



CONCRETE

Protezione superficiale di opere in calcestruzzo – Aumento della durabilità tramite protezioni innovative



Indice

1	Introduzione	4
1.1	Stato dell'arte	4
1.2	Obiettivo del progetto di ricerca	5
2	Modalità d'azione degli agenti di protezione superficiale	6
2.1	Rivestimenti organici non reattivi	6
2.2	Agenti di protezione superficiale reattivi inorganici o inorganici/organici	6
2.3	Agenti di protezione superficiale utilizzati	7
3	Procedura di prova e misure preparatorie	8
3.1	Work Package	8
3.2	Work Package 1 e 2: Gestione del progetto e misure di comunicazione	8
3.3	Work Package 3: Influenza della logistica, della petrografia e dell'ambiente	8
3.4	Work Package 4: Influenza della pasta di cemento	12
3.5	Work Package 5: Influenza del sistema poroso, del contenuto del legante e del rapporto acqua/legante	14
3.6	Work Package 6: Altre influenze rilevanti	14
3.7	Work Package 7: Prove pratiche sulle costruzioni	16
3.8	Metodi di prova rilevanti	18
3.9	Metodi di prova che si discostano dalla norma	18
4	Esecuzione e valutazione delle prove	22
4.1	Work Package 3	22
4.2	Tipi di calcestruzzo utilizzati e proprietà	23
4.3	Valutazione dei test principali	26
4.4	Verifiche supplementari nell'ambito del Work Package 3	31
4.5	Risultati dal Work Package 3	34
4.6	Work Package 4	35
4.7	Tipi di calcestruzzo utilizzati e proprietà	36
4.8	Valutazione dei test	37
4.9	Conclusione	40
4.10	Work Package 5	41

4.11	Produzione di calcestruzzo e proprietà	41
4.12	Valutazione dei test	43
4.13	Conclusione	45
4.14	Work Package 6	46
4.15	Condizioni ambientali e post-trattamento	46
4.16	Durabilità e successiva applicazione	50
4.17	Prove del fuoco	53
4.18	Work Package 7	57
4.19	A12 Galleria Senftenberg	57
4.5.2	A12 raccordo Kufstein Süd	59
4.5.3	S16 Sannabrücke	61
4.5.4	A13 Travi perimetrali dell'Europabrücke	62
4.5.5	B180 Niklasgalerie	64
4.5.6	L13 Tafelweggalerie	65
4.5.7	L36 Cavalcavia della pista di fondo Seefeld	66
4.5.8	LS114 Plan	67
4.5.9	SS44 Passo di Giovo 10° tornante	68
4.5.10	SS238 Strada delle Palade KM 10	69
4.5.11	SS238 Strada delle Palade KM 16	70
4.6	In breve	71
4.6.1	Effetto degli agenti di protezione superficiale reattivi	71
4.6.2	Effetto dei rivestimenti non reattivi	72
4.6.3	Ulteriori risultati	72
5	Misure di comunicazione	73
5.1	Incontri	73
5.2	Eventi pubblici	74
5.3	Opuscolo	75
5.4	Pagina iniziale	76
5.5	Notizie riportate dai media	77
5.6	Poster e roll up	78
A	Elenchi	80
A.1	Bibliografia	80
A.2	Indice delle tabelle	80
A.3	Indice delle figure	81
A.4	Diagramma	82

1 Introduzione

Le difficoltà che si incontrano durante le costruzioni non si fermano davanti alle frontiere nazionali ma riguardano allo stesso modo tutto il territorio del Tirolo e dell'Alto Adige. Le opere strategiche in calcestruzzo sono esposte agli influssi regionali, caratterizzati principalmente dalle condizioni climatiche prevalenti e dalle risorse di materie prime disponibili sul territorio dell'area alpina. Tuttavia, queste peculiarità regionali a volte non ricevono sufficiente considerazione nelle leggi e nelle norme europee e nazionali. Le conseguenze di questa mancata integrazione delle condizioni regionali, a seconda della costruzione e del carico, causano danni, alcuni dei quali più gravi, che hanno un'influenza decisiva sulla durabilità delle costruzioni. Nell'ambito di questo progetto, il know-how sovraregionale deve essere riunito e combinato in un pool di conoscenze comuni.

Grazie alle nuove protezioni superficiali, gli intervalli di riparazione e l'intero ciclo di vita delle opere in calcestruzzo devono essere notevolmente aumentati. Test di laboratorio, applicazioni pratiche e il monitoraggio delle costruzioni sono alla base del presente progetto di ricerca. L'applicazione pratica dei risultati ottenuti in laboratorio dovrebbe garantire la plausibilità degli esami di laboratorio e l'idoneità all'uso.

1.1 Stato dell'arte

A seconda della costruzione e del carico, ci sono tipi molto diversi di danni. Nel caso delle opere in calcestruzzo, si va dai danni locali alle lesioni su larga scala e ad una perdita totale prematura di funzionalità o di sicurezza strutturale.

La superficie dei componenti, in particolare, è un punto sensibile di attacco, che influenza in modo significativo la durabilità dei singoli componenti o l'intera costruzione. È quindi essenziale adottare misure di protezione (ad esempio, la produzione di rivestimenti) o, se necessario, effettuare lavori di riparazione intensivi. I metodi attualmente utilizzati sono molto discutibili a causa della loro bassa longevità.

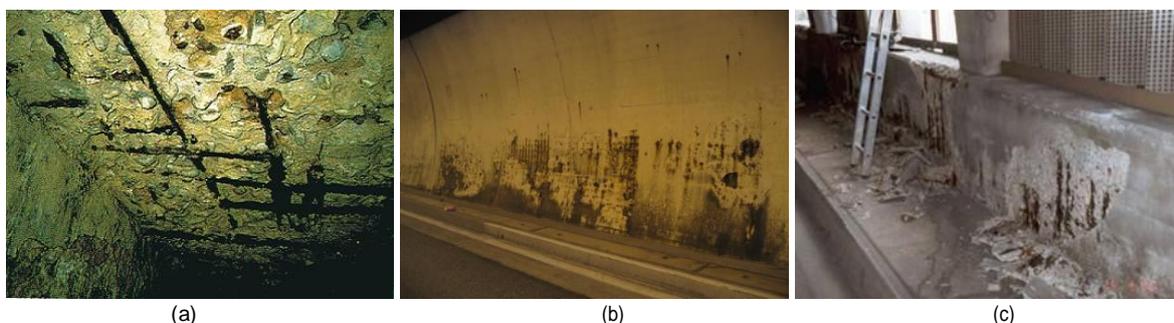


Figura 1.1: Figure di lesioni esemplari

1.2 Obiettivo del progetto di ricerca

L'obiettivo di questo progetto di ricerca è utilizzare nuove protezioni superficiali per strutture portanti in calcestruzzo per aumentare la durata di vita delle opere in calcestruzzo nell'ambito di un'ottimizzazione strutturale e di costi di gestione della manutenzione.

Occorre pertanto perseguire i seguenti obiettivi:

- Minimizzazione delle riparazioni intermedie
- Estensione degli intervalli di riparazione generale
- Aumento della vita utile
- Riduzione dei costi per le misure di protezione e riparazione necessarie

L'attenzione si concentra sulle costruzioni ingegneristiche nel settore delle infrastrutture nel territorio alpino, poiché queste sono soggette a condizioni speciali,

tra cui:

- le condizioni climatiche
- le sollecitazioni da agenti antigelo

2 Modalità d'azione degli agenti di protezione superficiale

Secondo l'opera di Park u.a. (2014) gli agenti di protezione superficiale (APS) possono essere classificati nel gruppo dei rivestimenti organici non reattivi e nel gruppo degli agenti di rivestimento superficiale inorganici reattivi o inorganici/organici.

2.1 Rivestimenti organici reattivi

I rivestimenti organici vengono utilizzati per cercare di rendere la superficie del calcestruzzo idrofobica, evitando così la penetrazione dell'acqua nella superficie in calcestruzzo e proteggendo la superficie in calcestruzzo. Questi rivestimenti hanno il vantaggio di essere economici e facili da applicare. Tuttavia, i rivestimenti contengono spesso composti organici volatili, che sono associati all'emissione di inquinanti atmosferici sia durante la produzione che durante l'applicazione.

I rivestimenti hanno anche una durata limitata, poiché hanno proprietà fisiche diverse da quelle della base in calcestruzzo. Oltre alle diverse dilatazioni termiche, va menzionato anche il ritiro dello strato protettivo dopo l'applicazione. Nella maggior parte dei casi, viene impedita anche la diffusione del vapore acqueo, con conseguente formazione di bolle e una successiva rimozione del rivestimento.

2.2 Agenti di rivestimento superficiale reattivi inorganici o inorganici/organici

La base per questi agenti di protezione superficiale è l'uso di vetro solubile, che reagisce principalmente con la pietra di cemento ed eventualmente, in caso di aggregati di silicato, anche con questi aggregati.

Nelle opere di Park u.a. (2014) e Youn (2010) i vetri solubili sono descritti come silicati alcalini solubili in acqua, con la formula $Me_2O_n SiO_2$, o come soluzioni acquose dei silicati. Qui Me sta per sodio (Na), potassio (K) o litio (Li) e n per il rapporto molare tra il biossido di silicio (SiO_2 , acido silicico) e l'ossido metallico alcalino (Me_2O).

L'effetto solidificante del vetro solubile si ottiene mediante neutralizzazione idrativa. Il vetro solubile reagisce con l'idrossido di calcio ($Ca(OH)_2$) e forma così nuove fasi di idrato di silicato di calcio (fasi C-S-H). Inoltre, la condensazione della soluzione acquosa produce anche acido metasilicico ad alto peso molecolare con formazione di gel di silice solidificante. Oltre all'effetto solidificante, il gel di silice e le fasi cristalline riducono la quantità di spazio libero dei pori, riempiono le microfessure e le collegano alla microstruttura del calcestruzzo (vedere figura 2.1). Questo riduce notevolmente la permeabilità della superficie in calcestruzzo.

Le fasi C-S-H che ne risultano e il gel di silice sono già parte della pietra di cemento non protetto e quindi hanno le sue stesse proprietà fisiche. A differenza dei rivestimenti non reattivi (capitolo 2.1), qui non viene applicato alcuno strato protettivo, ma viene modificata la microstruttura nel calcestruzzo sulla superficie. In questo modo non si verifica alcun fenomeno termico o meccanico

Nella produzione di calcestruzzi resistenti all'attacco dei cicli gelo/disgelo senza agenti antigelo (classe di esposizione da XF2 a XF4), nel calcestruzzo fresco vengono introdotti micro pori d'aria artificiali al fine di interrompere la continuità dei capillari e creare uno spazio per la formazione del ghiaccio. Utilizzando il vetro solubile, questi micro pori d'aria potrebbero essere chiusi o il loro volume ridotto e quindi la resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con e senza agenti antigelo potrebbe essere inferiore.

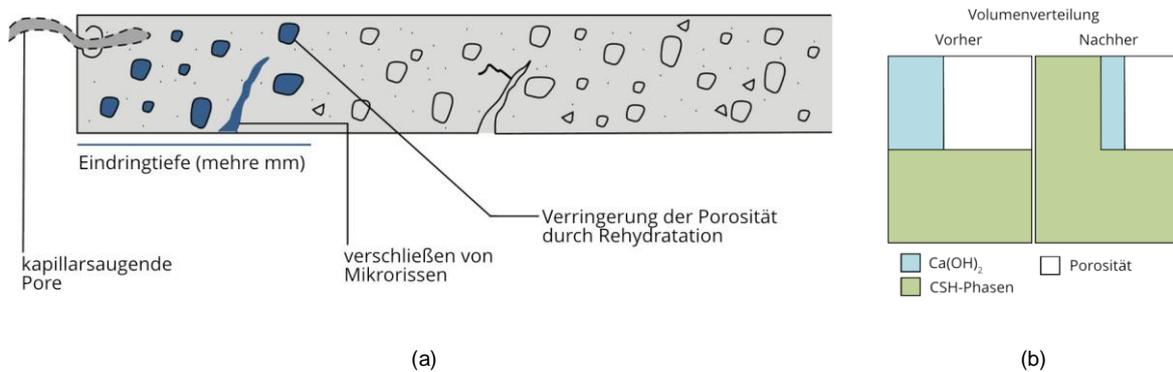


Figura 2.1: Influenza del vetro solubile sul sistema dei pori. Secondo Park u. a. (2014)

2.3 Agenti di protezione superficiale utilizzati

La tabella 2.1 mostra tutti gli agenti di protezione superficiale utilizzati in questo progetto di ricerca. Per le verifiche principali sono stati utilizzati gli *agenti di protezione superficiale 1 e 2*. Sulla base dei risultati della valutazione dei primi test, anche gli *agenti di protezione superficiali da 3 a 5* sono stati inclusi nell'ambito delle verifiche principali.

Gli *agenti di protezione superficiale da 6 a 9* sono stati utilizzati solo nell'ambito dello studio preliminare di questo progetto di ricerca. Nell'ambito di questo studio preliminare sono già state rivestite alcune superfici di costruzioni (vedere capitolo 3.1.6).

Agenti di protezione superficiale utilizzati	
APS 1	Legante contenente litio a base di silicato di potassio
APS 2	Legante inorganico a base di silicati alcalini
APS 3	Impregnante a base di silicati di litio puri modificati
APS 4	Tattamento idrofobico a base di alcossisilani alchilici
APS 5	Rivestimento a base di acrilati
APS 6	Legante silicato a base di sali di litio
APS 7	Legante inorganico a base di silicato di potassio
APS 8	Tattamento idrofobico a base di trietossisobutilsilano
APS 9	Tattamento idrofobico a base di alchilalcossisilano

Tabella 2.1: Agenti di protezione superficiale utilizzati

3 Procedura del test e misure preparatori

3.1 Work Package

L'uso e la funzionalità degli agenti di protezione superficiale (APS) dipende da vari fattori di influenza e dalle loro interazioni. Per garantire una visione sistematica, nella tabella 3.1 sono stati definiti i Work Package (WP). elencati.

L'obiettivo era quello di separare al meglio le influenze per ridurre al minimo le interazioni. Nel corso delle verifiche, tuttavia, è stato possibile determinare interazioni imprevedibili che hanno reso necessarie modifiche al programma di test previsto.

3.1.1 Work Package 1 e 2: Gestione del progetto e misure di comunicazione

I Work Package 1 e 2 contengono processi di supporto, che garantiscono un'elaborazione ordinata e una comunicazione coordinata interna ed esterna.

I resoconti di seminari e conferenze, i verbali degli incontri, la pagina iniziale e le notizie fornite dai media sono presentati nel capitolo 5.

3.1.2 Work Package 3: Influenza della logistica, della petrografia e dell'ambiente

Nel Work Package 3 sono state analizzate le influenze esterne e l'influenza degli aggregati sulla funzionalità degli agenti di protezione superficiale utilizzati.

Sono state considerate le seguenti variabili di influenza:

- Manto della cassaforma
- Orientamento dei componenti
- Pre-trattamento
- Temperatura ambiente
- Tipo di applicazione degli agenti di protezione superficiale
- Aggregati

Poiché l'influenza del legante è stata analizzata solo in un Work Package successivo, come legante per tutti i getti di calcestruzzo è stato utilizzato un cemento normale della famiglia CEM II/A-M(S-L) 42,5 N. Nel corso

Work Package	Titolo
WP 1	Gestione del progetto
WP 2	Misure di comunicazione Influenza della logistica, della
WP 3	petrografia e dell'ambiente
WP 4	Influenza della pasta di cemento Influenza del sistema di pori, del
WP 5	contenuto del legante e del rapporto acqua/legante
WP 6	Altre influenze rilevanti
WP 7	Prove pratiche

Tabella 3.1: Classificazione dei Work Package

delle prove effettuate sui campioni del primo getto di calcestruzzo è stato riscontrato che il tipo di calcestruzzo utilizzato non era sufficientemente resistente all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo, motivo per cui questa operazione di getto è stata ripetuta con una composizione del calcestruzzo modificata (dettagli nel capitolo 4.1).

Per le verifiche principali del Work Package 3, in laboratorio sono state prodotte piastre di prova di 80 cm x 60 cm x 10 cm in casseforme erette. A causa della massa della cassaforma riempita, per la compattazione non è stato possibile utilizzare un tavolo vibrante, bensì un vibratore per bottiglie. A tal fine, è stata prodotta una piastra di prova separata per ogni variabile di influenza analizzata e per ogni agente di protezione superficiale analizzato. La disposizione dei campioni all'interno di una piastra di prova e le sue dimensioni sono disponibili nella figura 3.1.

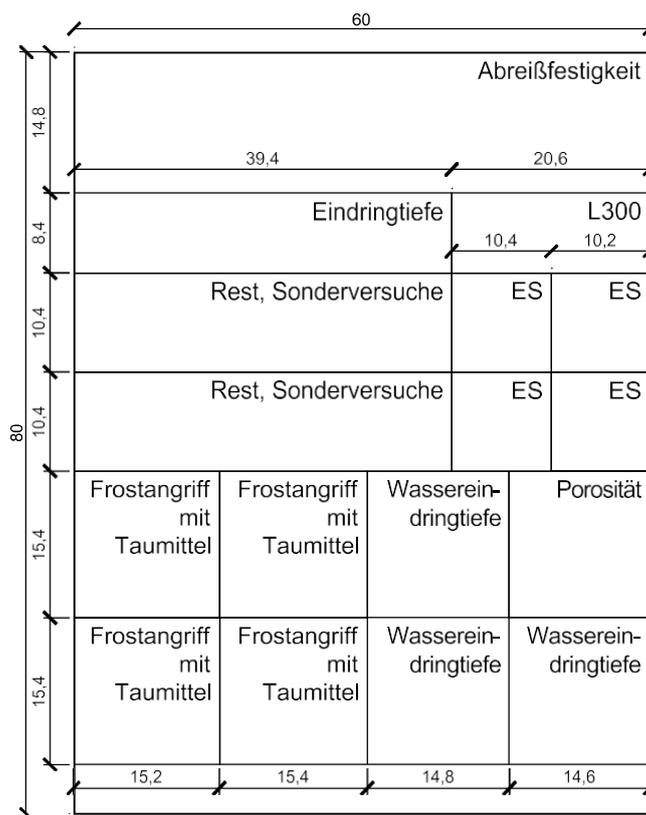


Figura 3.1: Disposizione dei campioni all'interno delle piastre di prova. Tutte le misure in cm.

AA. . . Attacco acido (stoccaggio acido acetico)

Manto della cassaforma

Soprattutto nel caso di getti di calcestruzzo di componenti verticali, sulla superficie della cassaforma è presente un contenuto d'acqua maggiore (aumento del rapporto acqua/legante: valore acqua/legante). L'acqua in eccesso porta alla formazione di un maggior numero di pori capillari sulla superficie del calcestruzzo e quindi ad una maggiore porosità, che a sua volta compromette la qualità della microstruttura del calcestruzzo. I manti assorbenti delle casseforme possono assorbire parte dell'acqua in eccesso sulla superficie della cassaforma e contribuire così ad un miglioramento della qualità. Poiché la produzione e soprattutto l'uso di manti assorbenti delle casseforme in pannelli grezzi richiede tempo e denaro aggiuntivi, in alcuni casi vengono utilizzati anche tessuti non tessuti con una modalità d'azione simile. Nell'ambito delle verifiche è stata analizzata l'influenza dei diversi manti delle casseforme sulla qualità del calcestruzzo sulla superficie della cassaforma e l'influenza delle superfici sulle modalità d'azione degli agenti di protezione superficiale.

Sono stati utilizzati i seguenti manti delle casseforme:

- Betoplan (pellicola-pellicola-pannello)
- Acciaio
- Pannello Multiplex, non rivestito (di seguito denominato “legno”)
- Tessuto non tessuto

Al posto dei pannelli grezzi, sono stati utilizzati pannelli Multiplex omogenei nella loro struttura superficiale, poiché, considerando che le aree di prova sono relativamente piccole, le disomogeneità dei pannelli grezzi avrebbe potuto influire significativamente sui risultati della verifica. La figura 3.2 mostra la struttura schematica delle casseforme e le strutture superficiali ottenute durante il primo getto di calcestruzzo con i rispettivi manti delle casseforme.

Al fine di garantire che le dimensioni dei campioni di prova non superassero le spese realizzabili, è stata prodotta una piastra di prova per ciascun agente di protezione superficiale e per ciascun manto della cassaforma analizzati e rivestiti come mostrato nella figura 3.3(b). Per le altre verifiche, tutte le piastre di prova sono state prodotte con un manto della cassaforma di Betoplan.

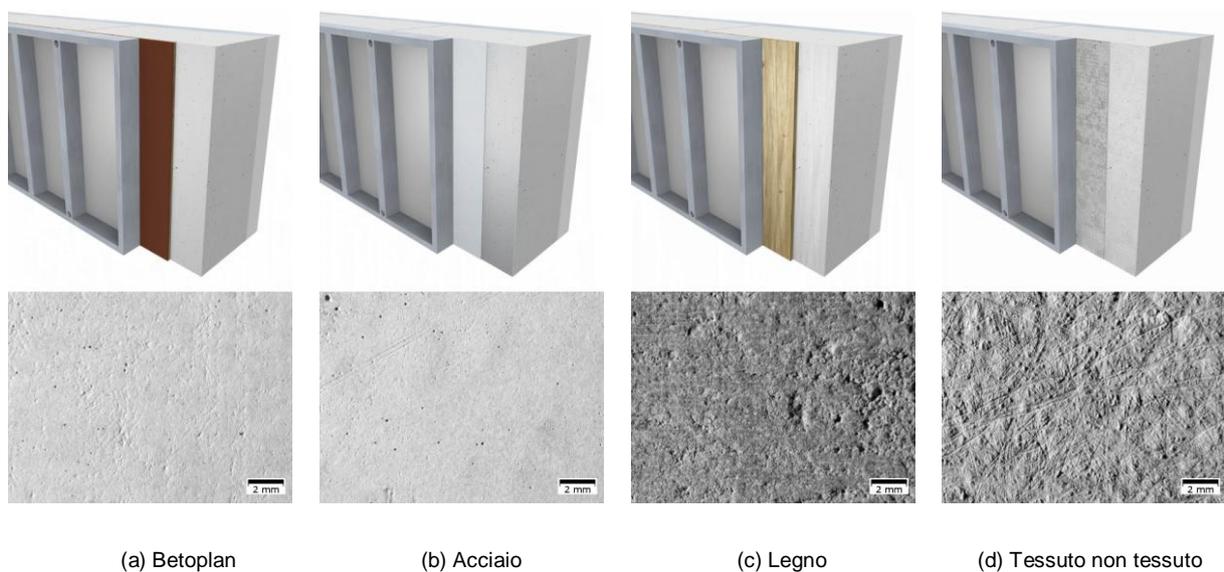


Figura 3.2: Manti delle casseforme analizzati con la struttura della superficie associata

Orientamento dei componenti

Per determinare l'influenza dell'orientamento del componente sul comportamento di penetrazione degli agenti di protezione superficiali, il rivestimento delle piastre di prova con gli agenti di protezione superficiale è stato applicato in posizione orizzontale (figura 3.3(a)), verticale (figura 3.3(b)) e sopra la testa (figura 3.3(c)). Come si può vedere nella figura 3.3, l'influenza dell'orientamento dei componenti è stata presa in considerazione anche nelle altre variabili analizzate.

Pre-trattamento

Per la penetrazione e l'efficacia degli agenti di protezione superficiale è determinante la disponibilità di pori capillari aperti. Con un'asciugatura costante della superficie a 50°C in circa quattro giorni (dalla figura 3.3(d) alla figura 3.3(f)), si è cercato di rimuovere l'umidità dal sistema poroso per migliorare l'assorbimento degli agenti di protezione superficiale. Inoltre, la superficie in calcestruzzo è stata liberata dai residui di olio per casseforme mediante un lavaggio ad alta pressione a circa 200 bar. Queste misure sono state applicate solo alle piastre di prova in cui l'agente di protezione superficiale è stato applicato orizzontalmente (figura 3.3(g)).

Temperatura ambiente

Poiché nelle zone più alte del territorio alpino possono verificarsi temperature al di sotto del punto di congelamento già nei mesi autunnali e le proprietà reologiche degli agenti di protezione superficiale possono venire così alterate, è stato esaminato anche il comportamento degli agenti di protezione superficiale a temperature ambiente e di superficie del calcestruzzo di $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (dalla figura 3.3(h) alla figura 3.3(j)). Per raggiungere la temperatura della superficie desiderata, le piastre di prova sono state conservate per 24 ore a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'applicazione è stata eseguita anche a questa temperatura e le piastre di prova sono state poi conservate per altre 24 ore ad una temperatura di $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Infine, le piastre sono state mantenute a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ fino all'inizio delle verifiche.

Tipo di applicazione degli agenti di protezione superficiale

L'applicazione di agenti di protezione superficiale a spruzzo è il metodo più efficace in termini di efficacia del lavoro. Tuttavia, poiché non è stato possibile escludere un effetto positivo tramite la deformazione, è stata analizzata anche questa influenza (vedere da figura 3.3(k) a figura 3.3(m)).

Aggregati

Gli aggregati possono avere velocità di assorbimento diverse, pertanto non si può escludere un'influenza sull'assorbimento degli agenti di protezione superficiale e sulla loro efficacia. Per questo motivo, nelle verifiche sono stati presi in considerazione e analizzati due aggregati tipici della provincia e della regione dell'Alto Adige.

