASFINAG, Planungshandbuch Tunnel - Bau. (2011). Technische Richtlinie, Wien. (2011, Hrsg., & A. u. Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft, Redakteur) Planungshandbuch Tunnel - Bau, Technische Richtlinie: Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft.
- ASFINAG, Tunnel - Beleuchtung (BEL) - Technische Richtlinie. (2010). Wien: Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft.
- ASFINAG, Tunnel - Beleuchtung (BEL) - Technische Spezifikation. (2013). Wien: Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft.
- Asphaltdeckschichten, N. E. (2004). Praktische Hinweise für den Bau von hellen Asphaltdeckschichten. Hamburg.
- ASTRA, B. f. (2005). Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen. Richtlinie ASTRA 12001. Bern.
- ASTRA, B. f. (2010). Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen. Weisungen ASTRA 74001. Bern.
- ASTRA, B. f. (13. November 2012). Fachbuch BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen ASTRA, Version 2.0. Bern.
- ASTRA, B. f. (09. November 2012). Fachbuch T/G (Tunnel/ Geotechnik). Version 4.0. Bern: ASTRA.
- ASTRA, B. f. (2012). Strassen und Verkehr - Zahlen und Fakten. Bern.
- Außerlechner, M. (08. Mai 2014). Beleuchtungstechnologien in Tunneln. (F. Pospischil, Interviewer) Innsbruck.
- Autobahndirektion Südbayern. (2012). Baubeschreibung Dünnschichtbelag, heiß auf Versiegelung mit farblosem Bitumen. E-mailverkehr mit Löcherer, Ludwig. München.
- Bartenbach LichtLabor GmbH. (2012). Tunnelbeleuchtung mit LED. Eröffnungskonferenz Projekt iBBT. Bozen Südtirol.
- Bauberichte, Tagungsberichte. Geomechanik Tunnelbau, 1. (2008). 85–91, doi: 10.1002/geot.200890005.
- Baum, A. (2012). Photokatalytische Oberflächen zur Minderung der Stickoxidbelastung an Verkehrswegen. Graz: Symposium "Emissionen, Verkehr & Lösungen".
- Baureferat Süd. (2012). Schriftverkehr. Stuttgart, Deutschland: Referat 47.3 Baureferat Süd.
- Bocci, M. (2012). Stato di avanzamento delle attività di laboratorio al 31.05.2012. Ancona.

- Bundesamt für Strassen ASTRA. (2010). Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen, Weisungen ASTRA 74001. Bern: Bundesamt für Strassen ASTRA.
- Bundesamt für Strassen, ASTRA. (2012). Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung. Bern, Schweiz: VSS - Verband der Schweizer Strassen- und Verkehrsfachleute.
- Bundesanstalt für Straßenwesen. (2007). ZTV-ING Teil 5 - Tunnelbau. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- CEN - 13201-1. (2004). Straßenbeleuchtung Teil 1 CEN/TR 13201 - 1. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung.
- CEN - 13201-2. (2004). Straßenbeleuchtung Teil 2 CEN/TR 13201 - 2. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung.
- CEN - 13201-3. (2007). Straßenbeleuchtung Teil 3 CEN/TR 13201 - 3. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung.
- CEN - 13201-4. (2004). Straßenbeleuchtung Teil 4 CEN/TR 13201 - 4. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung.
- CENELEC 60598 -2-3. (2011). Leuchten Teil 2-3: Besondere Anforderungen - Leuchten für Straßen- und Wegebeleuchtung. Brüssel: Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung.
- Ceramicoat Group. (2003). Road Tunnel Systems - Data Sheet. Somerset, England: Ceramicoat Group.
- Ceramicoat Limited. (2003). Tunnel Systems. Somerset, England: Ceramicoat Group.
- Damm, K.-W., & Buchholz. (2009). Aufhellung von Asphaltdeckschichten. asphalt, S. 23-25.
- DIN 67524. (2011). Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Ding Q., Sun Z., Shen F., Huang S., (2011) "The Performance Analysis of Semi-Flexible Pavement by the Volume Parameter of Matrix Asphalt Mixture", Advanced Materials Research, vols. 168-170, pp. 351-356.
- Dudenhöfer, B., & Schumann, R. (2003). Verfüllter offenerporiger Asphalt. Zur Instandsetzung von Fahrbahnbelägen an Brücken, Tunnel- und Trogbauwerken. Asphalt, S. 16-24.