- Aggregati di calcite/dolomite (Tirolo)
- Aggregati di silicato (Alto Adige)

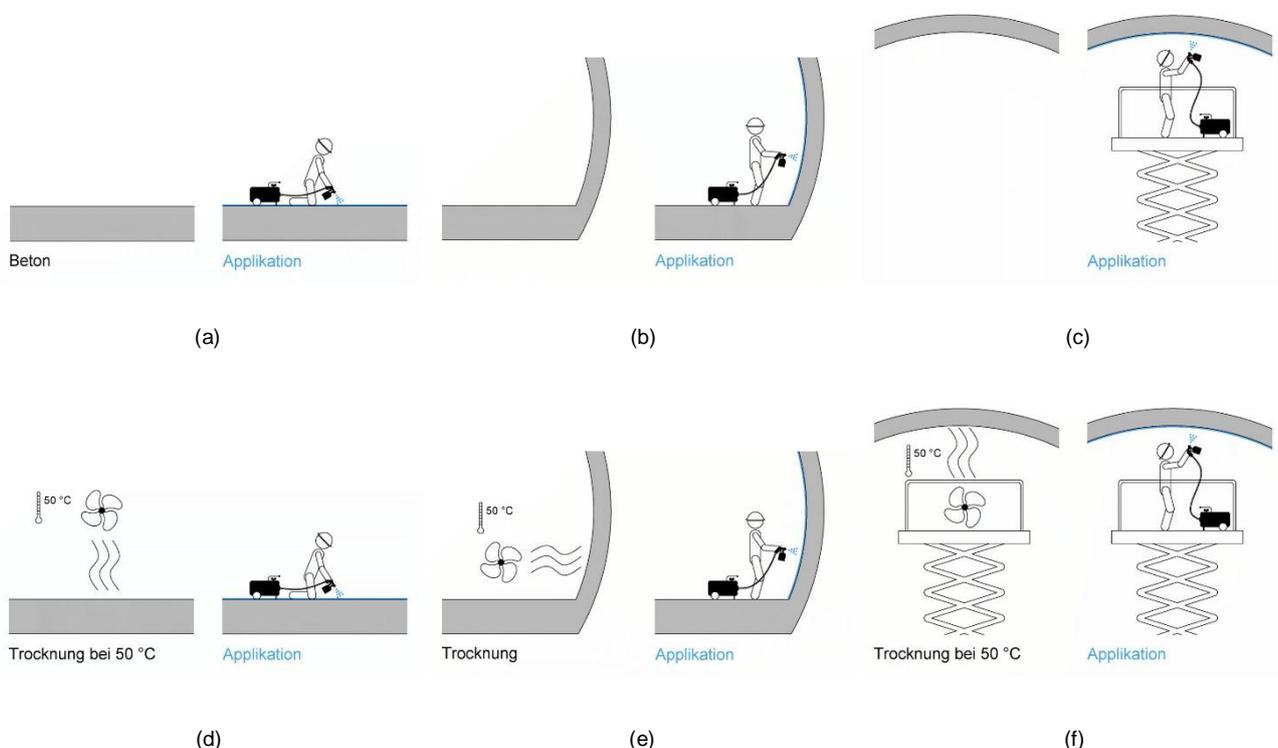


Figura 3.3: Pittogrammi degli orientamenti dei componenti analizzati, dei pre-trattamenti, delle temperature ambiente e dei tipi di applicazione

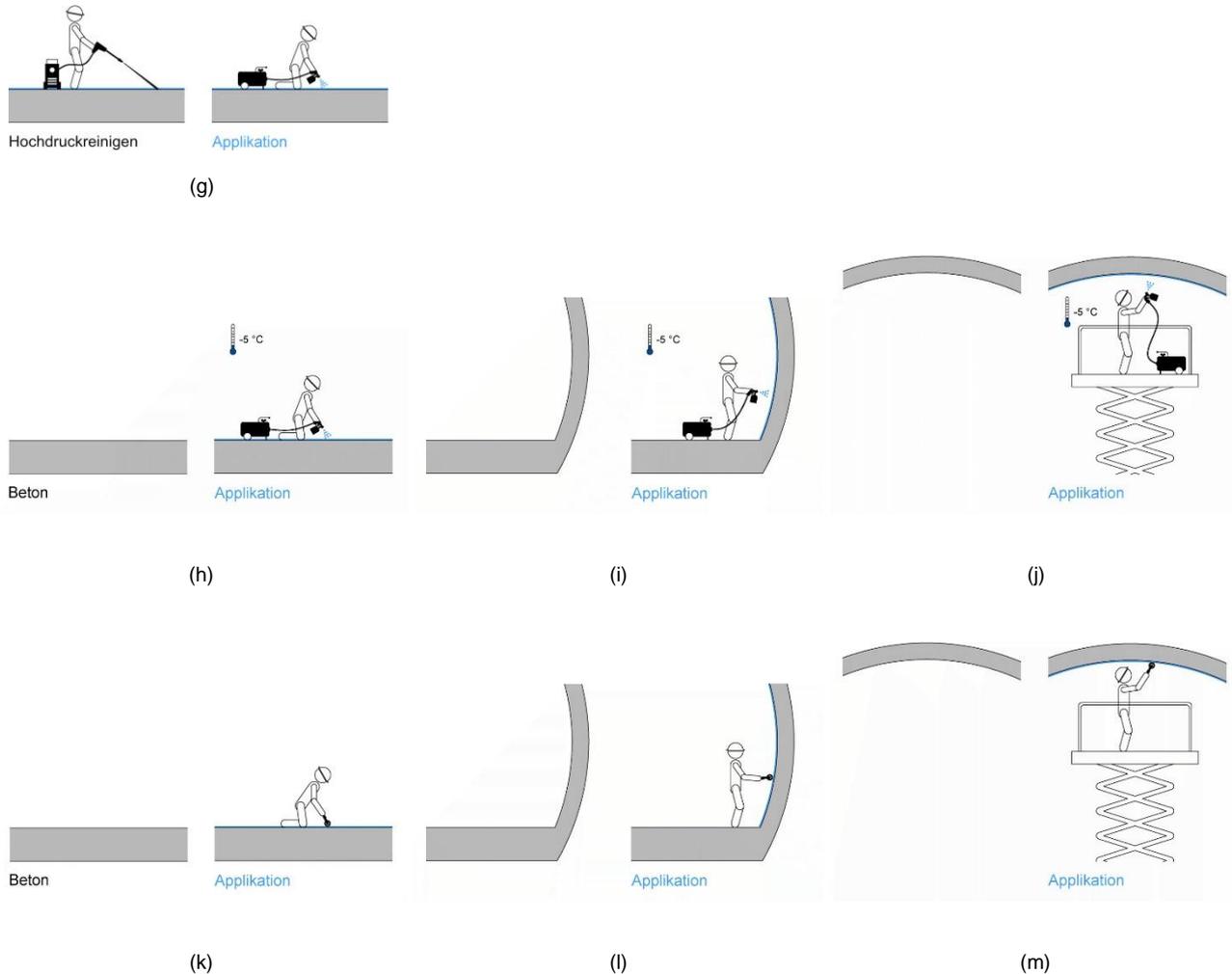


Figura 3.3: Pittogrammi degli orientamenti dei componenti analizzati, dei pre-trattamenti, delle temperature ambiente e dei tipi di applicazione

3.1.3 Work Package 4: Influenza della pasta di cemento

Poiché il vetro solubile reagisce con l'idrossido di calcio libero ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) della pasta di cemento, come descritto nel capitolo 2.2, si è supposto che il legante utilizzato abbia influito notevolmente sull'effetto degli agenti di protezione superficiale. Utilizzando i normali cementi con calcare macinato come additivo (abbreviazione LL), utilizzato principalmente in Alto Adige, si è cercato di aumentare il contenuto di idrossido di calcio.

Nel Work Package 4 è stata quindi analizzata l'influenza delle seguenti famiglie di cementi normali:

- CEM II/A-M(S-L) 42,5 N (legante standard in Tirolo)
- CEM I 42,5 R senza C_3A
- CEM II/A-LL 32,5 R (legante standard in Alto Adige)

Gli agenti di protezione superficiale analizzati nel Work Package 3, nelle verifiche non hanno mostrato la modalità d'azione positiva desiderata, pertanto sono stati inclusi nelle verifiche per il Work Package 4 tre ulteriori agenti di protezione superficiale (APS da 3 a 5). A causa delle disomogeneità riscontrate nelle piastre di prova del Work Package 3 prodotte in laboratorio (per i dettagli vedere il capitolo 4.1.4), le piastre di prova di questo Work Package sono state prodotte in una fabbrica di prefabbricazione nelle dimensioni di 100 cm × 140 cm × 10 cm. Per ogni famiglia di cemento testato sono state prodotte cinque di queste piastre di prova. Una di esse è stata utilizzata in sostituzione delle piastre di prova rivestite in calcestruzzo del Work Package 3, per le prove a lungo termine del Work Package 6.

Youn (2010) ha esaminato l'efficacia del vetro solubile nel migliorare la resistenza all'usura dei pavimenti industriali. Tuttavia, non è stato possibile rilevare alcun miglioramento significativo della resistenza all'usura. Oltre alla resistenza all'usura, è stato analizzato solo l'assorbimento di acqua capillare per mezzo di tubi di Karsten. Durante alcune consultazioni con i produttori di pavimenti industriali, è stato menzionato che l'uso di agenti di protezione superficiale può aumentare la resistenza allo strappo. Poiché questo effetto non era chiaramente visibile nelle verifiche del Work Package 3, si è deciso di testare due delle piastre di prova sulla superficie spogliata del calcestruzzo e due sulla superficie inferiore della cassaforma. Poiché anche le travi perimetrali sono sottoposte al carico principale sulla superficie spogliata del calcestruzzo, è stato deciso di testare la resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con un agente antigelo sulla superficie spogliata del calcestruzzo.

I campioni necessari per le verifiche sono stati prelevati dalle piastre di prova. Come rappresentato nella figura 3.4, si è cercato di distribuire i singoli campioni di prova nel modo più uniforme possibile su tutta la piastra di prova. Prima dell'applicazione, i campioni sono stati puliti con un'idropulitrice ad alta pressione a circa 200 bar, per eliminare eventuali residui di olio per casseforme e altre impurità. Gli agenti di protezione superficiale sono stati applicati dopo 21 giorni a 20 °C.

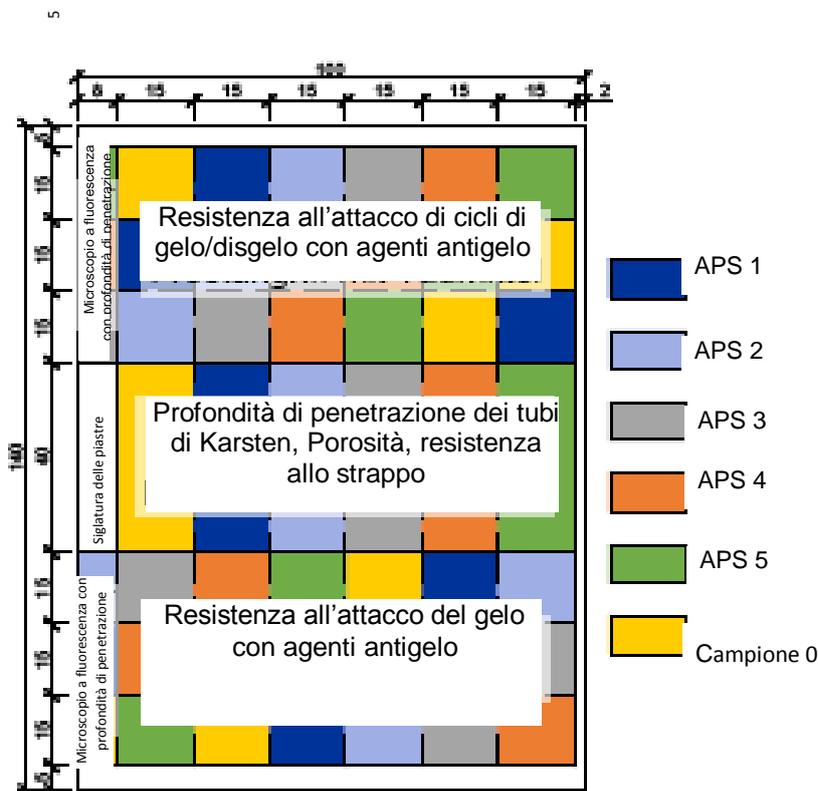


Figura 3.4: Disposizione dei campioni all'interno delle piastre di prova. Tutte le misure in cm. Le domande sulla differenziazione degli agenti di protezione superficiale saranno utilizzate anche nella valutazione delle verifiche del capitolo 4.

Sulla base dei risultati ottenuti dal Work Package 3, sono state analizzate solo la profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale, la porosità totale e la resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo. Per ridurre l'influenza delle variazioni di omogeneità sul risultato della prova, è stato aumentato il numero di campioni per serie di verifiche e quindi il numero dei risultati individuali. L'obiettivo era quello di identificare meglio i valori di picco inevitabili e poterli quindi escludere dalla verifica.

3.1.4 Work Package 5: Influenza del sistema poroso, del contenuto del legante e del rapporto acqua/legante

L'introduzione di micropori d'aria artificiali, da un lato, aumenta la resistenza del calcestruzzo all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo, dall'altro, porta ad un'interruzione della continuità dei capillari e di conseguenza ad una riduzione dell'assorbimento. A causa della ridotta capacità di assorbimento, si presume che gli agenti di protezione superficiale abbiano una profondità di penetrazione inferiore. Inoltre, come indicato nel capitolo 2.2, non si può escludere che gli agenti di protezione superficiale possano chiudere i micropori d'aria o ridurre il volume, il che a sua volta ha un effetto negativo sulla resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo.

I pori capillari decisivi per la penetrazione degli agenti di protezione superficiale si formano dall'acqua in eccesso durante l'idratazione della colla legante. Per questo motivo, si è supposto che il rapporto acqua/legante abbia un'influenza decisiva anche sull'effetto degli agenti di protezione superficiale. Lo scopo di questo Work Package era quindi quello di valutare l'influenza del sistema poroso, del contenuto di legante e il rapporto acqua/legante sulla modalità d'azione degli agenti di protezione superficiale.

Poiché le verifiche del Work Package 3 sull'influenza dell'applicazione a spruzzo e a rullo degli agenti di protezione superficiale e sull'influenza degli aggregati non hanno fornito alcuna indicazione chiara a causa della dispersione dei risultati di misura, queste verifiche sono state ripetute in questo Work Package.

L'effetto più favorevole del Work Package 4 è stato mostrato dagli agenti di protezione superficiale su un calcestruzzo prodotto con cemento normale della famiglia CEM II/A-LL 32.5 R. Questo è stato utilizzato anche per la produzione di tutti gli altri campioni.

Per ottenere una compattazione il più omogenea possibile del calcestruzzo, sono state prodotte travi di 15 cm x 10 cm x 60 cm e compattate su un tavolo vibrante. Successivamente i campioni sono stati estratti dalle travi e puliti e, dopo 21 giorni, sono stati applicati gli agenti di protezione superficiale.

Non sono stati impiegati rivestimenti organici non reattivi, *agenti di rivestimento superficiale 4 e 5*. Sulla base dei risultati del Work Package 4, sono stati utilizzati nuovamente gli *agenti di protezione superficiale 1 e 2*, come nel Work Package 3, poiché questi mediamente hanno mostrato l'effetto più positivo degli agenti di protezione superficiale reattivi.

3.1.5 Work Package 6: Altre influenze rilevanti

Le verifiche del Work Package 6, il cui ambito di applicazione comprende i risultati dei Work Package da 3 a 5, sono state divise nei seguenti gruppi:

Condizioni ambientali e di post-trattamento

Il sistema di pori sulla superficie del calcestruzzo può essere chiuso con agenti disarmanti e di post-trattamento, il che influisce negativamente sul comportamento di penetrazione degli agenti di protezione superficiale. Inoltre, l'applicazione anticipata degli agenti di protezione superficiale può avere effetti simili a quelli degli agenti di post-trattamento e portare ad un miglioramento della cavità del calcestruzzo, grazie alla riduzione dell'eliminazione dell'acqua e quindi del ritiro.

Come nel Work Package 5, sono state nuovamente utilizzate travi di 15 cm x 10 cm x 60 cm. Al fine di analizzare l'influenza degli agenti disarmanti e di post-trattamento, per ogni serie di queste barre non è stata effettuata alcuna pulizia prima dell'applicazione. Per analizzare la possibilità di utilizzare gli agenti di protezione superficiale come agenti di post-trattamento, questi sono stati applicati sulle travi subito dopo la scasseratura.

Inoltre, è stata anche analizzata la modalità d'azione degli agenti di protezione superficiale a basse temperature ambientali. Per questo motivo, a 5 °C sono state prodotte ulteriori travi, su una serie di queste travi gli agenti di protezione superficiale sono stati applicati immediatamente dopo la scasseratura, sulla seconda serie solo dopo sette giorni. Tutte le travi di questa parte di verifiche sono state conservate a 5 °C fino a sette giorni dopo la produzione.

Poiché le verifiche sull'influenza della temperatura dell'applicazione nell'ambito del Work Package 3 non hanno fornito alcuna indicazione chiara, questi test sono stati ripetuti. Poiché non si è potuto escludere, che gli agenti di protezione superficiale siano penetrati nella superficie solo dopo lo scongelamento, sono state effettuate ulteriori verifiche. A tale scopo, si è cercato di lavare con acqua a spruzzo gli agenti di protezione superficiale congelati e non ancora penetrati nella superficie, spruzzando con acqua le superfici rivestite dopo lo stoccaggio a -5 °C, durante la fase di scongelamento.

Durabilità e successiva applicazione

Le piastre di prova necessarie per questa verifica sono già state prodotte nel Work Package 4 e successivamente suddivise nelle seguenti tre sottopiastre:

- Dalla prima sottopiastra di 100 cm x 60 cm x 10 cm, sono stati prelevati i campioni per valutare la resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo, puliti e rivestiti dopo 21 giorni con i rimanenti campioni di prova del Work Package 4. Sono stati quindi rivestiti anche tutti gli agenti di protezione superficiale esaminati nel Work Package 4. Successivamente, questi campioni sono stati puliti mensilmente con un'idropulitrice ad alta pressione a circa 200 bar.
- La seconda sottopiastra di dimensioni di 75 cm x 50 cm x 10 cm è stata solo sottoposta a carbonatazione tramite CO₂ dell'aria.
- La superficie di prova della terza sottopiastra di 75 cm x 50 cm x 10 cm è stata sottoposta a una settimana di stoccaggio in una soluzione satura di NaCl e a una settimana di stoccaggio all'aria. Questo ciclo è stato mantenuto per un anno.

Dopo un anno, sono stati tagliati i campioni dalla seconda e la terza sottopiastra e sono stati applicati gli *agenti di protezione superficiale 1 e 2*. Successivamente, tutti i campioni di prova delle tre sottopiastre sono stati testati per la loro resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo.

Prove del fuoco

In caso di incendio, il riscaldamento del calcestruzzo provoca le seguenti modifiche alla struttura del calcestruzzo e le proprietà tecniche dovute a processi chimico-mineralogici e fisici. Oltre alla dilatazione termica del calcestruzzo e alla trasformazione chimica delle rocce, si può osservare anche un ritiro della pasta di cemento. A causa di tali modifiche può verificarsi una perdita di durezza e lesioni sulla superficie. Ciò significa che per tutta la durata dell'incendio, la sezione trasversale può essere indebolita o l'armatura può essere liberamente esposta, limitando così la capacità portante dei componenti.



Figura 3.5: Rendering del livello del fuoco in fase di progettazione

A temperature fino a 100 °C l'acqua libera e fisicamente legata evapora nel calcestruzzo. A temperature più elevate, anche l'acqua chimicamente legata viene espulsa dalla pasta di cemento. A causa della modalità d'azione degli agenti di protezione superficiale reattivi, si riduce la porosità del calcestruzzo (vedere il capitolo 2.2). A causa della ridotta porosità, la permeabilità è limitata, per cui nel calcestruzzo può formarsi una pressione di vapore. Per verificare se, a causa della minore permeabilità, le lesioni aumentano o vengono ridotte dal miglioramento della microstruttura, sono state effettuate prove di resistenza al fuoco. Poiché nella regione non esiste un banco prova adatto, è stato progettato e costruito un banco prova (vedere figura 3.5).

Oltre alla difficoltà di trovare partner adeguati per la realizzazione, non è stato facile, all'inizio, trovare isgiusti referenti tra le autorità per portare il concetto in una condizione che potesse essere approvata, cosicché la fase concettuale è durata diversi mesi. A causa della vicinanza alle proprietà vicine, è stato necessario erigere un muro di protezione antincendio sul sito operativo previsto.

3.1.6 Work Package 7: Prove pratiche sulle costruzioni

Nel corso della costruzione e riparazione di nuove infrastrutture nelle regioni del Tirolo e dell'Alto Adige, sono stati trattati componenti con diversi agenti di protezione superficiale per poterne valutare l'effetto nell'uso pratico. In particolare, sono stati inclusi nella verifica dei componenti fortemente sollecitati come le travi perimetrali e gli imbocchi di gallerie. Alcuni di questi componenti sono già stati utilizzati durante le prove tattili, motivo per cui alcuni agenti di protezione superficiale sono utilizzati solo in questo Work Package.

A12 Galleria Senftenberg

Da giugno a settembre 2016, la Galleria Senftenberg sulla A12 o Inntal Autobahn tra lo svincolo di Mils e il semi svincolo di Schönwies è stata restaurata in direzione di Innsbruck. Su tutta la lunghezza della galleria è stato installato un guscio interno.

La prima applicazione in prossimità dell'imbocco est ha avuto luogo il 20.07.2015, mentre nell'area dell'imbocco ovest il 21.09.2015. In entrambe le applicazioni sono stati impiegati sei agenti di protezione superficiale ed è stato selezionato un blocco aggiuntivo come *campione 0*. Il tubo rimanente è stato rivestito con un tradizionale rivestimento per tunnel.

A causa del carico più elevato, le ulteriori verifiche sono state limitate alle superfici di prova nell'area dell'imbocco ovest, ovvero l'imbocco della carreggiata in direzione di Innsbruck. Al fine di danneggiare il meno possibile la costruzione, le ulteriori verifiche si sono limitate alla determinazione del contenuto di cloruro in due livelli di profondità fino a max. 4 cm di profondità. Il campionamento è stato effettuato il 09.07.2019.

A12 raccordo Kufstein Süd

Il ponte che va dalla B173 Eiberg Straße allo svincolo di Kufstein-Süd della A12 Inntal Autobahn è stato riparato nel 2015. Il getto di calcestruzzo della trave perimetrale nell'area di prova ha avuto luogo il 15.07.2015. Il 22.07.2015 quattro blocchi sul lato nord del ponte sono stati rivestiti per metà con un agente di protezione superficiale, mentre il resto è servito come *campione 0*.

Come nella Galleria Senftenberg, il 09.07.2019 sono stati prelevati campioni per determinare il contenuto di cloruro.

S16 Sannabrücke

Con la costruzione del secondo tubo del Perjentunnel, è stato necessario costruire un nuovo ponte sul fiume Sanna, nella zona dello svincolo Landeck-West. Le superfici di prova per i quattro agenti di protezione superficiale e il *campione 0* si trovano sul bordo sud-est della trave (bordo destro della carreggiata) e sono state rivestite l'8.11.2015.

Poiché l'autorizzazione al traffico per il 2° tubo del tunnel, e quindi anche per la Sannabrücke, è stata concessa solo il 17.12.2018, la trave perimetrale è stata impiegata per una verifica dei bassi carichi.

A13 Europabrücke

Nel corso della riparazione del ponte BB14b tra l'area di sosta di Schönberg e il ponte Europabrücke, è stata rinnovata la trave perimetrale della carreggiata sovrastante in direzione di Innsbruck sopra la A13 Autostrada del Brennero. La trave perimetrale è stata rivestita in calcestruzzo il 26.08.2015 e le quattro superfici di prova sono state rivestite il 03.11.2015.

Come nella Galleria Senftenberg, il 09.07.2019 sono stati prelevati campioni per determinare il contenuto di cloruro. A causa del cantiere sull'Europabrücke, il campionamento ha potuto essere effettuato solo sul lato superiore della trave perimetrale.

B180 Niklasgalerie

Nel 2015 è stata costruita la Niklasgalerie nell'area della fortezza di Nauders. Il 21.04.2016 quattro dei 18 blocchi sono stati rivestiti con agenti di protezione superficiale.

L13 Tafelweggalerie

A causa di una frana avvenuta nel 2015 che ha reso impraticabile per diverse settimane la L13 Sellraintalstraße, per proteggere questo tratto di strada è stato deciso di costruire una galleria di protezione contro le colate detritiche nei mesi di giugno e luglio 2016. Le superfici di prova per i due agenti di protezione superficiale si trovano nell'area dell'imbocco est e sono state rivestite il 20.06.2017.

L36 Cavalcavia della pista di fondo Seefeld

Nei mesi di settembre e ottobre 2016, sulla L36 Möserer Landesstraße è stato costruito un cavalcavia della pista di fondo nell'area dello stadio della Coppa del Mondo. Le superfici di prova per i due agenti di protezione superficiale si trovano a nord di Ulmen nella zona dell'imbocco sul lato di Seefeld e sono state rivestite il 20.06.2017.

LS114 Plan

Nel 2017 è stata riparata la corsia di emergenza nella zona del chilometro stradale 8,0 della SP/LS114 tra Moso in Passiria e Plan. Due aree sono state rivestite con agenti di protezione superficiale e un'area di riferimento è stata utilizzata come *campione 0*.

SS44 Passo di Giovo 10° tornante

Nel 2015 è stata riparata la corsia di emergenza della zona del tornante 10 della SS44 Passo di Giovo. La trave perimetrale è stata disarmata e pulita il 07.07.2015. I quattro agenti di protezione superficiale sono stati applicati il 15.07.2016.

SS238 Strada delle Palade KM 10

Nell'area del chilometro stradale 10,0 della SS238, il 24.10.2017 è stata rivestita in calcestruzzo una nuova corsia di emergenza. Il 30.10.2017, due aree sono state rivestite con agenti di protezione superficiale e nel mezzo è stato lasciato libero un *campione 0*. Il 04.04.2018 quest'area è stata valutata dal punto di vista ottico.

SS238 Strada delle Palade KM 16

Nel corso dello studio preliminare, nella zona del chilometro stradale 16, il 22.09.2015 una corsia di emergenza è stata rivestita con quattro agenti di protezione superficiale.

3.2 Metodi di prova rilevanti

Test del calcestruzzo	Quadro normativo
Determinazione della consistenza	EN 12350-5
Determinazione della densità del calcestruzzo fresco	EN 12350-6
Contenuto d'aria nel calcestruzzo fresco	EN 12350-7
Determinazione del contenuto complessivo di acqua nel calcestruzzo fresco	ONR 23303
Determinazione dei parametri drenanti ad aria nel calcestruzzo indurito	EN 480-11
Determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione	EN 12390-8
Determinazione della resistenza all'attacco acido	ÖNORM B 3303 (1983)
Determinazione della resistenza all'attacco del gelo con agente antigelo	a norma ONR 23303
Determinazione della porosità totale	a norma ÖNORM B 3122
Determinazione della resistenza allo strappo	EN 1542
Resistenza al calore	Direttiva öbv "Aumento della protezione antincendio strutturale per costruzioni di trasporto sotterraneo in calcestruzzo"
Determinazione della resistenza alla carbonatazione	EN 13295
Determinazione del contenuto di cloruro	ÖNORM EN 14629
Determinazione della profondità di penetrazione degli agenti di penetrazione	Vedere il capitolo 3.2.1.6

Tabella 3.2: lista dei metodi di prova

3.2.1 Metodi di prova che si discostano dalla norma

3.2.1.1 Determinazione della profondità di penetrazione dell'acqua sotto pressione

Il livello di pressione della penetrazione dell'acqua è a norma EN 12390-8 (tre giorni a 5 bar con un diametro di 75 mm). Tuttavia, la valutazione ha rivelato grandi variazioni nella profondità massima di penetrazione dell'acqua. Per questo motivo, per la valutazione è stato preso in considerazione il valore medio (lunghezza laterale del rettangolo con la stessa area sotto la superficie di prova con \varnothing 100 mm) secondo la norma ONR 23303.

3.2.1.2 Determinazione della resistenza al gelo/disgelo con agente antigelo

Contrariamente alla norma, non è stata testata la sezione di campioni spessi (50 ± 2) mm, bensì la superficie della cassaforma e del calcestruzzo di campioni di spessore di 100 mm.

3.2.1.3 Determinazione della porosità totale

Questo metodo di prova è utilizzato per la determinazione della porosità totale della roccia, ma è adatto anche per la determinazione della porosità totale dei campioni di calcestruzzo.

Nell'ambito del Work Package 3 è stato dimostrato che non era possibile rilevare l'influenza degli agenti di protezione superficiale e dei manti delle casseforme ad una profondità > 2 cm. Pertanto, sono stati inclusi nella valutazione solo i risultati ottenuti sulla superficie.

Come indicato nel capitolo 4.1.2, nella valutazione del Work Package 3. non è stato possibile trovare una chiara correlazione tra la porosità totale e la profondità di penetrazione. Pertanto, i campioni di prova del Work Package 4 sono stati prelevati direttamente da sotto le superfici di prova dei tubi di Karsten (vedere capitolo 3.2.1.6).

3.2.1.4 Resistenza al fuoco

Le prove sono effettuate in conformità alla direttiva austriaca öbv – “Österreichische Bautechnik Vereinigung - Maggiore protezione antincendio strutturale per strutture stradali sotterranee in calcestruzzo”, senza l’impiego di microfibre plastiche, al fine di esaminare solo le modifiche dovute agli agenti di protezione superficiale. Il timore era che una possibile distribuzione disomogenea delle microfibre plastiche avrebbe avuto un effetto molto più incidente sulla resistenza e che gli effetti degli agenti di protezione superficiale sarebbero scomparsi.

Come è stato dimostrato nelle prove di regolazione del livello del fuoco, la resistenza al fuoco è data dalle microfibre plastiche, motivo per cui le prove sono state effettuate anche con prestazioni del bruciatore ridotte e quindi con temperature della zona del fuoco più basse. Inoltre, le prove sono state concluse 5 minuti dopo le prime lesioni ben udibili, poiché a quel punto le lesioni erano già arrivate sotto lo strato rivestito.

3.2.1.5 Determinazione del contenuto di cloruro

A differenza del procedimento con acido nitrico e la successiva titolazione potenziometrica, i cloruri sono stati estratti con acqua deionizzata e il contenuto di cloruro è stato determinato fotometricamente. Di conseguenza, il contenuto di cloruro è generalmente sottostimato, mentre la valutazione per test comparativi tra i *campioni 0* e i singoli agenti di protezione superficiale è sufficientemente accurata.

3.2.1.6 Determinazione della profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale

Per avere una visione più approfondita della funzionalità degli agenti di protezione superficiale utilizzati è fondamentale conoscere il comportamento di penetrazione nel calcestruzzo.

Nella prima fase, si è cercato di aggiungere agli agenti di protezione superficiale diverse quantità di tungstato di sodio, per migliorare il recupero del calcestruzzo. Tuttavia, le concentrazioni aggiunte erano troppo basse per ottenere indicazioni chiare sul comportamento di penetrazione tramite il microscopio elettronico a scansione (SEM) (vedere figura 3.6). Non è stato possibile aumentare la concentrazione di tungstato di sodio a causa dell'aumento della viscosità.

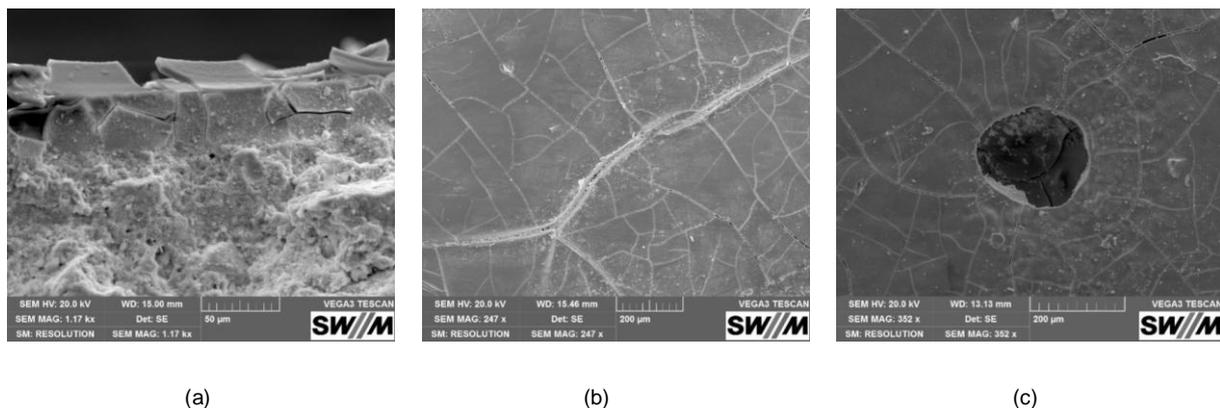
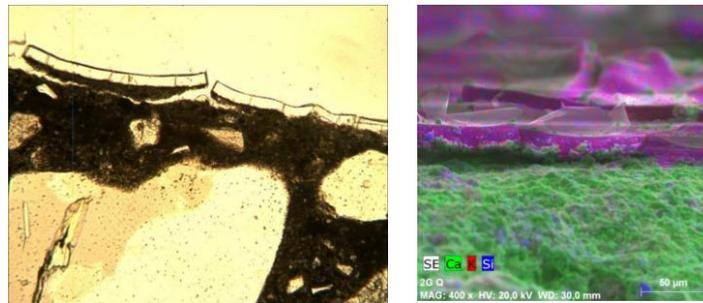


Figura 3.6: Immagini SEM della qualità superficiale degli agenti di protezione superficiale

Pertanto, in una fase successiva sono state prodotte sezioni sottili ed esaminate con una combinazione di microscopia in luce polarizzata e a luce trasmessa e microscopia elettronica a scansione. Utilizzando la microscopia a luce trasmessa, è stato possibile visualizzare uno strato di protezione sulla superficie del calcestruzzo, come mostrato nella figura 3.7(a). Le analisi di distribuzione degli elementi hanno indicato un accumulo di componenti degli agenti di protezione superficiale ai bordi della matrice di calcestruzzo. Tuttavia, le differenze di rilievo mostrate nella figura 3.7(b) non hanno consentito un'analisi precisa.



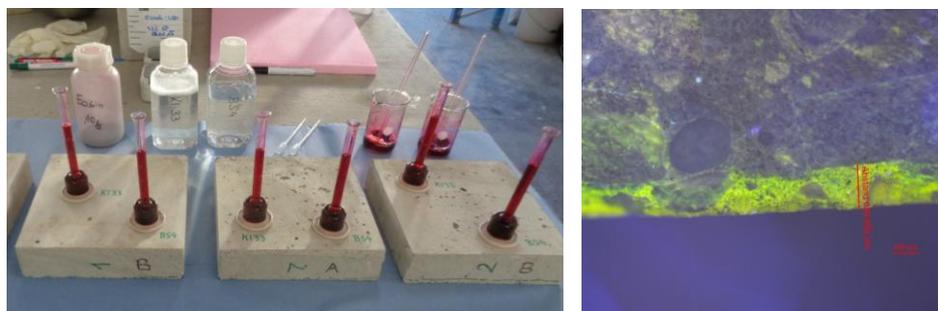
(a) Analisi degli elementi della superficie del calcestruzzo mediante

(b) Immagine al microscopio a ingrandimento 10x

Figura 3.7: Analisi della superficie degli agenti di protezione superficiale

Poiché gli studi precedenti non hanno portato a risultati significativi, si è iniziato a cercare un nuovo approccio. Si è deciso di aggiungere un colorante fluorescente agli agenti di protezione superficiale per quantificare la profondità di penetrazione utilizzando la microscopia a luce riflessa. Il colorante fluorescente utilizzato è l'"Eosina Y" (sale sodico della tetrabromofluoresceina). Appartiene al gruppo dei coloranti al xantene, è solubile in acqua e reagisce debolmente alcalino. Inoltre, la soluzione mostra una fluorescenza verde, che è particolarmente visibile su uno sfondo scuro. Questo colorante deve servire da indicatore per determinare la profondità di penetrazione.

Per la prima determinazione della capacità di assorbimento degli agenti di protezione superficiale (figura 3.8(a)) sono stati utilizzati i tubi di Karsten. La quantità necessaria di eosina di 3 g/L è stata determinata mediante prove tattili. L'agente di protezione superficiale tinto con eosina è stato applicato sulla superficie del calcestruzzo e fatto asciugare. Dal momento che, tagliando i campioni, non è possibile escludere un riporto degli agenti di protezione superficiale, i campioni sono stati frantumati e sono state analizzate le superfici di frattura. Con l'aiuto della microscopia a luce riflessa, è stato possibile dimostrare una profondità di penetrazione da 1 mm a 2 mm. Un'area fortemente fluorescente indica il limite di penetrazione degli agenti di protezione superficiale (figura 3.8(b)).



(a) Esperimento con i tubi di Karsten

(b) Microscopia a fluorescenza

Figura 3.8: Determinazione delle profondità di penetrazione

Questo modo di determinare la profondità di penetrazione consente di eseguire un'analisi significativa. Per questo motivo, si è deciso di applicare questo metodo di analisi alla prossima serie di test.

4 Esecuzione e valutazione delle prove

4.1 Work Package 3

Nell'ambito del Work Package (WP) 3, a differenza di quanto pianificato, sono stati realizzati tre getti principali di calcestruzzo. Come si può vedere dalla valutazione delle prove nei capitoli seguenti, nell'ambito del programma di verifiche previsto, non è stato possibile ottenere indicazioni chiare, a causa di diverse influenze collaterali impreviste, che hanno reso necessarie ulteriori verifiche.

Nella valutazione che segue sono riassunti i tre getti principali di calcestruzzo del Work Package 3. È possibile consultare la sequenza di produzione delle piastre di prova fino al taglio dei campioni nella figura 4.1.



Figura 4.1: Immagini del primo getto di calcestruzzo

4.1.1 Tipi di calcestruzzo utilizzato e proprietà

4.1.1.1 Primo getto di calcestruzzo

Durante la prima fase di getto di calcestruzzo è stato scelto un calcestruzzo resistente al gelo/disgelo e agli agenti antigelo, che non soddisfa i requisiti normativi essenziali della norma ÖNORM B 4710-1. L'obiettivo era quello di ottenere una sufficiente resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo, utilizzando agenti di protezione superficiale.

Sono stati stabiliti i seguenti scostamenti dai criteri dei requisiti:

- Maggiore contenuto d'acqua (criterio del requisito normativo del rapporto acqua/legante $\leq 0,45$)
- Contenuto di pori d'aria nel calcestruzzo fresco troppo basso (criterio del requisito normativo $\geq 4\%$)
- Contenuto di pori d'aria nel calcestruzzo indurito troppo basso (criterio del requisito normativo $L300 \geq 1,8\%$ e $AF \leq 0,18$ mm)

Nell'ambito di questa serie di prove sono stati utilizzati aggregati di calcite/dolomite. L'applicazione è avvenuta sette giorni dopo il getto di calcestruzzo. La tabella 4.1 mostra la formulazione del calcestruzzo e i parametri del calcestruzzo fresco e indurito.

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Calcite/Dolomite	
Legante	CEM II/A-M 42,5 N	389 kg/m ³
	Micro Pozz	60 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua*	Acqua/legante = 0,48	187 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	0,70% del cls
	Agente per la formazione di pori d'aria	0,02% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Dimensione di spandimento dopo 90 min.	38 cm	
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco*	2,7 %	
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco	L300 = 0,25 %, AF = 0,58 mm	
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni	55,5 MPa	

* requisiti normativi non soddisfatti

Tabella 4.1: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito dei primi getti di calcestruzzo del Work Package 3

4.1.1.2 Secondo getto di calcestruzzo

Poiché il calcestruzzo del primo getto, anche con l'uso di agenti di protezione superficiale, non ha mostrato sulla superficie della cassaforma una resistenza sufficiente all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo, le prove sono state ripetute su un calcestruzzo di qualità superiore. Questa volta sono stati soddisfatti i requisiti di ÖNORM B 4710-1 per un calcestruzzo in classe di esposizione XF4. Anche in questo caso sono stati utilizzati aggregati di calcite/dolomite e gli agenti di protezione superficiale sono stati applicati dopo sette giorni. La composizione del calcestruzzo utilizzato e i parametri del calcestruzzo fresco e indurito sono disponibili nella tabella 4.2.

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Calcite/Dolomite	
	CEM II/A-M 42,5 N	421 kg/m ³
Legante	Micro Pozz	60 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,44	185 kg/m ³
Additivo	Agente per la formazione di pori d'aria	0,16% del cls
	Ritardante	0,39% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Dimensione di spandimento dopo 90 min.		43 cm
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco		6,5%
Pori d'aria nel calcestruzzo indurito		L300 = 2,21 %, AF = 0,07 mm
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni		43,0 MPa

Tabella 4.2: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito del secondo getto di calcestruzzo del Work Package 3

4.1.1.3 Terzo getto di calcestruzzo

A differenza dei primi due getti di calcestruzzo, per il terzo getto è stato utilizzato un aggregato silicatico. Al fine di garantire la comparabilità tra le operazioni di getto, per il terzo getto di calcestruzzo si è mirato ad ottenere agli stessi parametri del calcestruzzo fresco del secondo getto. Dal momento che il primo getto di calcestruzzo doveva essere ripetuto e dopo il secondo getto era subito evidente che sarebbero state necessarie ulteriori verifiche, oltre alle piastre di prova, sono state prodotte ulteriori travi per verifiche supplementari. L'influenza dei manti delle casseforme era già chiaramente evidente e valutabile nei primi due getti di calcestruzzo, pertanto, durante la terza fase di getto, tutte le piastre di prova sono state prodotte solo con la superficie della cassaforma Betonplan.

Come si può vedere nella tabella 4.3, nonostante un contenuto d'aria nel calcestruzzo fresco del 6,5% (stesso contenuto d'aria del secondo getto), non è soddisfatto il requisito normativo per il valore L300 di almeno l'1,8%. Anche il fattore distanza è aumentato in relazione al secondo getto, ma è inferiore al valore limite di 0,18 mm.

Composizione		
Aggregati	Silicato	
Legante	CEM II/A-M 42,5 N	424 kg/m ³
	Micro Pozz	60 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,44	187 kg/m ³
	Fluidificante	1,00% del cls
Additivo	Agente per la formazione di pori d'aria	0,20% del cls
	Ritardante	Aggiunta manuale: 0,40% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Dimensione di spandimento dopo 90 min	42 cm	
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco	6,5%	
Pori d'aria nel calcestruzzo indurito	L300 = 1,27 %, AF = 0,15mm	
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni	47,8 MPa	

Tabella 4.3: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito del terzo getto di calcestruzzo del Work Package 3

Supposizione di causa di un contenuto di pori d'aria troppo basso nel calcestruzzo indurito

L'elevata quantità di fluidificante impiegato, che causa una maggiore collosità del calcestruzzo, potrebbe portare ad una ventilazione insufficiente del calcestruzzo e ad un maggiore contenuto d'aria nel calcestruzzo fresco (compresi i pori d'aria grossolani che non sono fuoriusciti). Nel calcestruzzo indurito è stato possibile rilevare solo un minimo contenuto di pori d'aria sottili, anche se nel calcestruzzo fresco del terzo getto è stato misurato lo stesso contenuto d'aria del secondo getto.

4.1.2 Valutazione delle prove principali

Oltre alle modalità d'azione generale degli agenti di protezione superficiale (APS), questo capitolo esamina anche le possibili influenze sulla loro efficacia.

4.1.2.1 Effetto degli agenti di protezione superficiale

Per escludere le influenze dei diversi manti delle casseforme, in questo capitolo sono considerati solo i campioni realizzati con un rivestimento Betoplan. I valori indicati corrispondono ad un valore medio su tutte le piastre di prova testate. L'assegnazione degli agenti di protezione superficiale nel diagramma 4.1 è riportata nella tabella 4.4.

Profondità di penetrazione e porosità totale

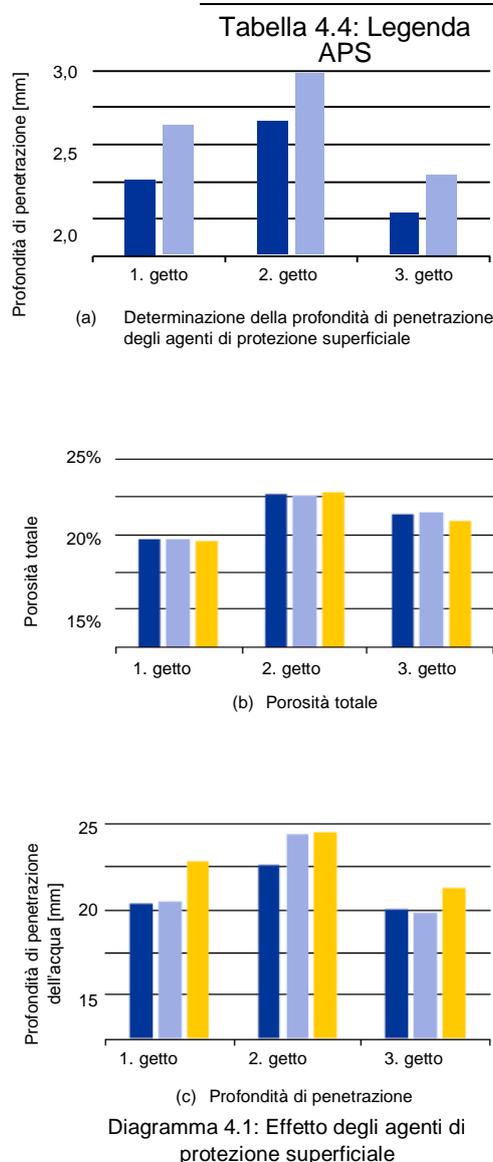
Come si può vedere nel diagramma 4.1(a), gli agenti di protezione superficiale sono penetrati nel calcestruzzo ad una profondità media inferiore a 2,5 mm. Questo valore è significativamente inferiore ai 20 mm - 30 mm riportati da un produttore di agenti di protezione superficiale. Si può anche notare che l'*agente di protezione superficiale 2* mostra un comportamento di penetrazione leggermente più profondo. Non è possibile rilevare alcuna influenza significativa della porosità totale sulla profondità di penetrazione dell'agente di protezione superficiale (cfr. diagramma 4.1(b)).

Va notato che soprattutto il secondo getto di calcestruzzo ha mostrato in superficie un ampio range di variazioni dal 16% al 25% nei singoli valori delle porosità complessive. Poiché queste dispersioni si sono verificate non solo tra le singole piastre di prova, ma anche al loro interno, si deve presumere che ci sia una disomogeneità della superficie del calcestruzzo, dovuta alla variazione del contenuto di pori d'aria.

Come già descritto nel capitolo 4.1.1.3, il contenuto d'aria nel calcestruzzo fresco durante il terzo getto è stato lo stesso del secondo getto. Oltre all'influenza, già descritta, dell'elevato contenuto di fluidificante sulla distribuzione dell'aria nel calcestruzzo fresco, questo può anche portare ad una stabilizzazione del calcestruzzo sulla superficie della cassaforma. Ciò spiega anche la distribuzione più omogenea della porosità totale rispetto al secondo getto.

I campioni del primo calcestruzzo mostrano una differenza massima dell'1% tra le singole porosità complessive, che è stata attribuita all'uso di un calcestruzzo con una percentuale molto bassa di pori d'aria artificiali.

Legenda	
■	APS 1
■	APS 2
■	Campione 0



Profondità di penetrazione

Nel diagramma 4.1(c) si riconosce un lieve effetto degli agenti di protezione superficiale sulla profondità di penetrazione dell'acqua, che tuttavia può essere trascurato, poiché i requisiti della classe di esposizione XW2 (ad es. XD4, per entrambi profondità di penetrazione dell'acqua ≤ 25 mm) sono soddisfatti in media da tutti i pannelli di prova.

La valutazione dei singoli risultati della profondità di penetrazione dell'acqua ha mostrato variazioni significativamente maggiori nel secondo getto rispetto al primo e al terzo getto. Queste variazioni possono essere osservate sia tra le singole piastre di prova che all'interno delle stesse. Ciò indica, come già le variazioni riscontrate con la porosità totale, una disomogeneità della microstruttura del calcestruzzo in superficie.

Resistenza all'attacco acido (stoccaggio di acido acetico)

I risultati del diagramma 4.1(d) mostrano l'acido acetico neutralizzato al termine della prova. Più basso è questo valore, meno acido acetico è stato neutralizzato e quindi meno calcestruzzo è stato danneggiato.

Con l'uso di agenti di protezione superficiale, la resistenza all'attacco acido può essere leggermente aumentata. Tuttavia, l'eventuale impiego di agenti di protezione superficiale per il rivestimento di impianti di decantazione deve essere esaminato in dettaglio, poiché non può essere escluso che gli agenti di protezione superficiale possano avere un'influenza negativa sulla formazione di un biofilm protettivo sulla superficie del calcestruzzo.

Resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo

Come già accennato nel capitolo 4.1.1.2, il calcestruzzo del primo getto ha mostrato un deterioramento da agenti atmosferici massiccio. Pertanto, è stato necessario interrompere le prove dopo 14 cicli di gelo e disgelo.

Di conseguenza, i risultati del primo getto non sono comparabili con quelli dei seguenti getti; per questo motivo nel diagramma 4.1(e) sono rappresentati solo i risultati del secondo e del terzo getto.

Come già stabilito in questo capitolo, le piastre di prova del secondo getto hanno mostrato grandi variazioni sulla superficie del calcestruzzo. Ciò è particolarmente evidente nella resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo. L'aumento significativo del deterioramento medio durante l'uso dell'agente di protezione superficiale medio 2 è dovuto al deterioramento da agenti atmosferici massiccio dei singoli campioni estratti dalla parte inferiore delle piastre di prova, che ha fortemente influenzato il valore medio. In generale, i campioni di prova estratti dalla parte inferiore dei pannelli di prova hanno mostrato deterioramenti da agenti atmosferici più elevati e distribuiti in modo più disomogeneo (dettagli nel capitolo 4.1.3.1). Se nella valutazione sono inclusi solo i campioni 1 e 2, estratti dal centro delle piastre di prova, il deterioramento da agenti atmosferici determinato varia da 300 g/m² a 400 g/m².

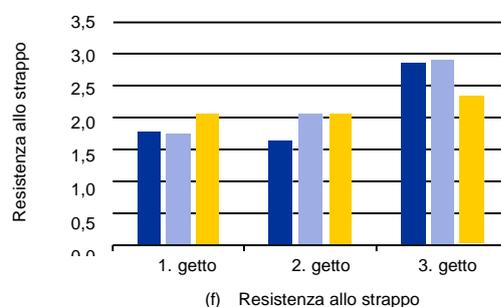
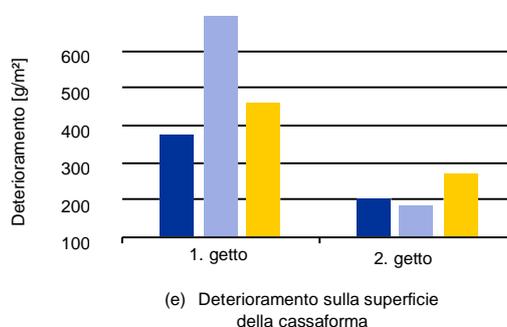
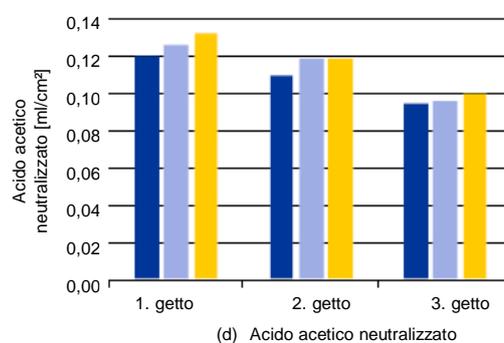


Diagramma 4.1: Effetto degli agenti di protezione superficiale

Nell' terzo getto di calcestruzzo, si è ottenuto un miglioramento significativo grazie all'uso di agenti di protezione superficiale. Entrambi gli agenti di protezione superficiale mostrano un effetto positivo comparabile con quello del campione 0.

Resistenza allo strappo

La diminuzione della resistenza allo strappo dovuta all'uso di agenti di protezione superficiale, che si può vedere in parte nel diagramma 4.1(f), può essere spiegata dall'insufficiente adesione dell'adesivo con la superficie del calcestruzzo protetta. Ciò è in parte dovuto alla superficie del calcestruzzo, che è notevolmente più liscia dopo l'applicazione degli agenti di protezione superficiale (che riempie le irregolarità con residui) e al grado inferiore di adesione dell'adesivo con la superficie del calcestruzzo. In alcuni casi è stato strappato solo il film degli agenti di protezione superficiale rimasto sulla superficie (presumibilmente residui di additivi negli agenti di protezione superficiale).

La bassa adesione sulle superfici in calcestruzzo protetto deve essere tenuta in considerazione soprattutto durante i lavori di riparazione. A tal fine sono state effettuate anche altre prove, descritte nel capitolo 4.1.3.3.

4.1.2.2 Influenza dei manti della cassaforma

Come già accennato nel capitolo 4.1.1.3, durante il terzo getto non è più stata analizzata l'influenza dei diversi manti delle casseforme, poiché i primi due getti avevano già fornito indicazioni chiare in merito.

Come descritto nel capitolo 3.1.2, le piastre di prova per la verifica dell'influenza del manto della cassaforma sono state post-trattate e rivestite solo come mostrato nella figura 3.3(b). Tuttavia, a causa delle grandi variazioni dei risultati del secondo getto di calcestruzzo, è stato necessario utilizzare come valore comparativo il valore medio per tutte le piastre di prova prodotte in un manto della cassaforma Betoplan.

L'assegnazione dei manti delle casseforme della tabella 4.5 è mostrato nel diagramma 4.2.

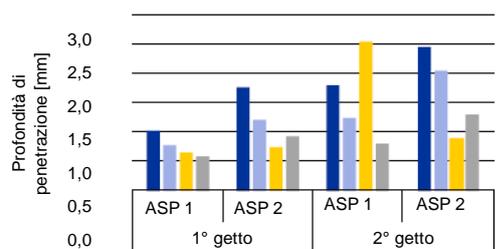
Profondità di penetrazione e porosità totale

Come illustrato nel diagramma 4.2(b), la porosità totale delle piastre di prova prodotte con manti assorbenti della cassaforma è ridotta dell'1%-2% rispetto a quella delle piastre di prova prodotte con manto Betoplan. Questo può essere attribuito ad un ridotto valore acqua/legante sulle superfici della cassaforma e quindi ad una riduzione dei pori capillari. La profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale è stata ridotta, come indicato nel diagramma 4.2(a), anche nelle piastre di prova prodotte con manti assorbenti delle casseforme. È insolito che, sia la profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale sia la porosità totale delle piastre di prova del primo getto di calcestruzzo, che sono state prodotte con un manto in acciaio, siano ridotte rispetto alle piastre di prova, prodotte con manto Betoplan, altrettanto non assorbente.