- Enk, W. (07. Mai 2014). Beschichtungstechnologien in Tunneln. (F. Pospischil, Interviewer)
- European Asphalt Pavement Association (2008), "Asphalt Pavements in tunnels", Position paper
- Europäische Union. (2004). Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz. Brüssel: Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates; Amtsblatt der Europäischen Union L 167 vom 30. April 2004.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit. (2006). Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln RABT. Köln: FGSV Verlag.
- Fujishima, A., Hashimoto, K., & Watanabe, T. (1999). TiO<sub>2</sub> Photocatalysis. Tokyo: BKC, Inc.
- Glantschnigg, N. (2005). Die Bedeutung der Untergrundtemperatur beim Beschichten von Betonbauteilen und Zementestrichen mit Reaktionsharzen. Abgerufen am 15. 01 2012 von <http://www.bvfs.at/htm/pub/harze.htm>

- Hassan K. E., Setyawan A., Zoorob S. E., (2002), "Effect of Cementitious Grouts on the Properties of Semi-Flexible Bituminous Pavements", Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavements, Zoorob, Collop and Brown (eds), pp. 113-120.
- Kipf, M. (2011). Oberflächenqualität von Beton bei Verwendung von Stahlsschalungen. Wehr: Tunnel-onile.info.
- Krispel, S. (2010). Tunnelinnenschale aus hellem SCC. Bauportal, S. 706-709.
- Krispel, S., & Peyerl, M. (2011). Selbstverdichtender Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit und Helligkeit. Wien: VÖZfi.
- licht.de. (2014). licht.de. Abgerufen am 29. April 2014 von <http://www.licht.de/de/produkte-und-hersteller/lampen>
- Lin D. F., Luo H.L. (2004), Fading and Color Changes in Colored Asphalt Quantified by the Image Analysis Method, Construction and Building Materials, No. 18, pp. 255-261,
- MC-Bauchemie; PCT swiss Protection & Cleaning Technologies. (2012). Emcephob HPC - Hochleistungsbeschichtungen für Tunnelbauwerke. Bottrop: MC Bauchemie Müller GmbH Co. KG.
- Meier, S., & Martinola, G. (2006). Untersuchung der Wirkung unterschiedlicher Oberflächenschutzkonzepte. Zürich, Schweiz: Concretum Construction Science AG Zürich.
- Menegatti E. (2011). Tecnologia a Basso Impatto Ambientale, Strade & Autostrade, vol. 6, pp. 2-3.
- Merusi F., Giuliani F. (2012). Chromatic and Rheological Characteristics of Clear Road Binders Transportation Research Record, n. 2293, vol. 1.
- Meseberg. (2009). Gutachten G07/2009 Optimaler Leuchtdichtekoeffizient  $q_0$  von Fahrbahnoberflächen.
- Navarro F. J., Partal P., Martinez-Boza F. (2005), Gallegos C., Effect of Composition and Processing on the Linear Viscoelasticity of Synthetic Binders, European Polymer Journal, No. 41, pp. 1429-1438
- Onaygil, S., Güler, Ö., & Erkin, E. (2002). Determination of the effects of structural properties on tunnel lighting with examples from Turkey. Abgerufen am 26. September 2012 von ScienceDirect: [www.Sciencedirect.com](http://www.Sciencedirect.com)
- Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik. (2004). Merkblatt - Anstriche für Tunnelinnenschalen. Wien: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik.
- PCT swiss Protection & Cleaning Technologies. (2012). Nano Tech Coating PCT WU Nanoprotect. Basel: PCT®swiss Protection & Cleaning Technologies.
- Rhomberg, A. (05. Mai 2014). Belagstechnologien in Tunneln. (F. Pospischil, Interviewer)
- RIS - STSG. (2010). Straßentunnel Sicherheitsgesetz. Wien: Bundeskanzleramt.
- RVS 01.01.11. (01. 09 2006). Bestimmungen für den EWR und die Türkei. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 08.16.01. (06. September 2010). Anforderungen an Asphalttragschichten. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 08.16.01. (06. 09 2010). Anforderungen an Asphalttragschichten. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.