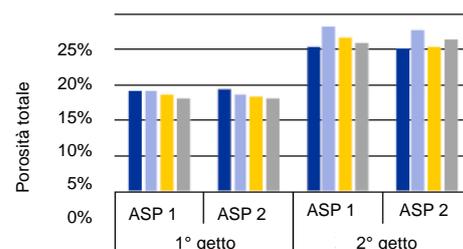
A causa della grande dispersione dei risultati della verifica sul secondo getto, non è possibile fornire indicazioni chiare. In particolare, l'elevata profondità di penetrazione dell'agente di protezione superficiale 1 può essere spiegata solo con la disomogeneità della superficie del calcestruzzo.

Legenda	
Betoplan	acciaio
legno	tessuto non tessuto

Tabella 4.5: Legenda manto cassaforma



(a) Profondità di penetrazione dell'agente di protezione superficiale



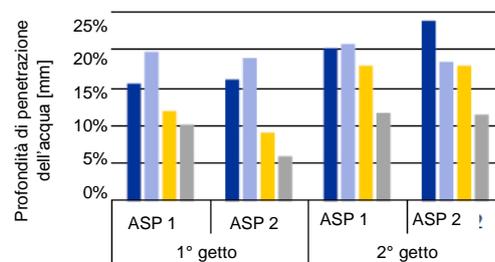
(b) Porosità totale

Diagramma 4.2: Influenza della superficie della cassaforma

Si è ipotizzato che la struttura locale a pori d'aria sottili (attraverso l'uso di agenti formatori di pori d'aria) sulla superficie del calcestruzzo abbia un'influenza significativamente maggiore sulla profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale e sulla porosità totale rispetto al manto della cassaforma utilizzato per la produzione delle piastre di prova.

Profondità di penetrazione

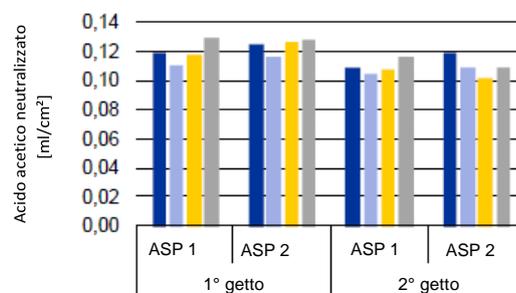
Utilizzando manti delle casseforme assorbenti, nel diagramma 4.2(c) si può notare una netta riduzione della profondità di penetrazione dell'acqua. Per i pannelli di prova prodotti con un manto della cassaforma in tessuto non tessuto, la profondità di penetrazione dell'acqua è stata dimezzata. Anche questo risultato indica una microstruttura del calcestruzzo più densa sulla superficie.



(c) Profondità di penetrazione

Resistenza all'attacco acido (stoccaggio di acido acetico)

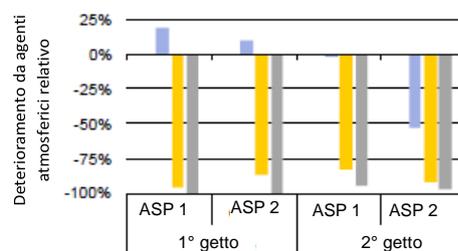
Nonostante la superficie del calcestruzzo notevolmente più ruvida delle piastre di prova prodotte con manti assorbenti delle casseforme e la maggiore superficie di contatto associata, dal diagramma 4.2(d) non si constata nessun effetto sulla resistenza all'attacco acido. Le differenze risiedono nel campo di incertezza di misura del metodo di prova.



(d) Acido acetico neutralizzato

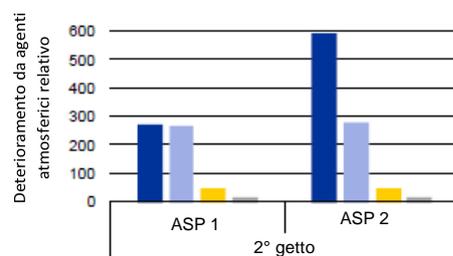
Resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo

In merito alla resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo (vedere diagramma 4.2(e)), gli effetti dei manti assorbenti delle casseforme sulla superficie del calcestruzzo erano i più evidenti. Si noti ancora una volta che, durante il primo getto, la prova ha dovuto essere interrotta dopo 14 cicli di gelo e disgelo. Per poter confrontare i risultati del primo e del secondo getto di calcestruzzo, il deterioramento da agenti atmosferici è indicato in relazione al deterioramento delle piastre di prova prodotte con manto Betoplan.



(e) Deterioramento sulla superficie della cassaforma

Durante il secondo getto, le piastre di prova, prodotte con manto Betoplan, hanno mostrato una grande dispersione del deterioramento da agenti atmosferici. Come si può vedere nel diagramma 4.2(f) e come descritto anche nel capitolo 4.1.2.1, questa elevata dispersione ha portato ad un deterioramento da agenti atmosferici medio delle piastre di prova trattate con agenti di protezione superficiale 2. L'influenza positiva dei manti delle casseforme assorbenti su queste piastre di prova sembra quindi essere ancora più pronunciata. Tuttavia, se si considerano i valori assoluti di deterioramento da agenti atmosferici del diagramma 4.2(f), si può notare che con entrambi gli agenti di protezione superficiale si ottiene lo stesso deterioramento da agenti atmosferici medio. Lo stesso vale per le piastre di prova prodotte con il manto della cassaforma in acciaio.



(f) Deterioramento sulla superficie della cassaforma

Diagramma 4.2: Influenza della superficie della cassaforma

I migliori risultati si ottengono con un manto della cassaforma in tessuto non tessuto. Il deterioramento da agenti atmosferici raggiunge persino valori inferiori al deterioramento da agenti atmosferici sulle superfici di

taglio, come si può notare dal confronto con il diagramma 4.8 (capitolo 4.1.3.2). Tuttavia, va notato che i manti delle casseforme assorbenti ritardano il deterioramento da agenti atmosferici, non lo fermano. Questo è stato chiaramente dimostrato con i campioni di prova del primo getto. Poiché i campioni di prova delle piastre di prova, che sono stati prodotti con manti delle casseforme assorbenti, hanno mostrato un deterioramento da agenti atmosferici molto basso, sono stati ulteriormente caricati fino al 28° ciclo di gelo e disgelo. Dopo altri 14 cicli di gelo e disgelo, anche questi campioni di prova hanno fallito.

Resistenza allo strappo

Come già illustrato nel capitolo 4.1.2.1, gli agenti di protezione superficiale compromettono principalmente l'adesione dell'adesivo. Per le piastre di prova del secondo getto di calcestruzzo, che sono state prodotte con manto della cassaforma in acciaio e trattate con l'agente di rivestimento superficiale 1, non si è potuta creare nessuna adesione e tutti gli stampi si sono incrinati quasi completamente nell'interfaccia dell'adesivo con la superficie.

La superficie più ruvida dei campioni di prova, che sono stati prodotti con un manto della cassaforma assorbente, si traduce in una migliore concatenazione e quindi in una maggiore resistenza allo strappo. Questa influenza non può prescindere dal miglioramento della microstruttura attraverso l'uso di un manto della cassaforma assorbente.

4.1.2.3 Influenza della direzione di applicazione

Come si può vedere nel diagramma 4.3, la direzione di applicazione non ha un'influenza significativa sulla profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale. Tuttavia, anche in questo caso è evidente anche la maggiore dispersione della profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale durante il secondo getto.

Se le verifiche successive sono raggruppate in base alla direzione di applicazione, possono essere rilevate, come per la profondità di penetrazione

degli agenti di protezione superficiale, solo differenze all'interno dell'incertezza di misura dei singoli metodi di prova. Per questo motivo non è stata presentata la valutazione delle ulteriori verifiche.

4.1.2.4 Influenza del pre-trattamento

A causa del limitato programma di verifica del terzo getto di calcestruzzo, non è stata effettuata la verifica sull'influenza del pre-trattamento mediante pulitura ad alta pressione su questo getto di calcestruzzo. Anche se ci sono state differenze nella profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale a causa Diagramma 4.4: Influenza del pre-trattamento sulla profondità di penetrazione del pre-trattamento, come si può vedere nel diagramma 4.4, queste non erano abbastanza significative da mostrare un'influenza percettibile anche nelle ulteriori verifiche. Per questo motivo non è stata presentata la valutazione delle ulteriori verifiche.

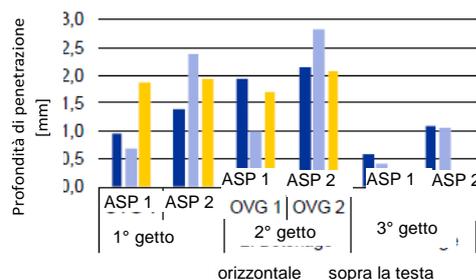
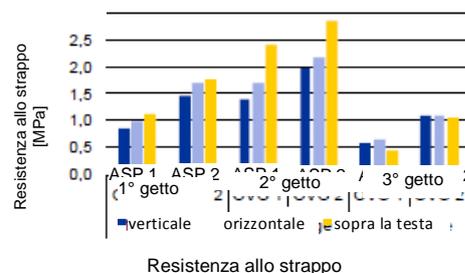
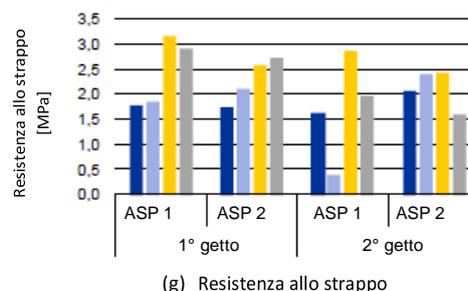


Diagramma 4.3: Influenza della direzione

4.1.2.5 Influenza della temperatura di applicazione

Contrariamente alle aspettative, non vi è stata alcuna influenza della temperatura di applicazione alla profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale, come mostrato nel diagramma 4.5. Durante l'applicazione è stato possibile rilevare parzialmente la formazione di ghiaccio sulla superficie fredda, a -5°C , ma l'agente di protezione superficiale è penetrato nella superficie del calcestruzzo o prima della formazione di ghiaccio o durante lo scioglimento dello strato di ghiaccio.

Anche nelle verifiche successive non è stato possibile determinare l'influenza della temperatura di applicazione sull'effetto degli agenti di protezione superficiale. Pertanto, come nei capitoli precedenti viene omessa una rappresentazione della valutazione delle ulteriori verifiche.

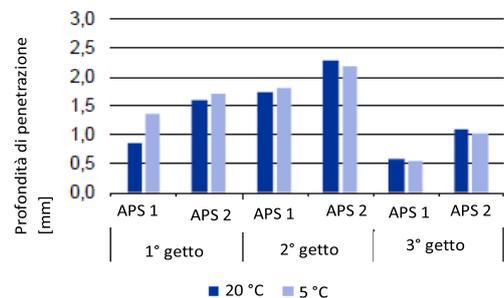


Diagramma 4.5: Influenza della temperatura di applicazione sulla profondità di penetrazione

4.1.2.6 Influenza della tecnologia applicativa

Come si può vedere nel diagramma 4.6, nel primo e nel terzo getto, durante il processo di deformazione, non è stata rilevata una maggiore profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale. Durante il secondo getto di calcestruzzo, all'interno della dispersione dei singoli risultati, si è verificata una profondità di penetrazione leggermente superiore degli agenti di protezione superficiale.

Come per le influenze esaminate in precedenza, non è stato possibile determinare alcuna influenza della

tecnologia applicativa. Per questo motivo non è stata neppure presentata la valutazione delle ulteriori verifiche.

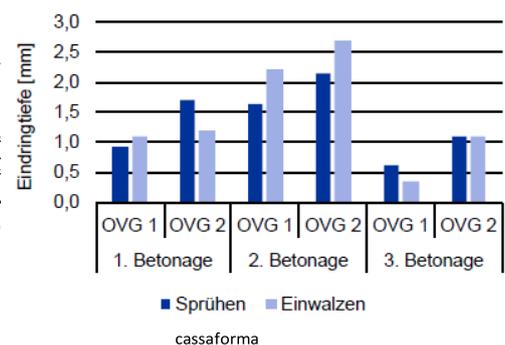


Diagramma 4.6: Influenza della tecnologia applicativa sulla profondità di penetrazione

4.1.2.7 Influenza degli aggregati

Per valutare l'influenza degli aggregati è stato effettuato il terzo getto. Come si può vedere nei diagrammi da 4.1 a 4.6, non è stata osservata alcuna differenza nell'effetto degli agenti di protezione superficiali a causa degli aggregati. I risultati, in generale migliori, del terzo getto sono visibili anche nel campione 0 non rivestito e sono quindi influenzati dal calcestruzzo stesso e non dagli agenti di protezione superficiale.

A causa della bassa dispersione dei singoli risultati, tuttavia, l'influenza positiva degli agenti di protezione superficiale è maggiormente evidente. Questo vale in particolare per la resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo (vedere il diagramma 4.1(e)). Ad eccezione della profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale, non è possibile rilevare alcuna differenza tra i due agenti di protezione superficiale.

4.1.3 Verifiche supplementari nell'ambito del Work Package 3

Come già descritto nell'introduzione al capitolo 4.1, per poter analizzare gli effetti collaterali inattesi, sono state necessarie ulteriori verifiche.

Dopo la valutazione del primo e del secondo getto, sono emerse le seguenti domande:

- La direzione del getto di calcestruzzo influisce sui risultati della prova?
- Il posizionamento dei campioni all'interno delle piastre di prova influisce sui risultati delle prove?
- I deterioramenti da agenti atmosferici in corrispondenza delle superfici di taglio sono conformi alle specifiche normative (in caso di preparazione a norma dei campioni di prova)?
- L'adesione può essere migliorata rimuovendo il calcestruzzo di rivestimento?

Per essere in grado di rispondere a queste domande, oltre ai campioni esistenti, è stato necessario produrre anche nuovi campioni da analizzare.

4.1.3.1 Influenza della direzione del getto e distribuzione dei campioni di prova

Per poter valutare l'influenza della direzione del getto, sono state rivestite in calcestruzzo un totale di tre piastre di prova con una dimensione di 60 cm x 60 cm x 10 cm. A tal fine, per ottenere una composizione del calcestruzzo il più omogenea possibile, è stato utilizzato un calcestruzzo dalla produzione regolare di un'opera in calcestruzzo, che soddisfa i requisiti di composizione per la classe di esposizione XF4.

Una delle piastre di prova è stata rivestita in calcestruzzo orizzontalmente, le altre due verticalmente. Da ciascuna delle piastre sono stati ottenuti nove campioni. Di questi, un campione è stato utilizzato per determinare il valore L300 e quattro per determinare la resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo sulla cassaforma o sulla superficie di taglio (vedere il capitolo 4.1.3.2). Poiché in questa verifica è stata determinata solo l'influenza della direzione del getto e della distribuzione del campione all'interno delle piastre di prova, non sono stati applicati agenti di protezione superficiale.

La figura 4.2 mostra il deterioramento da agenti atmosferici delle singole posizioni dei campioni, delle piastre di prova che sono state rivestite in calcestruzzo verticalmente, in relazione al valore medio del deterioramento da agenti atmosferici di queste piastre di prova. In questa valutazione è stato incluso il deterioramento da agenti atmosferici sia sulla superficie della cassaforma sia sulla superficie di taglio, in quanto è stata rilevata un'influenza della posizione del campione su entrambe le superfici di prova. È risultato che il deterioramento da agenti atmosferici nella parte inferiore delle piastre di prova è più elevato ed è soggetto a variazioni maggiori. Poiché i provini per la determinazione della resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo sono stati prelevati anche dalla parte inferiore delle piastre di prova, che erano state rivestite in calcestruzzo verticalmente, questo può spiegare in parte le variazioni e l'aumento del deterioramento da agenti atmosferici.

-17%	-26%	-39%
5%	X	4%
-9%	21%	60%

Figura 4.2: Distribuzione del deterioramento da agenti atmosferici in caso di riempimento verticale

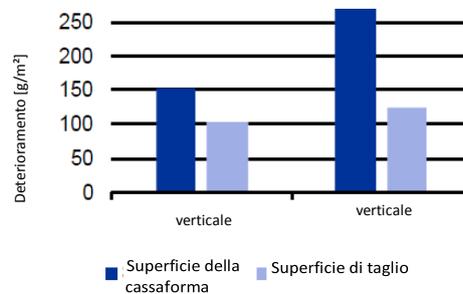


Diagramma 4.7: Influenza della direzione del getto sul deterioramento da agenti atmosferici

Come si può vedere nel diagramma 4.7, il deterioramento da agenti atmosferici sulla superficie della cassaforma della piastra di prova rivestite in calcestruzzo orizzontalmente è significativamente superiore a quello delle piastre di prova rivestite in calcestruzzo verticalmente. L'influenza della direzione del getto sui campioni, esaminati sulla superficie di taglio, non è stata così pronunciata. Se si confrontano i risultati individuali di entrambe le direzioni del getto di calcestruzzo, si può notare che il deterioramento da agenti atmosferici nella zona inferiore delle piastre di prova rivestite in calcestruzzo verticalmente è simile a quello delle piastre di prova rivestite in calcestruzzo orizzontalmente.

Come causa del maggiore deterioramento da agenti atmosferici si è ipotizzato che l'acqua in eccesso sia stata distribuita in modo disomogeneo sul manto della cassaforma a causa dell'addensamento puntuale con

il vibratore per bottiglie. Questo ha causato un aumento del valore acqua/legante sulla superficie del calcestruzzo. Ciò ha portato ad un maggior numero di pori capillari e quindi ad un'influenza negativa sulla resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo.

4.1.3.2 Resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo sulla superficie della cassaforma e di taglio

Poiché i campioni di prova del secondo getto hanno mostrato un deterioramento da agenti atmosferici più elevato di quanto ipotizzato, si è deciso di esaminare ulteriori campioni di prova sia sulla superficie della cassaforma che su una superficie di taglio durante il terzo getto di calcestruzzo. Per garantire che questi campioni abbiano la stessa età del calcestruzzo all'inizio della prova, sono state prodotte delle travi di dimensioni di 60 cm x 20 cm x 20 cm e tagliate a metà. Le travi divise sono state rivestite sulla superficie della cassaforma e di taglio e infine sono stati prelevati i singoli campioni di prova.

Una volta disponibili i primi risultati intermedi di questa verifica, soprattutto con il *campione 0*, sono state rilevate chiare differenze nel deterioramento da agenti atmosferici delle superfici di prova e si è deciso di analizzare sulla superficie di taglio anche campioni selezionati dalle normali piastre di prova, in modo da ottenere un valore di confronto. A tale scopo sono stati tagliati a misura i campioni di prova già testati e la superficie di taglio è stata rivestita con il rispettivo agente di protezione superficiale in conformità con le condizioni al contorno. Poiché all'inizio della prova questi campioni avevano un'età del calcestruzzo significativamente maggiore, il deterioramento da agenti atmosferici ottenuto è adatto solo per una valutazione qualitativa.

I risultati di questa verifica sono contenuti nel diagramma 4.8. Qui la scala dei deterioramenti da agenti atmosferici è stata limitata a 300 g/m² per poter riconoscere meglio il minore deterioramento da agenti atmosferici sulla superficie di taglio. Il deterioramento da agenti atmosferici del secondo getto di calcestruzzo è mostrato nel diagramma 4.2(f). Un confronto di questi due diagrammi mostra anche l'effetto positivo di un manto della cassaforma in tessuto non tessuto sulla resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo sulla superficie del calcestruzzo.

Come indicato nel diagramma 4.8, il deterioramento da agenti atmosferici sulle superfici di taglio è notevolmente ridotto. Anche i singoli valori sono distribuiti in modo più omogeneo. L'uso di un *agente di protezione superficiale 1* ha ridotto ulteriormente il deterioramento da agenti atmosferici. Al contrario, un *agente di protezione superficiale 2*, ha avuto un effetto negativo sui campioni di prova del terzo getto in materia di deterioramento da agenti atmosferici.

4.1.3.3 Resistenza allo strappo dopo la rimozione del calcestruzzo di rivestimento

Come già accennato nel capitolo 4.1.2, durante le prove di resistenza allo strappo, gli agenti di protezione superficiale hanno causato problemi di adesione tra l'adesivo e la superficie del calcestruzzo. Per poter verificare se la rimozione del calcestruzzo di rivestimento potesse migliorare l'adesione, i campioni

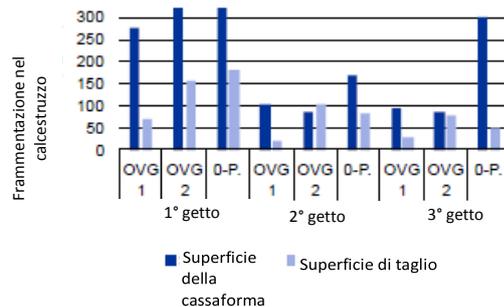


Diagramma 4.8: Deterioramento da agenti atmosferici su superficie

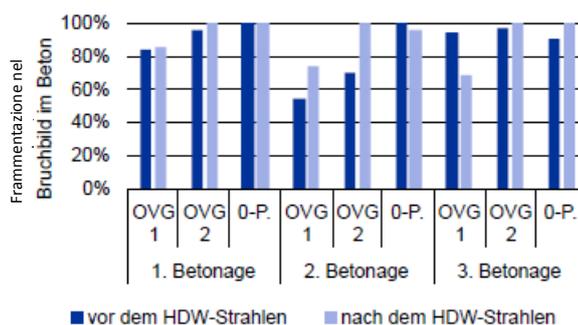


Diagramma 4.10: Profondità di penetrazione degli agenti di protezione - Work Package 4

selezionati sono stati sottoposti a idrodemolizione. Dopodiché, è stata nuovamente analizzata la resistenza allo strappo.

In media, la rimozione del calcestruzzo di rivestimento ha portato ad un leggero aumento della resistenza allo strappo, ma ad un miglioramento significativo della frammentazione, specialmente con il secondo getto di calcestruzzo (vedere diagramma 4.9).

4.1.4 Risultati dal Work Package 3

Un chiaro effetto positivo degli agenti di protezione superficiale può essere ottenuto solo per la resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo. In tutte le altre verifiche, l'influenza degli agenti di protezione superficiale era molto bassa o all'interno dell'incertezza di misura dei metodi di prova. In questo Work Package non è stato possibile stabilire con chiarezza l'influenza delle condizioni di contorno esaminate sul modo d'azione degli agenti di protezione superficiale.

Uno dei risultati più importanti emersi è che un calcestruzzo non idoneo, così come quello utilizzato nel primo getto, non può ottenere una resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con un agente antigelo di qualità superiore a quella degli agenti di protezione superficiale esaminati. Tuttavia, l'impiego di agenti di protezione superficiale potrebbe aumentare la resistenza sulle superfici delle casseforme testate.

Come dimostrato dalla valutazione della resistenza allo strappo, è possibile rilevare in parte la diminuzione dell'adesione tra l'adesivo e la superficie in calcestruzzo. Prima di eseguire lavori di riparazione, è quindi importante asportare lo strato superiore, ad esempio mediante idrodemolizione, e rimuovere il calcestruzzo di rivestimento.

L'effetto positivo dei manti assorbenti delle casseforme è stato chiaramente dimostrato. E non solo in un miglioramento della microstruttura, ma anche per una microstruttura più omogenea. Soprattutto la resistenza all'attacco dei cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo potrebbe essere incrementata dal getto con manti delle casseforme assorbenti.

Oltre ai risultati relativi alle modalità d'azione, durante lo sviluppo di questo Work Package si è potuto accertare anche i seguenti problemi:

- I primi due getti erano troppo elevati. Di conseguenza, soprattutto nel secondo getto, l'inizio della solidificazione è stato raggiunto già prima del getto delle ultime piastre di prova.
- La bottiglia vibrante troppo grande ha introdotto troppa energia vibrante (segregazione).
- I campioni per la valutazione della resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agente antigelo sono stati estratti da una posizione inadeguata all'interno delle piastre di prova.
- Mancanza di comparabilità dei calcestruzzi con aggregati di calcite e silicati.
- Disomogeneità dei silicati utilizzati.
- Insufficiente saturazione dei campioni con i prodotti di protezione superficiale.
- Non si può escludere che la superficie in calcestruzzo protetta possa subire la rimozione del campione di prova.

4.2 Work Package 4

Sulla base dei risultati del Work Package 3, le piastre di prova sono state testate in un impianto di prefabbricazione senza l'introduzione di pori d'aria sottili artificiali. Affinché tutte le prove potessero essere eseguite simultaneamente, il getto di tutte e tre le composizioni di calcestruzzo è stato effettuato nell'arco di tre giorni.

Per le tre miscele prodotte sono stati specificati i seguenti valori da raggiungere:

- Valore acqua/legante = 0,43
- Contenuto del legante= 380 kg/m³
- ne consegue: Contenuto totale di acqua = 163 kg/m³

In tutti i getti sono stati utilizzati aggregati di calcite/dolomite.

È possibile visualizzare come esempio il processo di produzione delle piastre di prova fino al rivestimento dei campioni di prova nella figura 4.3.



(b) Casseforme prima del getto di superficie calcestruzzo dopo il



(a) Levigatura della getto



(c) Siglatura delle superfici non analizzatz



(d) Pulizia con un'idropulitrice ad alta pressione selezionati prima



(e) Campioni di prova del rivestimento



(f) Applicazione a spruzzo

Figura 4.3: Immagini sulla produzione dei campioni di prova

4.2.1 Tipi di calcestruzzo utilizzati e proprietà

4.2.1.1 Primo getto di calcestruzzo

Nel contesto di questa valutazione, questa composizione del calcestruzzo è denominata R1.

Per il primo getto di calcestruzzo è stato utilizzato come legante un cemento standard della famiglia CEM II/A-M (S-L) 42,5 N. Questo è il legante standard impiegato nella regione del Tirolo.

La composizione del calcestruzzo utilizzato e i parametri del calcestruzzo fresco e indurito sono riportati nella tabella 4.6

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Calcite/Dolomite	
Legante	CEM II/A-M (S-L) 42,5 N	384 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,43	167 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	0,85% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Dimensione di spandimento dopo 60 min	34 cm	
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco	1,1%	
Densità del calcestruzzo fresco	2.520 kg/m ³	
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni	64,3 MPa	

Tabella 4.6: Composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito del primo getto (R1) del Work Package 4

4.2.1.2 Secondo getto

Nel contesto di questa valutazione, questa composizione del calcestruzzo è denominata R2.

Per il secondo getto di calcestruzzo è stato utilizzato come legante un cemento standard della famiglia CEM I 42,5 R - privo di C3A. Questo legante è stato utilizzato per la sua bassa generazione di calore, che lo rende particolarmente adatto per componenti massicci o per il rivestimento in calcestruzzo a temperature elevate.

La composizione del calcestruzzo utilizzato e i parametri del calcestruzzo fresco e indurito sono riportati nella tabella 4.7.

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Calcite/Dolomite	
Legante	CEM II/A-M (S-L) 42,5 N	382 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,43	166 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	0,70% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Dimensione di spandimento dopo 45 min	38 cm	
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco	1,0%	
Densità del calcestruzzo fresco	2.520 kg/m ³	
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni	64,1 MPa	

Tabella 4.7: Composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito del secondo getto di calcestruzzo (R2) del Work Package 4

4.2.1.3 Terzo getto di calcestruzzo

Nel contesto di questa valutazione, questa composizione del calcestruzzo è denominata R3.

Per il terzo getto di calcestruzzo è stato utilizzato come legante un cemento standard della famiglia CEM II/A-LL 32,5 R. Questo è il legante standard impiegato nella regione del Tirolo.

La formulazione del calcestruzzo utilizzato e i parametri del calcestruzzo fresco e indurito sono riportati nella tabella 4.8.

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Calcite/Dolomite	
Legante	CEM II/A-M (S-L) 32,5 N	382 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,43	165 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	0,80% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Dimensione di spandimento dopo 45 min	33 cm	
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco	0,5%	
Densità del calcestruzzo fresco	2.540 kg/m ³	
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni	59,2 MPa	

Tabella 4.8: Composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito del terzo getto di calcestruzzo (R3) del Work Package 4

4.2.2 Valutazione dei test

LegendL'assegnazione degli agenti di protezione superficiale nel diagramma 4.10 e nel diagramma 4.11 è riportata nella tabella 4.9. La superficie estratta del diagramma 4.10 e del diagramma 4.11 viene denominata solo superficie.

Profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale

Dopo le prime esperienze positive con la determinazione della profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale per mezzo di tubi di Karsten, la prova è stata eseguita anche in questo Work Package. A causa della densa microstruttura e della superficie di prova relativamente piccola dei tubi di Karsten di 7 cm², in queste verifiche non è stato possibile determinare la profondità di penetrazione dell'agente di protezione superficiale.

Tuttavia, grazie alle dimensioni delle piastre di prova, 1,4 è stato possibile produrre campioni di prova per determinare la profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale mediante microscopia a fluorescenza (vedere figura 3.4). Come si può vedere nel diagramma 4.10, l'agente di protezione superficiale 2 è penetrato più in profondità dell'agente di protezione superficiale 1, come nel Work Package 3. Dei nuovi agenti di protezione superficiale, solo l'agente di protezione superficiale 3 è penetrato nella superficie del calcestruzzo. Non è stata rilevata una chiara differenza tra la superficie della cassaforma e la superficie estratta.

Legenda
APS 1
APS 2
APS 3
APS 4
APS 5
Campione 0

Tabella 4.9: Legenda APS

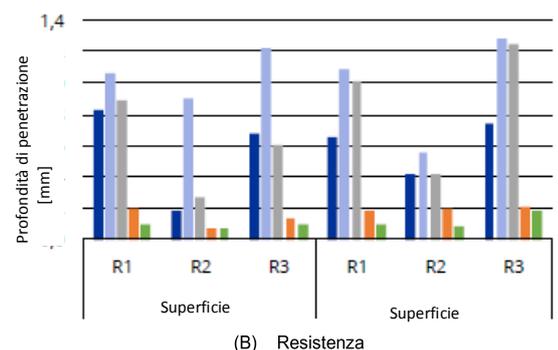
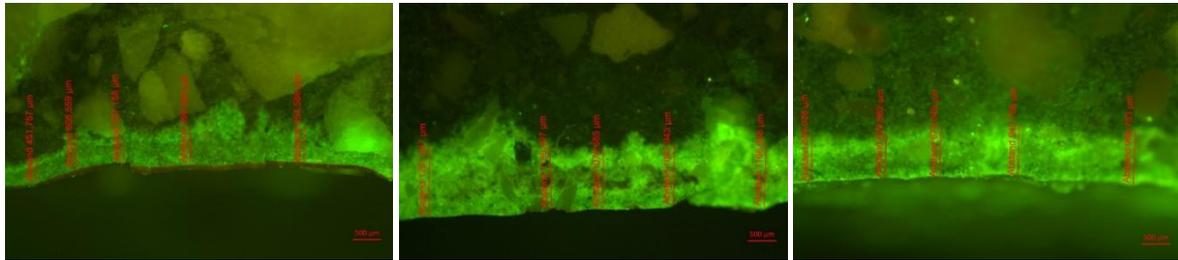
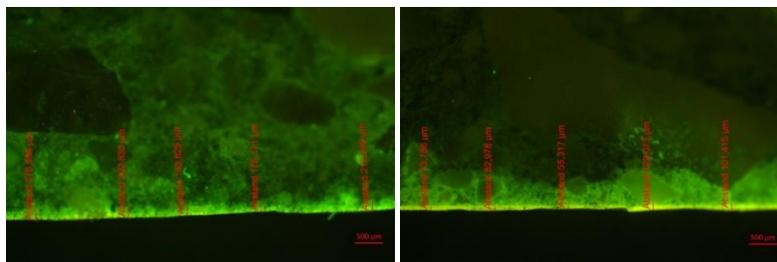


Diagramma 4.10: Profondità di penetrazione degli agenti di protezione - Work Package 4

Gli agenti di protezione superficiale 4 e 5 hanno solo formato una pellicola protettiva superficiale e non sono penetrati minimamente nel calcestruzzo. La formazione di questa pellicola protettiva è chiaramente visibile nella figura 4.4(e).



(a) Agente di protezione superficiale 1 (b) Agente di protezione superficiale 2 (c) Agente di protezione superficiale 3



(d) Agente di protezione superficiale 4 (e) Agente di protezione superficiale 5

Figura 4.4: Immagini della profondità di penetrazione al microscopio a fluorescenza. Le immagini sono state scattate di diverse piastre di prova.

Porosità totale

Se i risultati della porosità totale di cui al diagramma 4.11(a) sulla superficie della cassaforma vengono confrontati con il contenuto di aria della prova del calcestruzzo fresco nelle tabelle da 4.6 a 4.8, si riconoscerà una correlazione tra i due valori. Come previsto, la porosità totale era maggiore sulla superficie estratta. A causa della bassa profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale in relazione alle dimensioni del campione di prova, non è stato possibile rilevare alcuna influenza degli agenti di protezione superficiale sulla porosità totale.

Era chiaramente visibile che i campioni di prova mostravano un Diagramma 4.11: Risultati del Work Package 4 sistema di pori distribuiti in modo molto omogeneo sia sulla superficie della cassaforma che su quella estratta. Le differenze tra le piastre di prova di una composizione erano anch'esse <1% e quindi rientravano nel campo di incertezza di misura di questo processo.



(a) Porosità totale

Resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo

Sulla base delle esperienze del Work Package 3, le verifiche sono state interrotte dopo un deterioramento da agenti atmosferici $\geq 1.000 \text{ g/m}^2$, poiché di norma la superficie di prova nella zona del bordo non poteva più essere sigillata. Inoltre, il deterioramento da agenti atmosferici ha raggiunto un livello di profondità a cui gli agenti di protezione superficiali non erano penetrati e a cui non potevano mostrare alcun effetto. Per poter determinare con maggiore precisione il numero effettivo di cicli di gelo/disgelo fino al raggiungimento del valore limite, il deterioramento da agenti atmosferici è stato determinato in un intervallo di 7 cicli di gelo e disgelo e non 14, come previsto dalla normativa. Poiché nei calcestruzzi prodotti non sono stati introdotti pori d'aria sottili artificiale, tutti i campioni 0 hanno dovuto essere interrotti prematuramente a causa della loro bassa resistenza.

Per la valutazione della resistenza si è dimostrato idoneo il numero di cicli di gelo e disgelo calcolati per compensazione lineare fino al raggiungimento di un deterioramento da agenti atmosferici di 300 g/m².² Il diagramma 4.11(b) mostra il numero di cicli di gelo e disgelo fino al raggiungimento del valore limite. Per poter riconoscere meglio l'efficacia dei singoli agenti di protezione superficiale, il diagramma 4.11(c) mostra il numero di cicli di gelo e disgelo in relazione al rispettivo *campione 0*.

A causa dell'elevato numero di campioni di prova, la verifica ha dovuto essere effettuata in tre serie parziali. L'andamento della resistenza dei *campioni 0* è illustrato nel diagramma 4.11(d). Per le composizioni R1 e R3 non è stato possibile determinare l'andamento temporale significativo delle resistenze. Al contrario, nella composizione R2 è stata rilevata una diminuzione della resistenza.

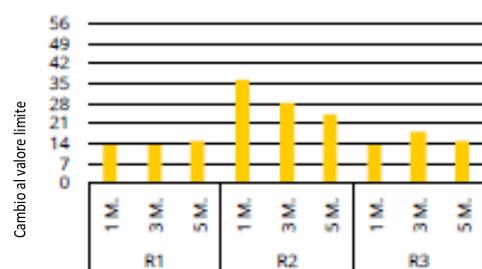
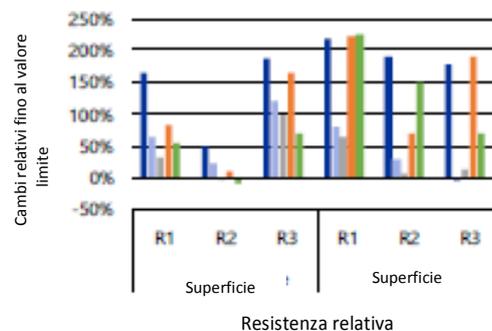
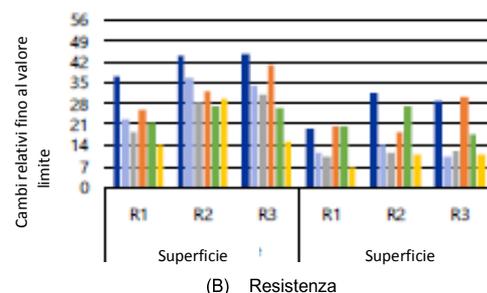
Grazie alla composizione dei calcestruzzi, solo pochi campioni di prova sono stati in grado di resistere alla durata totale della prova di 56 cicli di gelo e disgelo con un deterioramento da agenti atmosferici inferiore a 300 g/m². Come previsto, i campioni della superficie estratta hanno mostrato un deterioramento da agenti atmosferici maggiore ed anche le maggiori variazioni tra i singoli campioni.

Il *campione 0* del calcestruzzo della composizione R2 mostra la massima resistenza sulla superficie della cassaforma, anche se, anche qui, non è possibile determinare l'effetto degli agenti di protezione superficiale. Sulla superficie estratta, nei *campioni 0* non è stato rilevata nessuna differenza significativa.

Gli agenti di protezione superficiale devono essere presi in considerazione separatamente, a seconda della loro modalità d'azione. Da un lato gli agenti di protezione superficiale reattivi, gli *agenti di protezione superficiale da 1 a 3*, dall'altro i rivestimenti non reattivi, gli *agenti di protezione superficiale 4 e 5*. Gli agenti di protezione superficiale hanno mostrato un aumento piuttosto lineare del deterioramento da agenti atmosferici durante il periodo di prova, mentre i rivestimenti non reattivi non hanno mostrato quasi nessuna alterazione del deterioramento da agenti atmosferici fino a quando lo strato è stato disturbato. In seguito, il deterioramento da agenti atmosferici è aumentato alla stessa velocità del *campione 0*. Questo comportamento può essere ben spiegato dalla modalità d'azione dei singoli agenti di protezione superficiale.

Mentre l'uso degli agenti di protezione superficiale reattivi modifica la microstruttura del calcestruzzo sulla superficie, i rivestimenti non reattivi formano uno strato protettivo. Se nel tempo si verificano danni in questo strato protettivo, l'agente antigelo può penetrare senza ostacoli nel calcestruzzo sottostante. Questo danneggia ulteriormente lo strato protettivo, esponendo l'intera superficie del calcestruzzo.

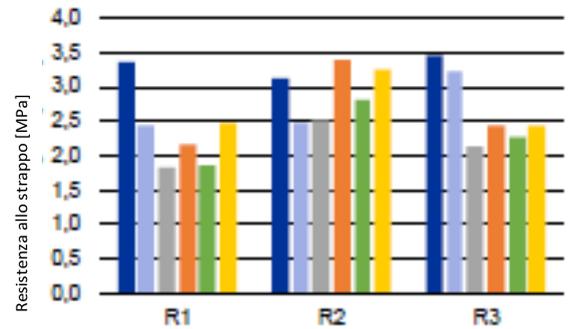
Sulla superficie della cassaforma del calcestruzzo con la composizione R3, gli agenti di protezione superficiale hanno mostrato l'effetto più evidente. In tutte le verifiche è evidente che l'*agente di protezione superficiale 1* ha mostrato l'effetto più evidente, anche se, come si può vedere nel diagramma 4.10, gli agenti di protezione superficiale 2 e 3 sono penetrati più profondamente.



Andamento temporale della resistenza del campione 0 sulla superficie della cassaforma.
 Diagramma 4.11: Risultati del Work Package 4

Resistenza allo strappo

La resistenza allo strappo è stata testata solo sulla superficie estratta delle piastre di prova. Per l'*agente di protezione superficiale 1* è stato rilevato un chiaro miglioramento in combinazione con i calcestruzzi *R1* e *R3*, mentre per l'*agente di protezione superficiale 2* in combinazione con il calcestruzzo *R3*. I restanti agenti di protezione superficiale non hanno mostrato alcuna chiara influenza sulla resistenza allo strappo. Come già accaduto nel Work Package 3, non è stato rilevato nessun peggioramento dell'adesione a causa dell'uso di agenti di protezione



(e) Resistenza allo strappo

Diagramma 4.11: Risultati del Work Package 4

4.2.3 Conclusione

L'utilizzo di calcestruzzi senza pori d'aria artificiali e la produzione in un impianto di prefabbricazione ha portato a risultati significativamente più omogenei. Sulla base dei risultati provvisori dopo la valutazione delle prime due serie parziali per determinare la resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo, si è deciso di utilizzare la composizione *R3* come base per ulteriori verifiche e, come nel Work Package 3, di analizzare solo l'influenza degli *agenti di rivestimento superficiale 1* e *2*.

A differenza del Work Package 3, questo Work Package ha dimostrato l'efficacia di diversi agenti di protezione superficiale in combinazione con diversi leganti sulla resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo. L'influenza sulla resistenza allo strappo è generalmente bassa, solo gli *agenti di protezione superficiale 1* e *2* potrebbero ottenere un miglioramento significativo in combinazione con il calcestruzzo della composizione *R3*.

4.3 Work Package 5

Per le verifiche del Work Package 5 è stato necessario produrre diverse miscele di calcestruzzo. L'obiettivo era quello di ottenere i parametri specificati per il calcestruzzo fresco nel modo più preciso possibile, motivo per cui tutte le miscele di calcestruzzo sono state prodotte con una betoniera da laboratorio. Poiché la betoniera ha una capacità di soli 60 L, è stato necessario produrre più volte le stesse miscele di calcestruzzo. Per produrre calcestruzzi di pari qualità, soprattutto per quanto riguarda il contenuto d'acqua, tutti gli aggregati sono stati aggiunti a secco.

I campioni del Work Package 5 sono stati prodotti nell'arco di tempo dal 21 al 24.08.2018 (vedere figura 4.5).

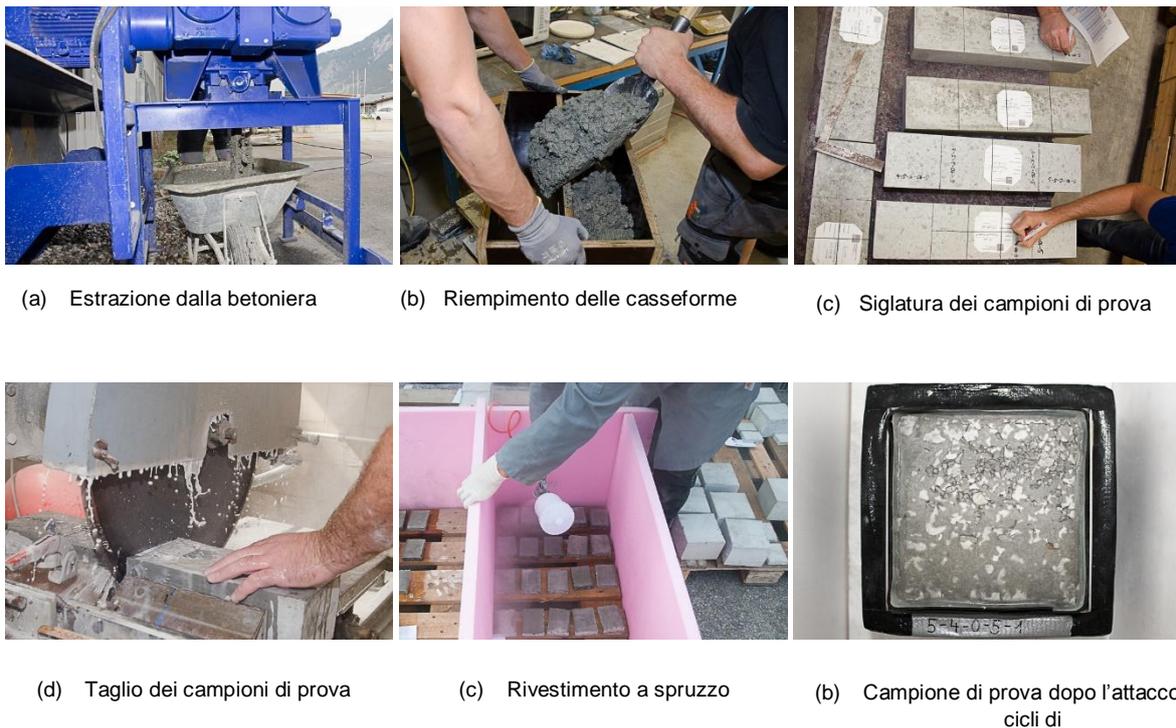


Figura 4.5: Immagini sulla produzione dei campioni di prova

4.3.1 Produzione di calcestruzzo e proprietà

Come mostrato nel capitolo 4.2.3, la composizione R3 del Work Package 4, prodotta con un normale cemento della famiglia CEM II/A-LL 32.5 R, ha mostrato gli effetti più evidenti degli agenti di protezione superficiale. Pertanto, questa composizione ha costituito la base per tutte le verifiche di questo Work Package.

La tabella 4.10 fornisce una panoramica delle composizioni di calcestruzzo prodotte e delle loro proprietà di calcestruzzo fresco. Se sono stati prodotti più lotti della stessa miscela, vengono elencati i valori delle singole miscele. Come si può vedere, i valori da raggiungere sono stati pienamente ottenuti per tutte le miscele. Le fluttuazioni dei parametri del calcestruzzo fresco sui singoli lotti della stessa miscela erano all'interno dell'incertezza di misura dei metodi di prova.

La miscela M1 rappresenta il riferimento alle verifiche del Work Package 4. Il confronto con i parametri del calcestruzzo fresco nella tabella 4.8 ne mostrano la conformità. Per l'analisi dell'influenza di un'applicazione a rullo è stata utilizzata la miscela M2, perché ha la stessa composizione. Le miscele da M3 a M5 rappresentano diversi contenuti di legante e valori acqua/legante. L'influenza dei silicati è stata nuovamente analizzata con i tre lotti della miscela M8

Poiché in questo Work Package è stata studiata anche l'influenza del contenuto d'aria sull'effetto degli agenti di protezione superficiale o un possibile degrado dei micropori d'aria da parte dell'agente di protezione superficiale,

per il contenuto d'aria nel calcestruzzo fresco è stato fissato un valore da raggiungere del 4,0% per la miscela M6 e dell'8,0% per la miscela M7. La miscela M6 corrisponde quindi al valore limite inferiore e la miscela M7 al valore limite superiore per un calcestruzzo della classe di esposizione XF4. Il valore prefissato è stato raggiunto con la miscela M6. Tuttavia, la miscela M7 ha mostrato una netta diminuzione del contenuto di pori d'aria durante il tempo di lavorazione, che è passato dal 10-11% circa (stimato da una densità lorda di 2.280 kg/m³) al 7,0% (densità lorda 2.390 kg/m³) dopo 60 min.

Durante la valutazione dei parametri dei pori d'aria nel calcestruzzo indurito, è stato possibile determinare i seguenti parametri. Per il confronto, sono indicati anche i requisiti della classe di esposizione XF4.

- M6: L300 = 1,15 %, AF = 0,18 mm
- M7: L300 = 2,59 %, AF = 0,09 mm
- Classe di esposizione XF4: L300 ≥ 1,8 %, AF ≤ 0,18 mm

In questo modo la miscela M6 non era in grado di soddisfare i requisiti per i parametri di pori d'aria nel calcestruzzo indurito, mentre la miscela M7 poteva chiaramente soddisfarli.

Ma	Aggregato	Valore acqua/legante dovrebbe essere	Valori da raggiungere Legante kg/m ³	Additivo superficiale % del cls	Prova del calcestruzzo fresco			
					Valore acqua/	Dimensione c kg/m ³	legante lorda pori d'aria	Spandimento cm
1	kalzitisch	0,43	382	FM ^b : 0,60	0,43	2.560	1,1	35
					0,43	2.540	1,6	35
2	kalzitisch	0,43	382	FM ^b : 0,60	0,43	2.560	1,0	36
					0,44	2.570	0,8	37
3	kalzitisch	0,48	382	FM ^b : 0,30	0,49	2.530	0,5	42
4	kalzitisch	0,43	440	FM ^b : 0,25	0,43	2.540	0,4	39
5	kalzitisch	0,43	340	FM ^b : 1,00	0,44	2.590	0,3	36
6	kalzitisch	0,43	382	FM ^b : 0,60 LM ^c : 0,17	0,41	2.470	4,0	37
7	kalzitisch	0,43	382	FM ^b : 0,25 LM ^c : 0,21	0,42	2.390	7,0	42
8	silikatisch	0,43	382	FM ^b : 1,40	0,43	2.540	0,9	28
					0,44	2.550	0,8	28
					0,43	2.560	1,0	28

4.3.2 Valutazione delle prove principali

Come già menzionato, l'ambito dell'inchiesta è stato nuovamente ridotto a due agenti di protezione superficiale. L'assegnazione degli agenti di protezione superficiale nel campione 0 del diagramma 4.12 è riportata nella tabella 4.11.

Profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale

Le profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale sono rappresentate nel diagramma 4.12(a). Se si confronta la miscela di riferimento *M1* con le profondità di penetrazione del Work Package 4 nel diagramma 4.10, si può notare che queste sono delle stesse dimensioni. È chiaramente visibile anche la tendenza che *APS 2* sta penetrando più in profondità. Come già stabilito nel capitolo 4.1.2.6, non si nota alcuna influenza dell'applicazione a rullo sulla profondità di penetrazione.

La profondità di penetrazione può essere aumentata da un valore acqua/legante (*M3*) o da un contenuto del legante (*M4*) più elevato. Questo può essere attribuito alla maggiore porosità capillare della pasta cementizia o al maggior contenuto di pasta cementizia e quindi ad un maggiore effetto di aspirazione. Questa tendenza non si nota con la miscela *M5*. Ciò è dovuto in parte al contenuto significativamente più elevato di fluidificante, necessario per ottenere una lavorabilità comparabile.

L'introduzione di pori d'aria artificiali aumenta la porosità totale del calcestruzzo, ma anche le interruzioni dei pori capillari. Pertanto, non è stata rilevata un'influenza significativa del contenuto di pori d'aria artificiali sulla profondità di penetrazione.

Nell'ambito di queste verifiche non è stata rilevata l'influenza degli aggregati sulla profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale.

Porosità totale

La porosità totale nel diagramma 4.12(b) è inferiore di circa il 2% rispetto a quella del Work Package 4. Ciò è dovuto alla modifica delle dimensioni del campione di prova e alla compattazione manuale sul tavolo vibrante del laboratorio. L'influenza dei diversi valori acqua/legante e del contenuto di legante delle miscele da *M3* a *M5* è chiaramente visibile.

L'aumento del 3% del contenuto di pori d'aria nel calcestruzzo fresco della miscela *M6* rispetto alle miscele *M1* e *M2* porta ad un aumento della porosità totale di circa il 2%. Per la miscela *M7*, la differenza tra calcestruzzo fresco

e indurito è di circa il 6%. Questa è anche l'unica miscela in cui si può osservare una leggera diminuzione della porosità totale dovuta all'utilizzo di agenti di protezione superficiale, che è ancora all'interno dell'incertezza di misura.

La porosità totale leggermente superiore della miscela *M8*, che è stata prodotta con aggregati di silicato, è dovuta al maggiore assorbimento d'acqua di questi aggregati. Ciò non corrisponde alla tendenza del diagramma 4.1(a) del Work Package 3; nel Work Package 3 le porosità complessive erano significativamente più elevate e più disomogenee.

Resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo

Il confronto della miscela di riferimento *M1* nel diagramma 4.12(c) con i risultati del diagramma 4.11(b) mostra una buona conformità della resistenza per l'*agente di protezione superficiale 1* e il *campione 0*; tuttavia, la resistenza dei campioni di prova rivestiti con l'*agente di protezione superficiale 2* è stata più che dimezzata. Applicando a rullo l'agente di protezione superficiale, nell'ambito di queste verifiche è stato possibile determinare un effetto inferiore rispetto all'applicazione a spruzzo.

La procedura del test e la valutazione dei risultati sono effettuate in modo analogo alla procedura del capitolo 4.2.2.

Un aumento del valore medio acqua/legante e del contenuto di legante ha portato ad una significativa riduzione della resistenza. Ciò è dovuto allo stesso meccanismo dell'impatto sulla profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale. Tuttavia, l'elevato contenuto di legante della miscela *M4* ha fatto sì che l'*agente di protezione superficiale 1* ottenesse un significativo aumento della resistenza. Nell'ambito di queste

verifiche, il contenuto di legante della miscela M1 ha raggiunto risultati ottimali per quanto riguarda la resistenza del campione 0. Una riduzione del contenuto di legante come nella miscela M5 ha ridotto la resistenza. Tuttavia, questa miscela ha mostrato l'aumento più significativo della resistenza attraverso l'uso di agenti di protezione superficiale. Si presume che ciò sia dovuto all'influenza del fluidificante. Nell'ambito di questo progetto di ricerca, tuttavia, non sono state effettuate verifiche approfondite, motivo per cui non è stato possibile formulare indicazioni definitive. L'effetto degli agenti di protezione superficiale in relazione al campione 0 a valori acqua/legante della miscela M3 più elevati, è stato significativamente ridotto nel contesto di queste verifiche.

A differenza del capitolo 4.1.2.7, in questo Work Package l'uso di aggregati di silicato ha mostrato una diminuzione della resistenza rispetto agli aggregati di calcite/dolomite. Ciò conferma la dichiarazione del capitolo 4.1.4 sulla disomogeneità e sui problemi di fabbricazione. Tuttavia, non sono stati rilevati effetti degli agenti di protezione superficiale in relazione al campione 0.