- RVS 08.16.06. (12. März 2013). Anforderungen an Asphaltmischgut - Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 08.16.06. (12. 03 2013). Anforderungen an Asphalttragschichten - Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 08.97.05. (14. Mai 2012). Anforderungen an Asphaltmischgut. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 08.97.06. (12. März 2013). Anforderungen an Asphaltmischgut - Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 08.97.06. (12. 03 2013). Anforderungen an Asphaltmischgut - Gebrauchsverhaltensorientierter Ansatz. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 09.01.23. (14. 12 2010). Tunnel - Innenausbau. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 09.01.24. (18. 08 2009). Tunnel - Bauliche Anlagen. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 09.01.31. (11 2003). Tunnel - Projektierungsrichtlinie. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 09.02.22. (09. 03 2011). Tunnel - Tunnelausrüstung. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 09.02.31. (01. 08 2008). Tunnel - Grundlagen. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 09.02.41. (01. 02 2014). Tunnel - Beleuchtung. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- RVS 09.03.11. (01. 03 2009). Tunnel - Risikoanalysemodell. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- Schaffaczek. (14. Januar 2014). Whitetopping in Straßentunnel. (F. Pospischil, Interviewer) Schweizer Eidgenossenschaft. (Oktober 2012). Nationalstrassenverordnung vom 7. November 2007 SR 725.111, 2. Abschnitt: Tunnelsicherheit Art.50. Bern.
- Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute, V. (2008). Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung, Forschungsauftrag VSS 2008/204.
- Steiner, M. (2009). Helle Innenschale ohne Beschichtung. Zement + Beton 5\_09.
- St-Jacques M., Brosseaud Y., (2006). Coloured Bituminous Wearing Courses in France, Overview of Uses, 10th International Conference on Asphalt Pavements, vol. 3, pp. 233-242, Quebec.
- StoCretec. (2008). Geomechanik und Tunnelbau - Bauberichte - Schutz, Instandsetzung und Sicherheit von Tunnelbauwerken. Salzburg: Österreichische Gesellschaft für Geomechanik.
- StoCretec. (2008). Schutz und Instandsetzung von Tunnelbauwerken. Krißtel.
- Strauber, J. (2012). LED-Beleuchtung im Tunnel Lungern. TEC 21 Nr. 1-2/2012.

- Südtirol, L. v. (27. Juni 2006). Nr. 28 Funktionelle und geometrische Normen für die Planung und den Bau von Straßen in der Autonomen Provinz Bozen - Südtirol. Bozen.
- (2012). verschiedene LED verarbeitende Gewerbe. (UIBK, Interviewer)
- Synnefa A., Karlessi T., Gaitani N., Santamouris M., Assimakopoulos D. N., Papakatsikas C. (2011). Experimental Testing of Cool Colored Thin Layer Asphalt and Estimation of its Potential to Improve the Urban Microclimate, Building and Environment, No. 46, pp. 38-44
- UNI 11095, (2011). Illuminazione delle gallerie stradali.
- von Lutz, A. (2012). Beleuchtung von Straßentunnel. Eröffnungskonferenz, Projekt iBBT. Bozen - Südtirol.
- VÖZ fi. (2012). Prüfbericht - B 499-2/12 "Bestimmung des Hellbezugwertes L an Tunneloberflächen - Zusammenfassung" - Entwurf. Wien: Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie.
- Wencheng, C., Zheng, H., Liping, G., Yandan, L., & Dahua, C. (2007). Performance of induction lamps and HPS lamps in rad tunnel lighting. (Elsevier, Hrsg.) Abgerufen am 26. September 2012 von ScienceDirect: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- Werner, R. (2003). [www.betonstrassen.bvbe.ch](http://www.betonstrassen.bvbe.ch). Abgerufen am 13. Januar 2014 von Betonfahrbahnen in Tunnels: [http://www.betonstrassen.bevbe.ch/fileadmin/user\\_upload/Literatur/Betonfahrbahnen%20in%20Tunnels.pdf](http://www.betonstrassen.bevbe.ch/fileadmin/user_upload/Literatur/Betonfahrbahnen%20in%20Tunnels.pdf)
- Werner, R. (13. Januar 2014). Gespräche zu Betonbelägen in Tunnel. (F. Pospischil, Interviewer)
- Wierer, A. (2012). Treffen in der ASFINAG. (UIBK, Interviewer)
- Wiesholzer, F. D.-I. (2012). Tunnelspezifische Grundlagen für den Oberbau. Wien: BMVIT.