Con l'introduzione di pori d'aria artificiali la resistenza potrebbe essere aumentata a tal punto che una valutazione con il diagramma 4.12(c) non avrebbe senso. Per questo il diagramma 4.12(d) mostra il deterioramento da agenti atmosferici dopo 56 cicli di gelo e disgelo. L'influenza positiva dell'elevato contenuto di pori d'aria artificiale nella miscela M7 si traduce in una riduzione della metà del deterioramento da agenti atmosferici. Il basso deterioramento da agenti atmosferici dei campioni 0 potrebbe essere di nuovo notevolmente ridotto dall'applicazione degli agenti di protezione superficiale.

Il diagramma 4.12(e) mostra l'andamento temporale del deterioramento da agenti atmosferici nei 56 cicli di gelo e disgelo. Si può notare che gli agenti di protezione superficiale riducono notevolmente il deterioramento da agenti atmosferici durante i primi 21 cicli di gelo e disgelo, ma che l'ulteriore percorso fino a 56 cicli di gelo e disgelo si verifica quasi parallelamente al deterioramento da agenti atmosferici del campione 0. Questo si spiega con la stabilizzazione della microstruttura in calcestruzzo sulla superficie, laddove eventuali difetti della superficie, come le microfratture, che sono presenti dopo la solidificazione, vengono idealmente riparati o almeno ridotti dagli agenti di protezione superficiale. Tuttavia, il meccanismo di base del deterioramento da agenti atmosferici tramite l'attacco di cicli di gelo/disgelo con agente antigelo non può essere completamente bloccato con gli agenti di protezione superficiale. Il timore descritto nel capitolo 3.1.4 che gli agenti di protezione superficiale chiudano i pori d'aria artificiali, impedendo loro di svolgere la loro funzione, non ha potuto essere confermato nel contesto di queste verifiche. Al contrario, l'uso di agenti di protezione superficiale ha ridotto il deterioramento da agenti atmosferici fino a un quarto.

In generale, come nel precedente Work Package, le verifiche sulla resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo mostrano l'effetto evidente dell'*agente di protezione superficiale 1*.

4.3.3 Conclusione

Nei test di laboratorio è stato possibile produrre travi molto omogenee da cui sono stati tagliati i campioni di prova. Anche la composizione di calcestruzzo utilizzata si è dimostrata adeguata ed è stato possibile ottenere le modifiche desiderate della composizione mantenendo la stessa lavorabilità. Per questi motivi, questa composizione e anche le dimensioni delle travi saranno riutilizzate anche per le verifiche sulle condizioni ambientali e i post-trattamenti nel Work Package 6.

Nell'ambito di questo Work Package è stato possibile ottenere i seguenti risultati:

È stata confermata l'influenza dei diversi valori acqua/legante e del contenuto di legante sulla porosità totale.

Come nei Work Package precedenti, non è stata rilevata una chiara correlazione tra la profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale e la porosità totale.

L'effetto positivo degli agenti di protezione superficiale sulla resistenza all'attacco dei cicli di gelo e disgelo con agenti antigelo è stato chiaramente dimostrato.

L'effetto dei pori d'aria artificiali non è ostacolato dagli agenti di protezione superficiale.

Nell'ambito di queste verifiche è stato determinato un contenuto ottimale di legante del cemento standard utilizzato della famiglia CEM II/A-LL 32.5 R di di 382 kg/m³ in relazione alla resistenza all'attacco di cicli di gelo e disgelo con agenti antigelo. Un ulteriore aumento del contenuto di legante ha portato ad una riduzione della resistenza.

L'impiego di agenti di protezione superficiale riduce notevolmente il deterioramento da agenti atmosferici entro i primi 21 cicli di gelo e disgelo. Questo suggerisce un indurimento della superficie che, tuttavia, non impedisce il meccanismo di base del deterioramento da agenti atmosferici.

4.4 Work Package 6

4.4.1 Condizioni ambientali e post-trattamento

4.4.1.1 Produzione e assegnazione dei campioni di prova

La seguente tabella 4.12 fornisce una panoramica delle travi prodotte e del loro successivo

N. travi	Denominazione	Temperatura	Applicazione		Pulizia	SPa
			Età	Temperatura		
Campioni di riferimento						
6-10	Superficie della cassaforma di riferimento	20 °C	21 giorni	20 °C	Sì	S
6-11	Superficie estratta di riferimento					SE
Influenza degli agenti disarmanti e di post-trattamento						
6-12	Agente disarmante				No	S
6-13	Agente di post-trattamento I	20 °C	21 giorni	20 °C	Sì	Superficie
6-14					No	
6-15	Agente di post-trattamento II				Sì	
6-16					No	
6-17	APS come agente di post-trattamento		A ^b		No	
Rivestire in calcestruzzo a 5 °C						
6-18	Riferimento 5 °C	7 giorni 5 °C,	21 giorni	20 °C	Sì	SE (S)
6-19	APS come post-trattamento a 5 °C	Resto 20 °C	A ^b		No	SE
Applicazione a -5 °C						
6-20	Applicazione a -5 °C	-5 °C 1 giorno				
6-21	Applicazione a -5 °C e acqua a spruzzo	prima dell'appl.	21 giorni	-5 °C	Sì	S

SP... Superficie di prova con S Superficie della cassaforma e SE... Superficie estratta ^b A... immediatamente dopo la scasseratura

Tabella 4.12: Panoramica delle travi prodotte del Work-Package 6 per analizzare l'influenza delle condizioni ambientali e del post-trattamento.

Le travi sono state prodotte nel laboratorio della ISB. Poiché era disponibile solo una betoniera da laboratorio con un volume utile di 45 L, è stata eseguita una prova di calcestruzzo fresco solo per la prima miscela di riferimento. Sono stati determinati i seguenti valori:

- Dimensione di spandimento = 40 cm
- Densità lorda = 2.540 kg/m^3
- Contenuto acqua = 166 kg/m^3 e quindi valore acqua/legante = 0,43
- Pori d'aria in calcestruzzo fresco = 1,0%

Il calcestruzzo fresco ha quindi proprietà paragonabili a quelle dei calcestruzzi dei Work Package 3 e 4. Per studiare l'influenza degli agenti disarmanti (travi 6-12), è stata applicata una quantità di agente disarmante maggiore rispetto al solito. L'agente disarmante in eccesso è salito sulla superficie della cassaforma durante la compattazione e si è diffuso su tutta la superficie durante la rimozione. Le travi da 6-13 a 6-17 sono state rivestite sulla superficie libera con l'apposito agente di post-trattamento o agente di protezione superficiale immediatamente dopo il getto. Le superfici della cassaforma sono state trattate immediatamente dopo la scasseratura.

L'agente di post-trattamento I è un agente di post-trattamento applicabile a spruzzo, privo di solventi, a base di un'emulsione acquosa contenente olio minerale con un buon effetto barriera ed è adatto per i rivestimenti successivi. L'agente di post-trattamento II è un agente di post-trattamento applicabile a spruzzo, privo di solventi, a base di un'emulsione acquosa di cera con un elevato effetto barriera. A causa della sua base di cera, l'agente di post-trattamento II non è adatto per i rivestimenti successivi.

Per simulare una temperatura ambiente di 5 °C tutti i componenti delle miscele sono stati conservati a 5 °C per 24 ore. In questo modo è stato possibile raggiungere una temperatura del calcestruzzo fresco di 7,2 °C.

Come si può vedere nella figura 4.6, sono già state rilevate chiare differenze durante l'applicazione degli agenti di protezione superficiali sui campioni di prova, che sono stati trattati con l'agente di post-trattamento II dopo il getto. Questo dato è in linea con la scheda tecnica, che si riferisce all'aumento del rischio di scivolamento sul bagnato. Nonostante la pulizia con un'idropulitrice ad alta pressione a circa 200 bar, gli agenti di protezione superficiale tendevano a formare delle perle e apparentemente non bagnavano l'intera superficie. A causa della colorazione rossa degli agenti di protezione superficiale per le proprietà coloranti fluorescenti dell'eosina, le perle sono particolarmente evidenti nella figura 4.6(a). Questi sono i campioni di prova delle travi 6-15 e 6-16.



(a) Confronto dopo il rivestimento dei campioni di prova per determinare la profondità di penetrazione

(b) Confronto dopo l'applicazione

Figura 4.6: Confronto delle superfici dopo l'applicazione

4.4.1.1 Valutazione dei test

La tabella 4.13 mostra l'assegnazione dei prodotti di protezione superficiale e del campione 0 del diagramma 4.13. Nel diagramma 4.13 sotto riportato, la superficie estratta viene indicata solo come Superficie.

Profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale

Le profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale sono rappresentate nel diagramma 4.13(a). Se si confrontano i campioni di riferimento 6-10 e 6-11 con le profondità di penetrazione del Work Package 4 nel diagramma 4.10, si può notare che, ad eccezione dell'agente di protezione superficiale 1, sulla superficie della cassaforma i campioni sono delle stesse dimensioni. Tuttavia, a causa della bassa profondità di penetrazione e della piccola sezione di misura (vedere anche la figura 4.4), la differenza di valore è ancora all'interno dell'incertezza di misura.

Dalla superficie della cassaforma si può notare che la profondità di penetrazione dell'agente di protezione superficiale 2 è notevolmente ridotta dall'agente disarmante. A differenza delle verifiche del Work Package 3,

con il rivestimento anche la profondità di penetrazione è stata significativamente ridotta a -5°C. Tuttavia, non è stato possibile osservare un'ulteriore riduzione della profondità di penetrazione dell'acqua a spruzzo. Si presume che gli agenti di protezione superficiale siano stati in grado di penetrare fino alle profondità misurate prima del congelamento.

Legenda

APS 1

APS 2

Campione 0

Tabella 4.13: Legenda APS

Le misurazioni della profondità di penetrazione sulla superficie estratta sono generalmente influenzate da un errore maggiore, poiché, a causa della rugosità della superficie, da un lato, la posizione esatta della superficie è difficile da riconoscere e, dall'altro, la distanza minima dalla superficie in calcestruzzo può trovarsi al di fuori del piano di osservazione. Tuttavia, dal diagramma si possono dedurre le seguenti affermazioni. Gli agenti di post-trattamento, in particolare l'agente di post-trattamento II, ostacolano la penetrazione degli agenti di protezione superficiale.

Porosità totale

Se si confronta la porosità totale del diagramma 4.13(b) con la porosità totale del Work Package 4 nel diagramma 4.11(a), si può notare che la porosità totale sulla superficie della cassaforma è diminuita di circa il 2%, mentre la porosità totale sulla superficie è aumentata di circa l'1%. Così, le porosità complessive rientrano nell'ambito del Work Package 5. Gli scostamenti dal Work Package 4 possono quindi essere attribuiti ai diversi metodi di compattazione e alle diverse dimensioni.

Tuttavia, si può notare che i risultati sulla superficie della cassaforma e sulla superficie estratta sono molto omogenei. Ciò è indice di una produzione e lavorazione molto uniforme delle singole miscele.

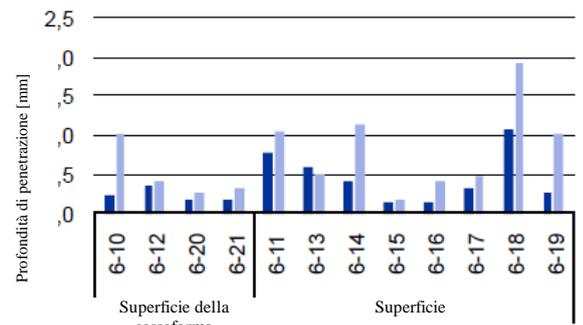
Resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo

La procedura del test e la valutazione dei risultati sono effettuate in modo analogo alla procedura del capitolo 4.2.2.

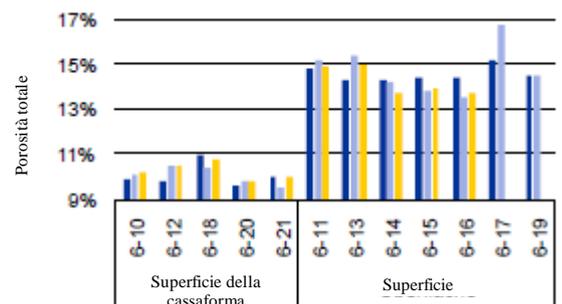
Le resistenze dei *campioni 0* dei campioni di riferimento 6-10 e 6-11 del diagramma 4.13(c) sono paragonabili alle resistenze del Work Package 4. Tuttavia, nel corso di queste verifiche, l'*agente di protezione superficiale 2* è stato in grado di ottenere lo stesso effetto sulla superficie della cassaforma dell'*agente di protezione superficiale 1*. Nessuno dei due agenti di protezione superficiale è stato in grado di mostrare alcun effetto sulla superficie estratta.

L'agente disarmante (6-12) ha aumentato significativamente la resistenza dei *campioni 0*. Questo è stato attribuito al modello sperimentale, in cui l'agente disarmante rimane sulla superficie e non viene rimosso. Pertanto, la penetrazione del liquido di prova può essere influenzata dall'effetto idrofobico dell'agente disarmante. Tuttavia, nella pratica, l'agente disarmante non fornisce alcuna protezione, in quanto può essere facilmente rimosso. L'agente disarmante non ha avuto alcuna influenza negativa sull'efficacia degli agenti di protezione superficiale, anche se l'efficacia relativa rispetto al *campione 0* sembra essere inferiore a quella del campione di riferimento.

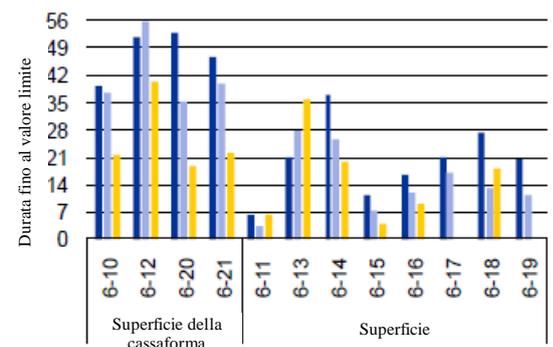
Pertanto, è difficile valutare i risultati delle verifiche sulla superficie estratta a causa della maggiore dispersione dei risultati delle misurazioni e talvolta si possono individuare tendenze contraddittorie. La



(a) Profondità di penetrazione dell'agente di protezione superficiale



(b) Porosità totale



(c) Resistenza

resistenza del campione 0 potrebbe essere significativamente aumentata dall'*agente di post-trattamento I*, ma gli effetti degli agenti di protezione superficiale si trovano all'interno del campo di dispersione del *campione 0*. Per l'*agente di post-trattamento II* la situazione è inversa. Non c'è nessuna influenza significativa sulla resistenza del *campione 0*, ma gli agenti di protezione superficiale mostrano un effetto chiaro. Tuttavia, lo scopo di questo progetto di ricerca non era quello di analizzare l'efficacia degli agenti di post-trattamento. Per quanto riguarda l'influenza degli agenti di protezione superficiale, tale influenza dovrebbe essere analizzata separatamente per ciascun agente di post-trattamento in base allo stato attuale.

Se si considera il momento dell'applicazione degli agenti di protezione superficiale, si possono riconoscere anche delle contraddizioni. Se gli agenti di protezione superficiale vengono utilizzati a temperature di getto di 20 °C come gli agenti di post-trattamento, dopo 21 giorni si può notare un significativo aumento della resistenza all'applicazione. A temperature di getto di 5 °C, il comportamento è invertito.

L'applicazione a -5 °C non interferisce con l'efficacia degli agenti di protezione superficiale. Anche il trattamento con acqua a spruzzo durante lo scongelamento non ha avuto influenze negative nel contesto di queste verifiche. Ciò conferma i risultati del Work Package 3.

4.4.1.2 Conclusione

Nell'ambito di questa parte del Work Package 6, si possono trarre i seguenti risultati:

- gli agenti disarmanti non compromettono l'efficacia degli agenti di protezione superficiale contro l'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo. Tuttavia, la pulizia della superficie è utile per ottenere una maggiore profondità di penetrazione e quindi una protezione potenzialmente maggiore attraverso gli agenti di protezione superficiale.
- In generale, non è possibile fornire indicazioni chiare sulle interazioni con gli agenti di post-trattamento. Allo stato attuale delle cose, questo aspetto deve essere analizzato separatamente per ogni combinazione di agente di post-trattamento e agente di protezione superficiale. Una previa pulizia non ha portato necessariamente ad un risultato migliore nel contesto di queste verifiche, ma è comunque consigliabile.
- Gli agenti di rivestimento superficiale esaminati hanno mostrato una limitata idoneità come agenti di post-trattamento. Non sono stati studiati gli effetti sullo sviluppo di altri parametri del calcestruzzo diversi dalla resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo. Inoltre, non è stata studiata nessuna modifica delle proprietà del calcestruzzo a vista.

Gli agenti di protezione superficiale analizzati sono adatti anche per l'applicazione su componenti in calcestruzzo a temperature intorno a -5 °C. Ciò significa che possono essere utilizzati anche a temperature inferiori al punto di congelamento.

4.4.2 Durabilità e successiva applicazione

4.4.2.1 Produzione e stoccaggio

Come descritto nel capitolo 3.1.5, le piastre di prova erano già state prodotte nell'ambito del Work Package 4. Si fa pertanto riferimento alle proprietà del calcestruzzo fresco e indurito di cui al capitolo 4.2.1.

Qui viene mostrata di nuovo solo l'assegnazione della famiglia di leganti usati per le composizioni:

- Composizione R1: CEM II/A-M (S-L) 42,5 N
- Composizione R2: CEM I 42,5 R - senza C3A
- Composizione R3: CEM II/A-LL 32,5 R

La figura 4.7 mostra lo stoccaggio delle piastre.



Figura 4.7: Stoccaggio delle piastre di prova

(a) Carbonatazione

Per i campioni di prova applicati successivamente, sono stati utilizzati solo gli *agenti di protezione superficiale 1*

4.4.2.2 Valutazione dei test

Nell'ambito del Work Package 4, è stato analizzato un numero maggiore di agenti per la protezione delle superfici. Poiché alcuni di essi erano già stati rivestiti, sono stati analizzati anche questi campioni di prova. L'assegnazione degli agenti di protezione superficiale nel campione 0 del diagramma 4.14 è riportata nella tabella 4.14.

I campioni di prova che sono già stati rivestiti come parte del Work Package 4 e poi puliti mensilmente con un'idropulitrice ad alta pressione a circa 200 bar sono descritti nel diagramma 4.14 alla voce Lavaggio 12x.

Profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale

La profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale dei campioni di prova puliti mensilmente è già stata determinata nel Work Package 4 sulla base dei campioni di prova del Work Package 4, in quanto questi sono stati prodotti e contemporaneamente rivestiti. dei campioni di prova del Work Package 4, in quanto questi sono stati prodotti e contemporaneamente rivestiti.

Come si può vedere nel diagramma 4.14(a), gli agenti di protezione superficiale sono riusciti a penetrare un po' più in profondità dopo un anno di pura carbonatazione. Convertendo l'idrossido di calcio in carbonato di calcio, il volume aumenta e i pori, soprattutto quelli di piccole dimensioni, vengono chiusi o si restringono. In questo modo i capillari non vengono più interrotti e gli agenti di protezione superficiale possono penetrare più in profondità nella pietra di cemento.

Legenda

APS 1

APS 2

APS 3

APS 4

APS 5

Campione 6

Tabella 4.14: Legenda APS

(b) Carbonatazione e carico di cloruri - immagine con soluzione satura di NaCl applicata

D'altra parte, il carico di cloruro aggiuntivo ha ostacolato la penetrazione. Ciò è dovuto alla chiusura dei pori a causa dei cristalli di sale difficilmente solubili, che non potevano essere dissolti dalla pulizia prima dell'applicazione.

Porosità totale

Così come la profondità di penetrazione, anche la porosità totale dei campioni puliti mensilmente è stata determinata nel Work Package 4 e pertanto non è stata analizzata nuovamente in queste verifiche. Tuttavia, si può presumere che i risultati siano della stessa portata dei campioni di prova puramente carbonatati.

A causa della carbonatazione pura, la porosità totale di tutte le composizioni è scesa a circa l'11%. Se i campioni fossero stati ancora contaminati da cloruri, la porosità totale sarebbe scesa a circa il 10%. Ciò può essere spiegato, così come gli effetti sulla profondità di penetrazione, dal volume ridotto dei pori a causa della carbonatazione e alla chiusura dei pori da parte di cristalli di sale scarsamente solubili, che in entrambi i casi hanno ridotto la porosità totale.

Resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo

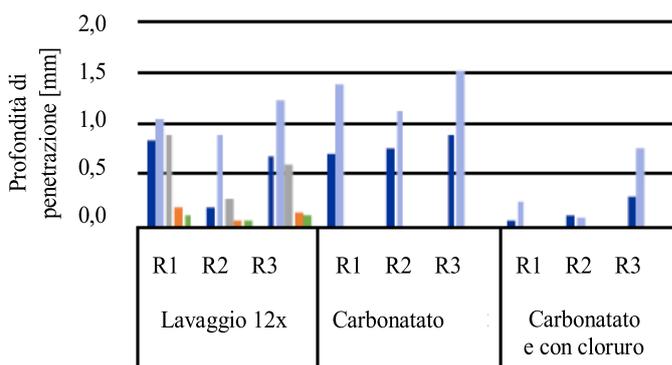
Per una migliore panoramica, i risultati dei campioni di prova puliti mensilmente e dei campioni di prova rivestiti successivamente sono riportati nel diagramma 4.14(c) e nel diagramma 4.14(d).

Nel caso degli agenti di protezione superficiale reattivi, si può notare che, dopo un anno di applicazione e pulizia mensile, non mostrano più alcun effetto. I campioni rivestiti con i rivestimenti non reattivi potrebbero raggiungere resistenze alla portata del Work Package 4. Si può escludere la rimozione della superficie in calcestruzzo rivestita mediante la pulizia, in quanto tale rimozione non è stata rilevata su nessun campione di prova.

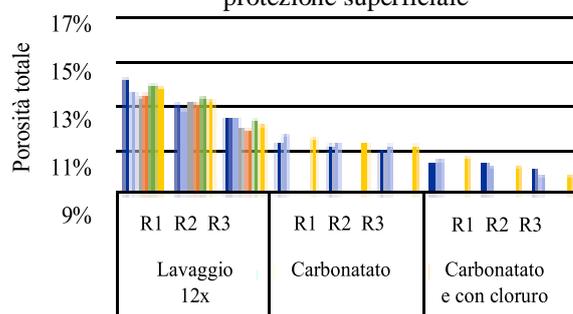
Si presume che le intere fasi C-S-H di nuova formazione siano state carbonatate nel corso del primo anno e quindi non abbiano avuto alcun effetto stabilizzante sulla superficie del calcestruzzo. I rivestimenti non reattivi non sono stati rimossi dalla superficie nemmeno con la pulizia e quindi sono stati in grado di mostrare il loro effetto idrofobico.

Se i campioni di prova sono stati rivestiti solo un anno dopo la produzione, generalmente gli agenti di protezione superficiale non hanno mostrato alcun effetto. Si può presumere che, a causa della carbonatazione negli strati vicini alla superficie non ci sia più disponibilità di idrossido di calcio e che quindi non sia possibile modificare la microstruttura del calcestruzzo.

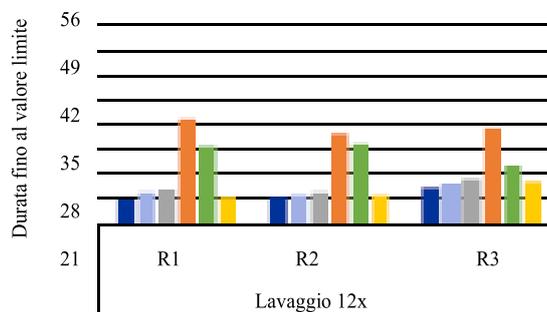
Il calo della resistenza dei campioni 0 è paragonabile ai risultati del diagramma 4.14(c)



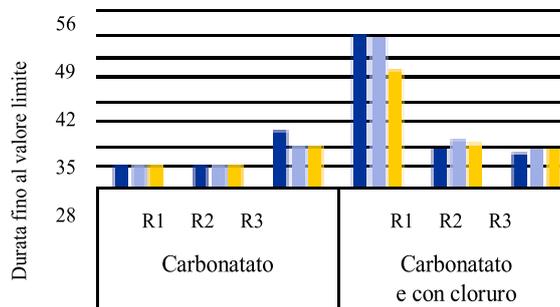
(a) Profondità di penetrazione dell'agente di protezione superficiale



(b) Porosità totale



(c) Resistenza dei campioni lavati 12 volte

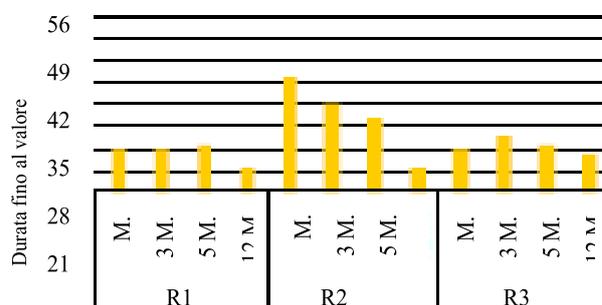


(d) Resistenza dei campioni di prova rivestiti successivamente

Diagramma 4.14: Risultati del Work Package 6 Durabilità e successiva applicazione

Fanno eccezione i campioni di prova della ricetta *R1*, che sono stati sottoposti alla carbonatazione e al carico di cloruro. La resistenza del *campione 0* è più che raddoppiata rispetto al Work-Package 4, ed è aumentata anche la resistenza dei campioni rivestiti. Poiché non è stato possibile trovare alcuna ragione legata alla tecnologia del calcestruzzo per l'aumento della resistenza e anche i campioni di tutte le altre serie hanno mostrato una chiara riduzione della resistenza, si presume che, per motivi inspiegabili, i residui salini abbiano portato ad una soluzione satura di NaCl con un punto di congelamento di $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poiché il punto più freddo si trova in un intervallo compreso tra $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$, è possibile che il liquido di prova in questi campioni non sia congelato e che quindi non abbia danneggiato la superficie del calcestruzzo. Per confermare questa ipotesi o per trovare un'altra causa, sarebbero necessarie ulteriori verifiche, che tuttavia non è più stato possibile effettuare nell'ambito di questo progetto di ricerca.

Il diagramma 4.14(e) mostra l'andamento temporale della resistenza all'attacco dei cicli di gelo/disgelo con agente antigelo ordinato in base all'età dei *campioni 0* all'inizio dell'esecuzione delle prove. In tutte le composizioni testate, dopo un anno si è potuta osservare una riduzione. Ciò è particolarmente evidente nella composizione *R2*.



(a) Andamento temporale della resistenza oltre dodici mesi

Diagramma 4.14: Risultati del Work Package 6 Durabilità e successiva applicazione

4.4.2.3 Conclusione

Nell'ambito delle verifiche sulla durabilità degli agenti di protezione superficiale, è stato dimostrato che gli agenti di protezione superficiale reattivi perdono la loro efficacia già dopo un anno. Si presume che le fasi C-S-H di nuova formazione negli strati vicini alla superficie siano trasformate dalla carbonatazione e che quindi la superficie del calcestruzzo non sia più protetta.

D'altra parte, i rivestimenti non reattivi non sono stati rimossi nemmeno dopo aver pulito 12 volte. Gli agenti di protezione superficiale reattivi non sono adatti ad essere applicati in un momento successivo, in quanto la quantità di idrossido di calcio presente negli strati vicini alla superficie non è più sufficiente per reagire con gli agenti di protezione superficiale e migliorare la microstruttura del calcestruzzo. In questo progetto di ricerca non è stata analizzata la possibilità di migliorare la resistenza mediante l'applicazione di rivestimenti non reattivi, poiché non era previsto sin dall'inizio e dopo la conclusione di questo Work Package non erano più disponibili campioni di prova.

Inoltre, con l'aumentare dell'età dei campioni è stata osservata una riduzione della resistenza agli attacchi di ciclo di gelo/disgelo con agenti antigelo. Poiché questi effetti hanno potuto essere determinati solo alla fine del progetto di ricerca, non è stato possibile esaminarli in dettaglio.

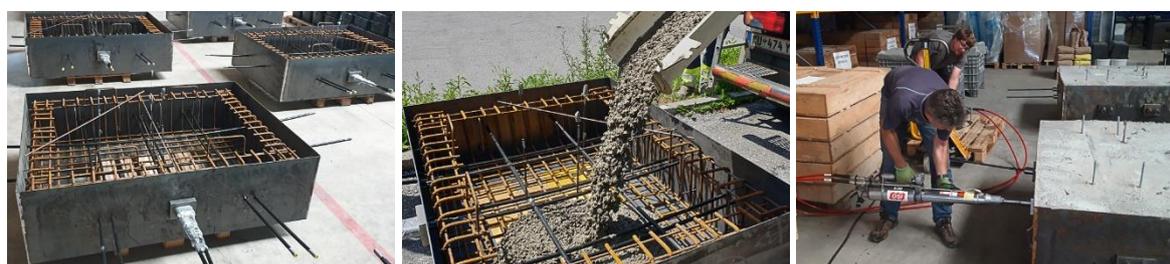
4.4.3 Prove del fuoco

4.4.3.1 Produzione e pre-compressione dei campioni di prova

Per il getto dei campioni è stato utilizzato un calcestruzzo a base di calcestruzzo della Galleria Fallender Bach, che ha costituito la base per la composizione del calcestruzzo della Galleria Senftenberg. I parametri del calcestruzzo fresco e indurito sono disponibili nella tabella 4.15.

Composizione del calcestruzzo	
Aggregati	Dolomite
Legante	CEM I 42,5 HS
Hydraulit M	290 kg/m ³ 80 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante =
0,44	180 kg/m ³
Additivo	Fluidificante
	0,64 % del cls
Agente per la formazione di pori d'aria	0,28% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito	
Temperatura del calcestruzzo fresco	26,1 °C
Dimensione di spandimento dopo 10 min.	51 cm
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco	5,6%
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni	47,9 MPa

Tabella 4.15: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito - Work Package 6 Prove del fuoco



(a) Preparazione della cassaforma

(b) Getto

(c) Pre-compressione

(d) Sollevamento al livello del fuoco tentativo

(e) Esecuzione della prova

(f) Vista nel forno dopo un

Figura 4.8: Immagini sulla produzione delle piastre di prova del fuoco e sulla prova del fuoco

Dopo il getto di calcestruzzo, le piastre di prova del fuoco sono state coperte e conservate per 14 giorni sui pannelli della



cassaforma. Dopodiché le piastre sono state alzate con una gru e conservate in posizione eretta fino a quando i trefoli erano tesi. Gli agenti di protezione superficiale sono stati applicati dopo 21 giorni. Due giorni prima dell'inizio della prova, le piastre sono state collocate nuovamente in posizione verticale e conservate su legname squadrato in modo da non danneggiare le superfici di

prova. In questi strati, i trefoli sono stati poi tesi in direzione longitudinale con 175 kN e in direzione trasversale con 180 kN.

4.4.3.2 Valutazione dei test

Come già spiegato nel capitolo 3.2.1.4, le prove sono state effettuate con una potenza del bruciatore ridotta. A causa della ridotta potenza di uscita e del rapido cedimento delle piastre di prova del fuoco, non è stato possibile ottenere una distribuzione omogenea della temperatura nella zona del fuoco, pertanto la temperatura è stata misurata in due punti vicino alla superficie di prova. Il primo sensore di temperatura è stato posizionato al centro della piastra e il secondo nella zona di uscita del fumo. Poiché i sensori si trovavano in un sottile tubo protettivo metallico, la posizione potrebbe essere stata spostata dalla prima lesione. La posizione dei sensori è mostrata nella figura 4.9.

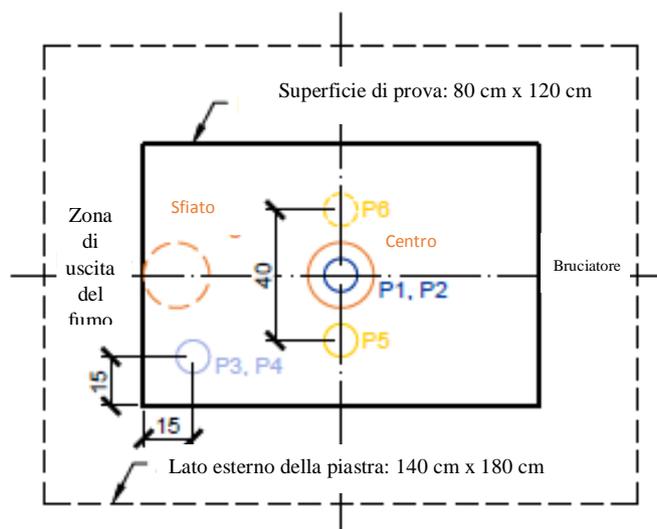


Figura 4.9: Posizione dei sensori nella piastra di prova del fuoco. I colori corrispondono alle linee del diagramma 4.15.

Il diagramma 4.15 mostra in modo esemplare due curve di temperatura durante le prove del fuoco. Nel diagramma 4.15(a) si può notare che la potenza del bruciatore è stata aumentata dopo un'ora e le temperature della zona del fuoco hanno continuato ad aumentare. Tre minuti dopo, l'intera superficie di prova si è improvvisamente staccata ad una

profondità compresa tra 1 cm e 2 cm. La fiamma del bruciatore è stata spenta dal rilascio improvviso e il bruciatore è stato commutato nella modalità di guasto, quindi la prova non ha potuto essere continuata per altri cinque minuti, come pianificato. La figura 4.10(a) mostra la superficie di prova immediatamente dopo il distacco dal fuoco. Le lesioni uniformi sono chiaramente visibili su tutta la superficie.

Il diagramma 4.15(b) mostra la curva tipica della temperatura delle piastre di prova del fuoco rivestite con un agente di protezione superficiale. In questo caso, dopo 18 minuti si sentivano chiari rumori di lesioni. Questo ha portato ad uno spostamento del sensore di temperatura sulla superficie della piastra nella zona centrale dell'area del fuoco, che ha registrato un aumento di temperatura, poiché si trovava più vicino alla fiamma. Cinque minuti dopo i primi rumori da lesioni, l'esperimento è stato interrotto. Come si può vedere nella figura 4.10(b) le lesioni non erano distribuite in modo omogeneo su tutta la superficie, il che può essere attribuito alla breve durata della prova.

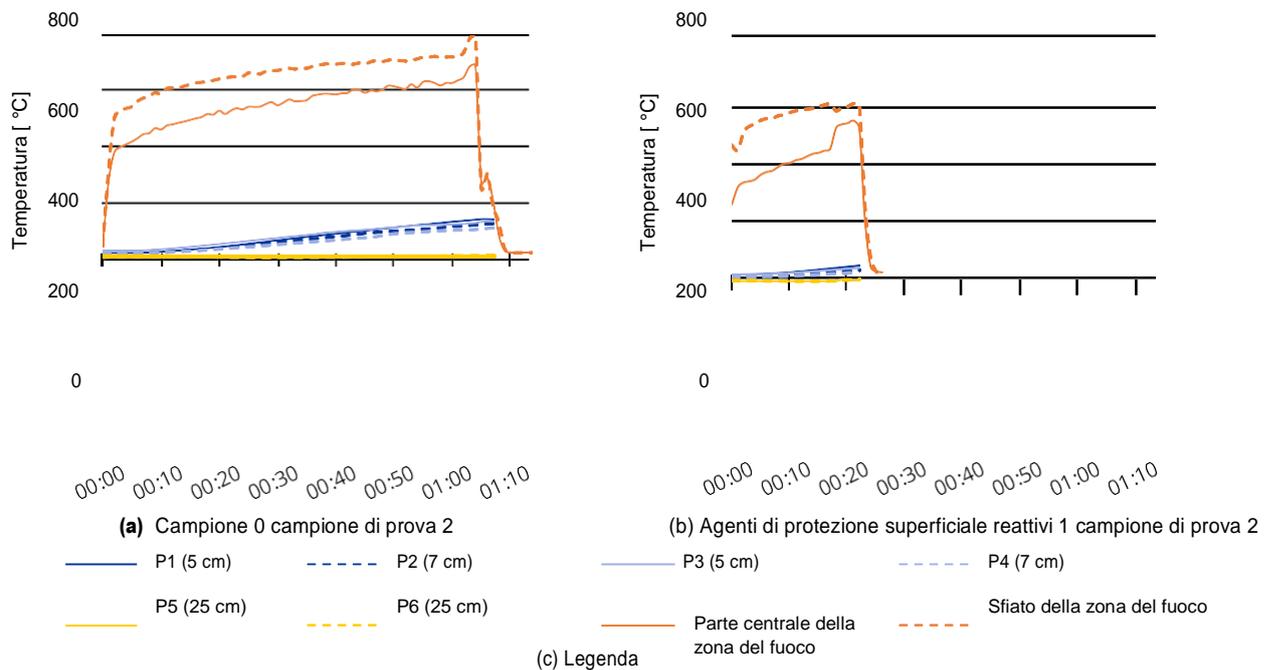


Diagramma 4.15: Curve di temperatura delle prove del fuoco



(a) Campione 0 campione di prova 2

(b) Agenti di protezione superficiale reattivi 1 campione di prova 2

Figura 4.10: Lesioni dopo le prove del fuoco

Come si può vedere nella tabella 4.16, la durata fino alla prima lesione udibile è scesa da 51 min per il campione 0 a 19 min per i campioni rivestiti. Si presume quindi che i pori siano chiusi dagli agenti di protezione superficiale e che il vapore acqueo che ne risulta non possa più fuoriuscire dal calcestruzzo. La pressione di vapore che ne deriva provoca rapidamente la prima lesione.

A causa della distribuzione molto disomogenea delle lesioni, non è stato effettuato alcun rilevamento della profondità delle lesioni, poiché questa nelle zone interessate supera nettamente la profondità di penetrazione di un massimo di 2 mm degli agenti di protezione superficiale.

Piastra di prova	Prima lesione udibile dall'inizio della prova		
	Parte della piastra 1	Parte della piastra 2	Valore medio
Campione 0	38 min	63 min	51 min
Agente di protezione superficiale 1	18 min	19 min	19 min
Agente di protezione superficiale 2	19 min	19 min	19 min

Tabella 4.16: Risultati della prova del fuoco

4.4.3.3 Conclusione

Si è potuto dimostrare che i pori sono così chiusi dagli agenti di protezione superficiale che la resistenza al fuoco del calcestruzzo diminuisce notevolmente. Pertanto, gli agenti di protezione superficiali analizzati non sono adatti se, a causa della situazione di installazione, si devono ipotizzare elevati carichi d'incendio

4.5 Work Package 7

4.5.1 A12 Galleria Senftenberg

Per la fabbricazione del guscio interno è stata utilizzata la seguente composizione con le relative caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito:

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Dolomite	
Legante	CEM I 42,5 R SR0	295 kg/m ³
	Fluasit	82 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,5	180 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	0,38% del cls
	Agente per la formazione di pori d'aria	0,23% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Temperatura del calcestruzzo fresco		25,4 °C
Dimensione di spandimento dopo 90 min.		56 cm
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco		4,7%
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni		35,0 MPa

Tabella 4.17: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito - A12 Galleria Senftenberg

La figura 4.11 mostra il lavoro svolto. Il posizionamento delle aree di prova all'interno dei tubi del tunnel della carreggiata in direzione di Innsbruck è illustrato nella figura 4.12.



Figura 4.11: A12 Galleria Senftenberg

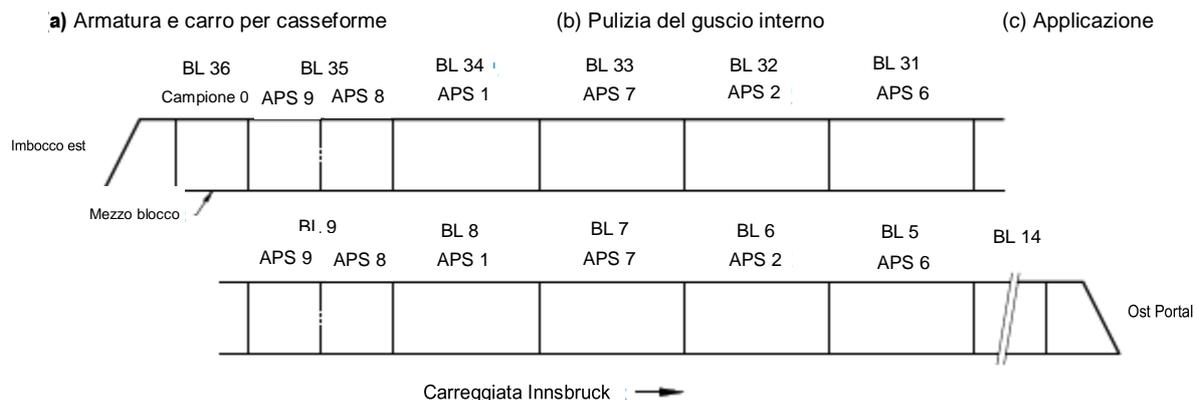


Figura 4.12: Schizzo delle aree di protezione

Contenuto di cloruro e profondità di penetrazione

Il contenuto di cloruro è stato analizzato a partire dall'imbocco ovest ad una profondità da 0 cm a 2 cm e da 2 cm a 4 cm. La disposizione degli agenti di protezione superficiale nel diagramma 4.16 corrisponde alla disposizione sulla costruzione a partire dal portale ovest. Questa è anche la direzione del traffico.

Se si considerano solo il campione 0 e gli agenti di protezione superficiale reattivi (APS 1, 2, 6 e 7 nel diagramma), si può notare una diminuzione approssimativamente lineare del contenuto di cloruro in entrambi i livelli di profondità. Ciò è dovuto alla diminuzione della nebulizzazione dopo l'ingresso nel tunnel e non all'effetto degli agenti di protezione superficiale. Solo i rivestimenti non reattivi (APS 8 e 9 nel diagramma) possono ridurre efficacemente la penetrazione del cloruro.

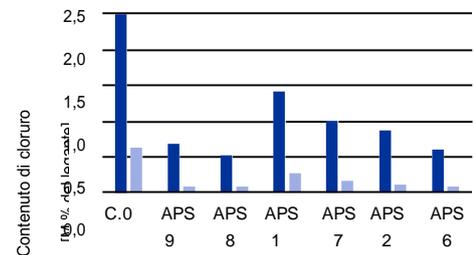


Diagramma 4.16: Contenuto di cloruro in due livelli di profondità - A12 Galleria Senftenberg

4.5.2 A12 raccordo Kufstein Süd

Per la fabbricazione della trave perimetrale è stata utilizzata la seguente composizione con le relative caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito:

<i>Composizione del calcestruzzo</i>		
Aggregati	Dolomite	
Legante	CEM I 42,5 R SR0	390 kg/m ³
	Fluasit	30 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,42	173 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	0,60% del cls
	Agente per la formazione di pori d'aria	0,30% del cls
<i>Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito</i>		
Temperatura del calcestruzzo fresco		27,6 °C
Dimensione di spandimento dopo 90 min.		49 cm
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco		7,2%
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni		43,2 MPa

La figura 4.13 mostra il lavoro svolto. Il posizionamento delle aree di prova è mostrato nella figura 4.14 .



(a) Applicazione

(b) dopo l'applicazione

(c) Vista dettagliata dell'agente di protezione superficiale 2

Figura 4.13: A12 raccordo Kufstein Süd

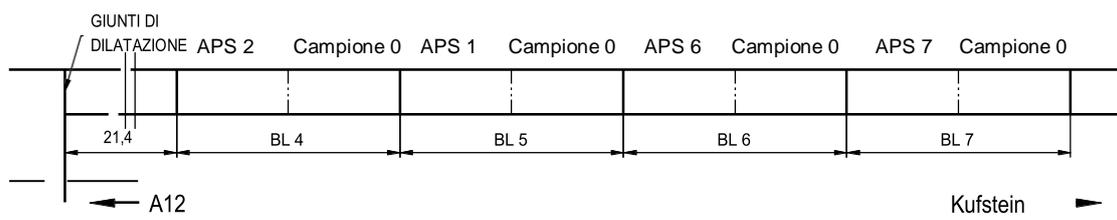


Figura 4.14: Schizzo delle aree di protezione

Contenuto di cloruro e profondità di penetrazione

Il campionamento è stato effettuato nell'area approssimativamente verticale della trave perimetrale ad una profondità da 0 cm a 2 cm e da 2 cm a 4 cm. Come si può vedere nel diagramma 4.17, ad entrambi i livelli di profondità non si nota alcun effetto della protezione superficiale. Poiché, al contrario, il carico della nebulizzazione non diminuisce nel corso della struttura portante, si può presumere che tutte le superfici di prova siano state esposte all'incirca

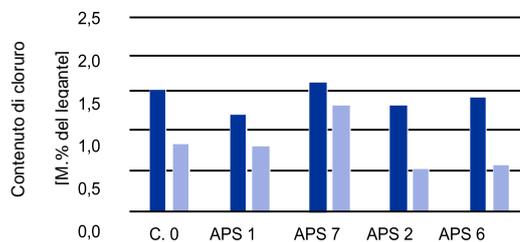


Diagramma 4.17: Contenuto di cloruro a due livelli di profondità - A12 raccordo Kufstein Süd

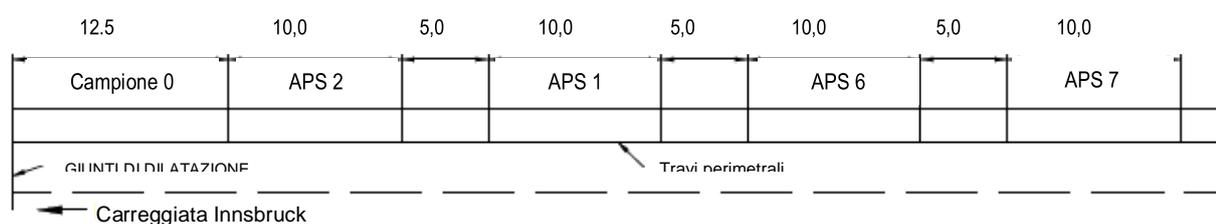
4.5.3 S16 Sannabrücke

Per la fabbricazione della trave perimetrale è stata utilizzata la seguente composizione con le relative caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito:

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Dolomite	
Legante	CEM II/A-M 42,5 N	400 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,43	1,73 kg/m ³
Additivo	Fluidificante Agente per la formazione di pori d'aria	1,00% del cls 0,23% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Temperatura del calcestruzzo fresco		19,1 °C
Dimensione di spandimento dopo 90 min.		48 cm
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco		5,8%
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni		64,0 MPa

Tabella 4.19: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito - S16 Sannabrücke

La figura 4.15 mostra il lavoro svolto. Il posizionamento delle aree di prova è mostrato nella figura 4.16 .



4.5.4 A13 Travi perimetrali Europabrücke

Per la fabbricazione della trave perimetrale è stata utilizzata la seguente composizione con le relative caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito:

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Dolomite	Legante
Legante	CEM I 42,5 R SR0	420 kg/m ³
	Durabind	20 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,43	182 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	1,10% del cls
	Agente per la formazione di pori d'aria	0,30% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Temperatura del calcestruzzo fresco		22,8 °C
Dimensione di spandimento dopo 90 min.		51 cm
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco		8,6%
Resistenza alla compressione dopo 28 giorni		43,8 MPa

Tabella 4.20: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito - A13 Travi perimetrali Europabrücke

La figura 4.17 mostra il lavoro svolto. Il posizionamento delle aree di prova è mostrato nella figura 4.18 .



(a) Panoramica

(b) Area rivestita con agenti di protezione superficiale 1

(c) Area rivestita con agenti di protezione superficiale 4

Figura 4.17: A13 Travi perimetrali dell'Europabrücke

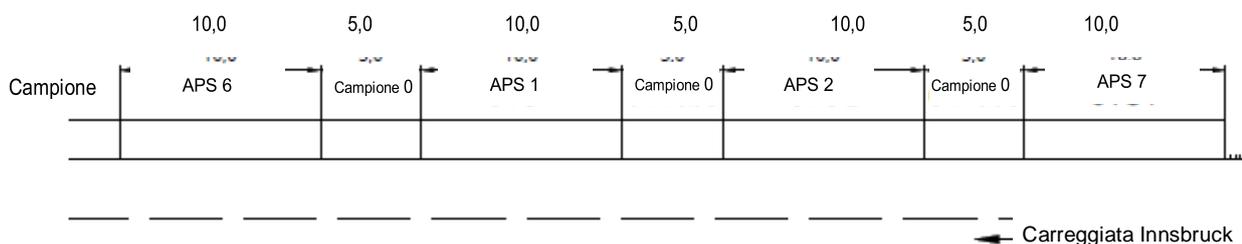


Figura 4.18: Schizzo delle aree di protezione

Contenuto di cloruro e profondità di penetrazione

Il campionamento è stato effettuato nell'area approssimativamente orizzontale della trave perimetrale, poiché la corsia non poteva essere bloccata per il campionamento, ai livelli di profondità da 0 cm a 2 cm e da 2 cm a 4 cm. Come si può vedere nel diagramma 4.18, ad entrambi i livelli di profondità non si nota alcun effetto degli agenti di protezione superficiale. Come nel capitolo 4.5.2, si può presumere che tutte le superfici di prova siano state esposte all'incirca allo stesso carico di cloruro.

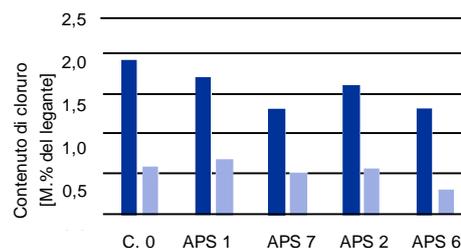


Diagramma 4.18: Contenuto di cloruro a due livelli di profondità - A12 raccordo Kufstein Süd

4.5.5 B180 Niklasgalerie

Per la fabbricazione del guscio interno è stata utilizzata la seguente composizione con le relative caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito:

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Dolomite	
Legante	CEM II/A-M 42,5 N	369 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,51	188 kg/m
Additivo	Fluidificante	0,90% del cls
	Agente per la formazione di pori d'aria	0,12% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Temperatura del calcestruzzo fresco	25,6 °C	
Dimensione di spandimento dopo 90 min.	48 cm	
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco	4,8%	
resistenza alla compressione dopo 28 gg	50,8 MPa	

Tabella 4.21: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito - B180 Niklasgalerie

La figura 4.19 mostra il lavoro svolto. Il posizionamento delle aree di prova è mostrato nella figura 4.20 .

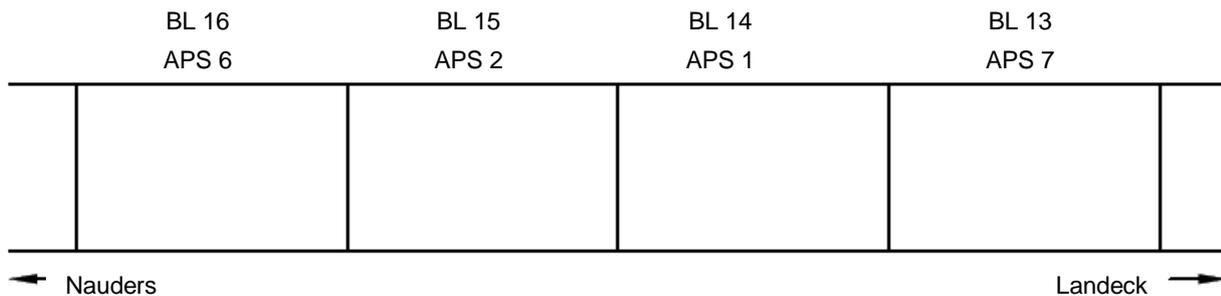


Figura 4.20: Schizzo delle aree di protezione

4.5.6 L13 Tafelweggalerie

Per la fabbricazione del guscio interno è stata utilizzata la seguente composizione:

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Silicato/carbonato	
Legante	CEM II/A-M 42,5 N	390 kg/m ³
	Fluasit TM	25 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,43	175 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	1,03% del cls
	Agente per la formazione di pori d'aria	0,47% del cls

Tabella 4.22: Composizione del calcestruzzo - L13 Tafelweggalerie

La figura 4.21 mostra il lavoro svolto. Il posizionamento delle aree di prova è mostrato nella figura 4.22 .



Figura 4.21: L13 Tafelweggalerie

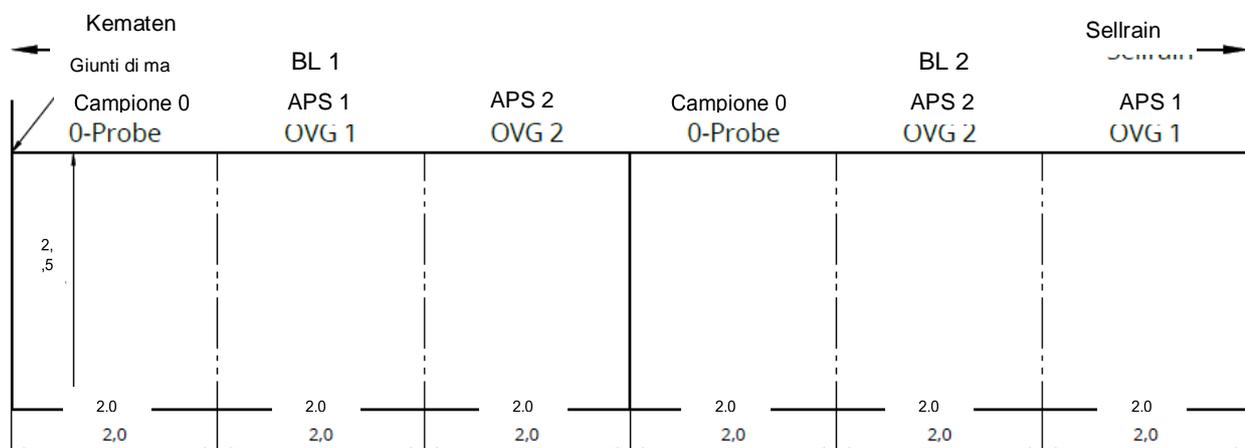


Figura 4.22: Schizzo delle aree di protezione

4.5.7 L36 Cavalcavia della pista di fondo Seefeld

Per la fabbricazione del guscio interno è stata utilizzata la seguente composizione:

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Silicato/carbonato	
Legante	CEM II/A-M 42,5 N	327 kg/m ³
	Hydraulit M	35 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,48	172 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	0,48% del cls
	Agente per la formazione di pori d'aria	0,17% del cls

Tabella 4.23: Composizione del calcestruzzo - L36 Cavalcavia della pista di fondo Seefeld



Figura 4.23: L36 Cavalcavia della pista di fondo Seefeld

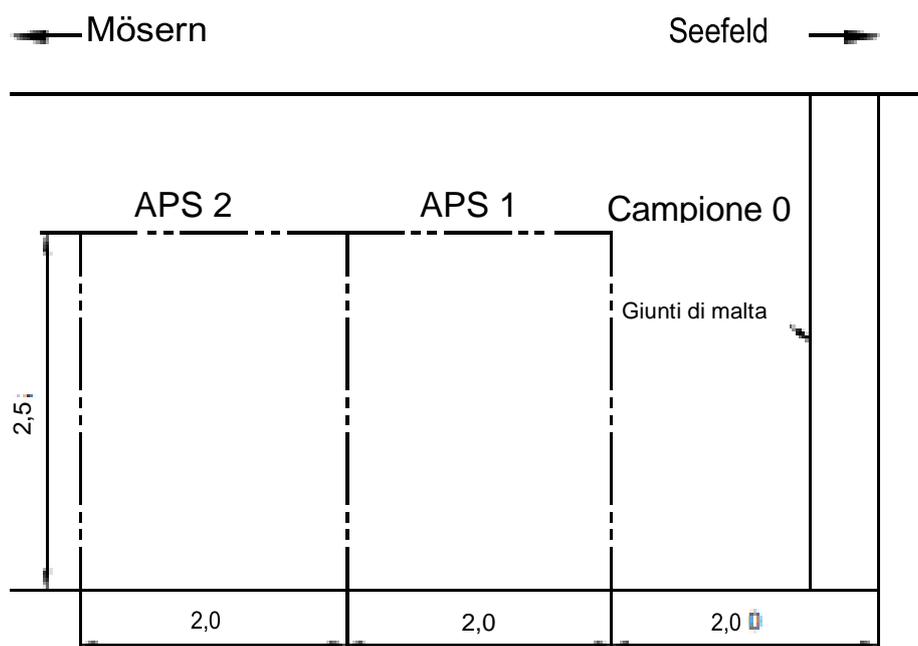


Figura 4.24: Schizzo delle aree di protezione

4.5.9 SS44 Passo di Giovo 10° tornante

Per la fabbricazione della trave perimetrale è stata utilizzata la seguente composizione con le relative caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito:

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	75% Gneis e 25% Quarzo anfibolite	
Legante	CEM I 42,5 R SR0	420 kg/m ³
	Rofament	20 kg/m ³
Rapporto acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,45	193 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	0,18% del cls
	Agente per la formazione di pori d'aria	0,10% del cl
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Temperatura del calcestruzzo fresco	29,9 °C	
Dimensione di spandimento dopo 90 min.	46 cm	
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco	6%	
resistenza alla compressione dopo 28 gg	Non verificata	

Tabella 4.25: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito - SS44 Passo di Giovo 10° tornante

La figura 4.27 mostra il lavoro svolto. Il posizionamento delle aree di prova è mostrato nella figura 4.28 .



(a) Estrazione della cassaforma

(b) Pulizia

(c) Area rivestita con agenti di protezione superficiale 4

Figura 4.27: SS44 Passo di Giovo 10° tornante

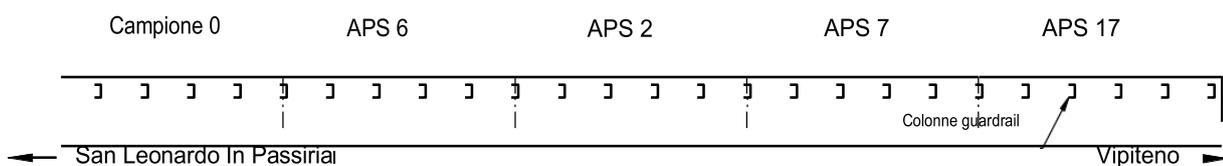


Figura 4.28: Schizzo delle aree di protezione

4.5.10 SS238 Strada delle Palade KM 10

Per la fabbricazione della trave perimetrale è stata utilizzata la seguente composizione con le relative caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito:

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati		Silicato
Legante	CEM II/A-LL 42,5 R	400 kg/m ³
	Micro Pozz	60 kg/m ³
Valore acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,45	182 kg/m ³
Additivo	Fluidificante	0,75% del
	Agente per la formazione di pori d'aria	0,36% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Temperatura del calcestruzzo fresco		19,3 °C
Dimensione di spandimento dopo 10 min.		44 cm
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco		6,5%
resistenza alla compressione dopo 28 gg		non verificata

Tabella 4.26: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito - S238 Strada delle Palade KM 10

La figura 4.29 mostra il lavoro svolto. Il posizionamento delle aree di prova è mostrato nella figura 4.30 .



(a) Preparazione al getto di calcestruzzo e alle prove di calcestruzzo fresco

(b) Preparazione all'applicazione

(c) Area con campione 0

Figura 4.29: SS238 Strada delle Palade KM 10

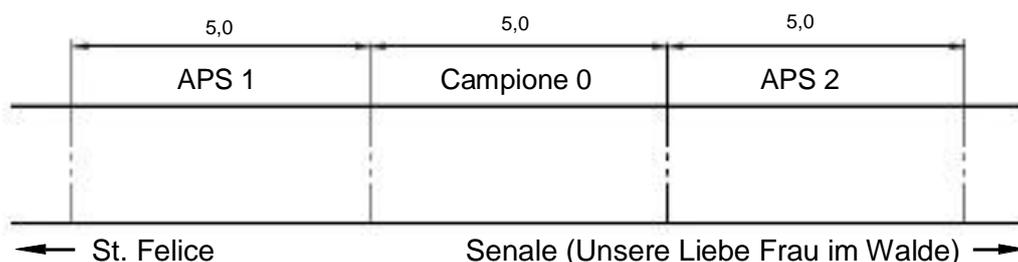


Figura 4.30: Schizzo delle aree di protezione

4.5.11 SS238 Strada delle Palade KM 16

Per la fabbricazione della trave perimetrale è stata utilizzata la seguente composizione con le relative caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito:

Composizione del calcestruzzo		
Aggregati	Quarzo / Porfido / Basalto / Granito	
Legante	CEM II/A-LL 42,5 R	390 kg/m ³
	Micro Pozz	60 kg/m ³
Valore acqua/legante - contenuto acqua	Acqua/legante = 0,47	193 kg/m ³
	Fluidificante	0,92% del
Additivo	Agente per la formazione di pori d'aria	0,23% del cls
Caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito		
Temperatura del calcestruzzo fresco	25,8 °C	
Dimensione di spandimento dopo 10 min.	44 cm	
Pori d'aria nel calcestruzzo fresco	7,0%	
resistenza alla compressione dopo 28 gg	non verificata	

Tabella 4.27: composizione del calcestruzzo, caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito - S238 Strada delle Palade KM 16

La figura 4.31 mostra il lavoro svolto. Il posizionamento delle aree di prova è mostrato nella figura 4.32 .



(a) Preparazione al getto di calcestruzzo e alle prove di calcestruzzo fresco

(b) Preparazione all'applicazione

(c) Area con campione 0

Figura 4.31: SS238 Strada delle Palade KM 16

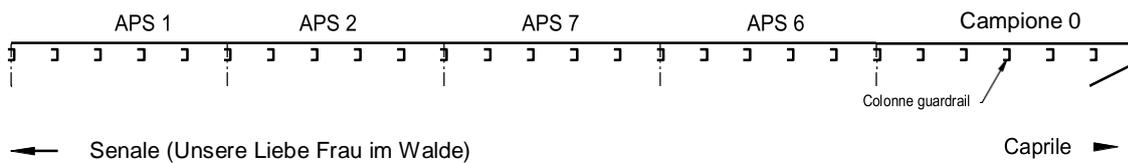


Figura 4.32: Schizzo delle aree di protezione

4.6 Riassunto

4.6.1 Effetto degli agenti di protezione superficiale reattivi

I singoli Work Package hanno permesso di ottenere i seguenti risultati sul modo d'azione degli agenti di protezione superficiale reattivi.

- La profondità di penetrazione degli agenti di rivestimento superficiale non è stata influenzata in modo significativo dalla direzione di applicazione (verticale, orizzontale, sopra la testa), da un possibile pre-trattamento (essiccazione a 50 °C o pulizia ad alta pressione), dall'applicazione a basse temperature (-5 °C) e dal carico di acqua a spruzzo, dalla tecnica di applicazione (a spruzzo o a rullo), né dagli aggregati utilizzati (calcite/dolomite o silicato)
- Per le composizioni di calcestruzzo analizzate, è stato possibile determinare una profondità massima di penetrazione degli agenti di protezione superficiali di circa 2,5 mm. Questo valore è ben al di sotto delle specifiche del produttore da 20 mm a 30 mm.
- La porosità totale non viene modificata in modo significativo dall'applicazione, a causa della bassa profondità di penetrazione.
- La profondità di penetrazione dell'acqua potrebbe essere leggermente ridotta dagli agenti di protezione superficiale. Ciò indica una riduzione del volume dei pori, che è troppo bassa per influenzare la porosità totale dei 2 cm superiori del calcestruzzo. Nonostante la ridotta profondità di penetrazione dell'acqua, la penetrazione dei cloruri non ha potuto essere influenzata nelle verifiche pratiche.
- Con l'uso di agenti di protezione superficiale, la resistenza all'attacco acido può essere leggermente aumentata. Tuttavia, l'eventuale impiego di agenti di protezione superficiale per il rivestimento di impianti di decantazione deve essere esaminato nel dettaglio, poiché non si può escludere che i prodotti di protezione superficiale abbiano un'influenza negativa sulla formazione di un biofilm protettivo sulla superficie del calcestruzzo.
- È stato osservato un significativo aumento della resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo. Questo aumento dipende dal legante utilizzato e dal suo contenuto di idrossido di calcio. Se il contenuto di idrossido di calcio diminuisce, diminuisce anche la possibilità di formazione di nuove fasi C-S-H da parte degli agenti di protezione superficiale reattivi. Nell'ambito delle verifiche, pertanto, non è stato possibile rilevare alcun effetto degli agenti di protezione superficiale su calcestruzzi vecchi di un anno. Inoltre, la resistenza diminuisce con l'aumentare dell'età del rivestimento. Già dopo un anno non è stato possibile rilevare alcun effetto sui campioni 0.
- La resistenza allo strappo generalmente è leggermente aumentata dagli agenti di protezione superficiale. Tuttavia, una superficie più liscia riduce anche l'adesione con gli strati rivestiti.
- Se gli agenti di protezione superficiale vengono utilizzati per il rivestimento di calcestruzzi con pori d'aria artificiali, la loro efficacia per incrementare la resistenza all'attacco di cicli gelo/disgelo con agenti antigelo è notevolmente aumentata. Questo effetto è stato osservato soprattutto durante i primi 21 cicli di gelo/disgelo. Questo suggerisce un indurimento della superficie che, tuttavia, non impedisce il meccanismo di base del deterioramento da agenti atmosferici.
- Gli agenti di rivestimento superficiale reattivi hanno mostrato una limitata idoneità all'uso come agenti di post-trattamento. Non sono stati studiati gli effetti sullo sviluppo di altri parametri del calcestruzzo diversi dalla resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo. Inoltre, non è stata studiata nessuna modifica delle proprietà del calcestruzzo a vista.
- L'influenza degli agente di post-trattamento sull'effetto degli agenti di protezione superficiale dipende dalla combinazione dei due agenti e deve essere analizzata singolarmente nella pratica. La pulizia della superficie dagli agenti di post-trattamento non ha portato necessariamente ad una maggiore efficacia dei prodotti di protezione superficiale.

- La resistenza al fuoco del calcestruzzo testato senza microfibre plastiche è stata notevolmente ridotta dagli agenti di protezione superficiale.

4.6.2 Effetto dei rivestimenti non reattivi

I rivestimenti non reattivi sono stati studiati solo marginalmente, in quanto non erano l'obiettivo principale di queste verifiche. Tuttavia, sono stati ottenuti i seguenti risultati.

- Come previsto, i rivestimenti giacevano solo sulla superficie dei campioni di prova e non penetravano in modo significativo nella microstruttura del calcestruzzo.
- Grazie all'effetto idrofobizzante, la penetrazione di soluzioni acquose nella struttura in calcestruzzo è stata notevolmente ridotta. Da un lato, questo ha ridotto la penetrazione dei cloruri. Dall'altro, nell'ambito delle verifiche sulla resistenza all'attacco di cicli di gelo/disgelo con agenti antigelo, ha peggiorato anche la penetrazione di acqua e successivamente della soluzione antigelo, aumentando significativamente la resistenza a questo carico. Anche dopo un anno, è stato possibile osservare questo effetto in misura quasi immutata. Tuttavia, è stato riscontrato che questa protezione viene eliminata anche da un minimo difetto del rivestimento, poiché la microstruttura del calcestruzzo non viene modificata. Si può quindi presumere che questi rivestimenti debbano essere rinnovati ad intervalli regolari.

Molte domande sui rivestimenti non reattivi sono rimaste senza risposta, poiché la risposta a queste domande avrebbe superato la portata del progetto di ricerca.

4.6.3 Ulteriori risultati

Oltre alle modalità d'azione degli agenti di protezione superficiale, nell'ambito di questo progetto di ricerca si potrebbero ottenere o confermare anche i seguenti risultati.

- Una qualità molto omogenea del calcestruzzo è di importanza decisiva per verifiche di questa portata. Ciò non poteva essere garantito all'inizio delle verifiche, il che ha reso necessarie modifiche alla struttura generale del procedimento della verifica. Questo problema potrebbe essere risolto con la produzione di campioni su larga scala in una fabbrica di prefabbricati e l'accurata produzione di singole miscele su scala di laboratorio.
- L'utilizzo di manti assorbenti delle casseforme è stato in grado di migliorare notevolmente la qualità della superficie del calcestruzzo. Questo si ottiene, da un lato, grazie all'assorbimento dell'acqua in eccesso nel manto della cassaforma all'inizio dell'idratazione, che riduce il valore medio acqua/legante in superficie, dall'altro lato, alla restituzione dell'acqua durante l'idratazione, che riduce il ritiro.
- La porosità del calcestruzzo aumenta sia con l'aumento del valore medio acqua/legante, sia con l'aumento del contenuto di legante.
- Un aumento del contenuto di legante non comporta necessariamente una maggiore resistenza all'attacco di cicli gelo/disgelo con agenti antigelo. Dopo aver superato un contenuto ottimale di legante, si è potuta osservare una significativa riduzione della resistenza. In pratica, questo significa che, a seconda del legante utilizzato e degli additivi utilizzati, si può ottenere un contenuto ottimale di legante che ottimizza, da un lato, l'uso delle risorse e, dall'altro, la durata delle superfici in calcestruzzo.
- Una copertura sufficiente del calcestruzzo è di importanza decisiva per la protezione anticorrosione dell'armatura, poiché il contenuto di cloruro negli strati vicini alla superficie può superare i valori limite già dopo pochi anni di prove e valutazioni.

5 Attività di comunicazione

5.1 Incontri

Incontri			
Data	Luogo	Partecipanti	Orario
17.01.2017	Varna, ISB	Julian Kritzingler, Daniel Müllauer, Georg Schiner, Florian Schnitzler, Jessica Stablum, Andrea Thaler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	ore 13:00 - 17:30
01.02.2017	Varna, ISB	Lisa Eiterer, Julian Kritzingler, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Andrea Thaler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	ore 09:00 - 12:00
01.02.2017	Varna, ISB	Lisa Eiterer, Julian Kritzingler, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Andrea Thaler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	ore 13:00 - 15:00
23.02.2017	Varna, ISB	Patrick Gasteiger, Julian Kritzingler, Daniel Müllauer, Georg Schiner, Florian Schnitzler, Andrea Thaler	ore 09:00 - 15:00
27.04.2017	Varna, ISB	Julian Kritzingler, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Andrea Thaler	ore 11:00 - 15:00
18.05.2017	Varna, ISB	Gianluca Liberi, Angelo Locaspi, Marc Morgante, Georg Schiner, David Quattrociocchi, Stefan Vivaldelli, Gerardo Vuocolomga	-
22.06.2017	Ötztal-Bahnhof TIQU	Lisa Eiterer, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	ore 16:00 - 17:00
26.07.2017	Varna, ISB	Julian Kritzingler, Daniel Müllauer	ore 09:00 - 11:00
25.10.2017	Varna, ISB	Lisa Eiterer, Julian Kritzingler, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Andrea Thaler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	ore 09:00 - 12:00

Tabella 5.1: Appuntamenti e partecipanti degli incontri

Data	Luogo	Incontri	
		Partecipanti	Orario
22.11.2017	Varna, ISB	Lisa Eiterer, Julian Kritzinger, Daniel Müllauer, Florian Schnitzler, Andrea Thaler, Dietmar Thomaseth, Jasmin Wallner	ore 09:00 - 12:00
05.02.2018	Ötztal-Bahnhof, TIQU	Lisa Eiterer, Patrick Gasteiger, Julian Kritzinger, Jürgen Mayr, Daniel Motz, Bernhard Primisser, Georg Sammer, Alexander Schweigl, Heinz Thaler, Dietmar Thomaseth, Stefan Wallnöfer, rappresentante produttore vetro solubile	ore 13:00 - 17:00
09.02.2018	Ötztal-Bahnhof, TIQU	Lisa Eiterer, Alexander Schweigl, Heinz Thaler, Dietmar Thomaseth, Stefan Wallnöfer	ore 13:00 - 17:00

Tabella 5.1: Appuntamenti e partecipanti degli incontri

5.2 Eventi pubblici

<i>Eventi pubblici</i>		
Data	Evento	Luogo
10.03.2015	1° Kick-off meeting	Brennero "Plessi Museum Autostrada del Brennero S.p.A
01.02.2017	2° Kick-off meeting	Varna, ISB
15.09.2017	Open house	Varna, ISB
25.10.2017	Interreg ITAT 1004 Concrete	Varna, ISB
16. - 17.11.2017	Giornate dell'edilizia interalpina	Bressanone
08.10.2018	3° Kick-off meeting	Varna, ISB
18.12.2019	Incontro finale INTERREG-Concrete	Varna, ISB

Tabella 5.2: Appuntamenti degli eventi pubblici

5.3 Opuscolo



Ufficio del Governo del Land del Tirolo
Eduard-Wallnöfer-Platz 3
A-6020 Innsbruck

Provincia autonoma di Bolzano – Südtirol
Südtiroler Qualitätszentrum für Umwelt, Bau und Rohstoffe GmbH (Centro di qualità innoce per l'ambiente, l'edilizia e le materie prime)
Gewerbestraße 4
A-6430 Dolfs-Bahnhof

Institut Südtiroler Baustofftechnologie KGmbH
Pflanzestraße 1
I-39040 Varna (BZ)

Kofler & Rech AG
Industriezone 24
I-39030 Olana (BZ)

Beton Eisack GmbH
Spalwiese 14
I-39034 Klausen (BZ)

TWAG – Tiroler Wasserkraft AG
Eduard-Wallnöfer-Platz 2
A-6020 Innsbruck

A22 Brennerautobahn AG
Via Bellino 10
I-38121 Trento (TN)

ASFINAG Bauund Management GmbH
Möckelstraße 16
A-1030 Vienna

Unionbau GmbH
Gewerbestraße 11
I-39032 Campo Tures (BZ)

Ing. Hans Bodner BaugesmbH & COKG
Salmustraße 57
A-6330 Kühtai

Universität Innsbruck
Innsitz 52
A-6020 Innsbruck

CONCRETE CONCRETE ITAT 1004 ITAT 1004

Protezione superficiale di opere in calcestruzzo –
Aumento della durabilità tramite protezioni
innovative

Protezione superficiale di opere in calcestruzzo–



Aumento della durabilità tramite protezioni
innovative

„Gefördert durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung und Interreg V-A Italien-Österreich 2014-2020“

„Finanziato dal fondo europeo per lo sviluppo regionale e Interreg V-A Italien-Österreich 2014-2020“

(a) Parte esterna

Projektpartner

Partner di progetto

TIQU-Tiroler Qualitätszentrum für Umwelt, Bau und Rohstoffe GmbH |
Institut Südtiroler Baustofftechnologie KGmbH | Kofler & Rech AG | Beton Eisack GmbH



Assoziierte Partner | Partner associati:

Amt der Tiroler Landesregierung | Autonome Provinz Bozen – Südtirol | TWAG – Tiroler Wasserkraft AG |
A22 Brennerautobahn AG | ASFINAG Bauund Management GmbH | Unionbau GmbH | Ing. Hans Bodner
Bau gesmbH & COKG | Universität Innsbruck

Informationen zum Projekt erhalten sie unter | Per informazioni
riguardo il progetto è possibilervolgersi a:

TIQU-Tiroler Qualitätszentrum für Umwelt, Bau und Rohstoffe GmbH
Tel. 0043 / 699 12091021 | office@tiqu.at

Ziele

Die Zielsetzung des Projektes liegt im Einsatz
neuartiger Oberflächenvergütungen bei
Betonbauwerken, um die
Instandsetzungsintervalle und die
Lebensdauer zu verlängern.

Der Fokus liegt dabei auf Ingenieurbauwerken im
Bereich der Infrastruktur im alpinen Raum.



Schäden von Galeriebauten
Danni sulle costruzioni di gallerie

Obiettivi

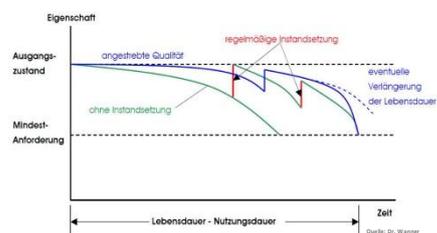
L'obiettivo del progetto è quello di prolungare gli
intervalli di manutenzione e il ciclo di

vita delle costruzioni in calcestruzzo,
tramite l'impiego di nuove protezioni
superficiali.

L'attenzione è rivolta alle costruzioni e
le infrastrutture in ambito alpino.



Schäden an Brückenbauten
Danni sulle costruzioni di ponti



5.4 Pagina iniziale

La pagina iniziale del progetto di ricerca è disponibile su tiqu.at/interreg. La figura 5.2 rappresenta la pagina iniziale attuale.



Figura 5.2: Pagina iniziale

5.6 Poster e roll up



Concrete – ITAT 1004

Oberflächenvergütung von Betonbauwerken – Erhöhung der Dauerhaftigkeit durch neuartige Schutzmaßnahmen

Protezione superficiale di opere in calcestruzzo – Aumento della durabilità tramite protezioni innovative

Ziele

Obiettivi

Die Zielsetzung des Projektes liegt im Einsatz neuartiger Oberflächenvergütungen bei Betonbauwerken, um die Instandsetzungsintervalle und die Lebensdauer zu verlängern. Der Fokus liegt dabei auf Ingenieurbauwerken im Bereich der Infrastruktur im alpinen Raum.

l'obiettivo del progetto è quello di prolungare gli intervalli di manutenzione e il ciclo di vita delle costruzioni in calcestruzzo, tramite l'impiego di nuove protezioni superficiali. L'attenzione è rivolta alle costruzioni e le infrastrutture in ambito alpino.



Schäden an Galeriebauten

Danni sulle costruzioni di gallerie



Schäden an Brückenbauten

Danni sulle costruzioni di ponti



www.tiqu.at

TIQU-
 Tiroler Qualitätszentrum
 Für Umwelt, Bau und Rohstoffe
 GmbH Gewerbestraße
 2° 6430 Ötztal Bahnhof

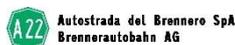


Figura 5.5: Poster



Figura 5.6: Roll up

A Elenchi

A.1 Bibliografia

Park, Sang-Soon u. a. (2014). „Evaluation of Concrete Durability Performance with Sodium Silicate Impregnants“. English. In: *Advances in Materials Science and Engineering 2014*, S. 1–11.

Youn, B.Y. (2010). *Beurteilung der Wirksamkeit von Wasserglas zur Verbesserung des Verschleißwiderstandes bei Industrieböden*. Bauforschung / T. Fraunhofer-IRB-Verlag. ISBN: 9783816783527. URL: <https://books.google.at/books?id=Elf8ZwEACAAJ>.

A.2 Indice delle tabelle

2.1	Agenti di rivestimento superficiale utilizzati	7
3.1	Classificazione dei Work Package.....	8
3.2	lista dei metodi di prova	18
4.1	Composizione e caratteristiche -primo getto - WP 3	23
4.2	Composizione e caratteristiche -secondo getto - WP 3.....	24
4.3	Composizione e caratteristiche -terzo getto - WP 3.....	25
4.4	Legenda degli agenti di protezione superficiale analizzati - WP 3	26
4.5	Legenda dei manti delle casseforme analizzati - WP 3.....	28
4.6	Composizione e caratteristiche -primo getto R1) - WP 4.....	36
4.7	Composizione e caratteristiche -secondo getto R2) - WP 4	36
4.8	Composizione e caratteristiche -terzo getto R3) - WP 4.....	37
4.9	Legenda degli agenti di protezione superficiale analizzati - WP 4	37
4.10	Panoramica dei tipi di calcestruzzo nel Work Package 5	42
4.11	Legenda degli agenti di protezione superficiale analizzati - WP 5	43
4.12	Panoramica delle travi prodotte del Work-Package 6 per analizzare l'influenza delle condizioni ambientali e del post-trattamento.....	46
4.13	Legenda degli agenti di protezione superficiale analizzati - WP 6 Ambiente e agente di post-trattamento.....	47
4.14	Legenda degli agenti di protezione superficiale analizzati - WP 5 Durabilità	50
4.15	Composizione e caratteristiche del calcestruzzo - Work Package 6 Prove del fuoco.....	53
4.16	Risultati della prova del fuoco	55
4.17	Composizione e caratteristiche del calcestruzzo - A12 Galleria Senftenberg	57
4.18	Composizione e caratteristiche del calcestruzzo - A12 raccordo Kufstein Süd.....	59
4.19	Composizione e caratteristiche del calcestruzzo - S16 Sannabrücke.....	61
4.20	Composizione e caratteristiche del calcestruzzo - A13 Europabrücke.....	62
4.21	Composizione e caratteristiche del calcestruzzo - B180 Niklasgalerie	64
4.22	Composizione del calcestruzzo - L13 Tafelweggalerie.....	65

4.23	Composizione del calcestruzzo - L36 Cavalcavia della pista di fondo Seefeld	66
4.24	Composizione e caratteristiche del calcestruzzo - LS114 Plan	67
4.25	Composizione e caratteristiche del calcestruzzo -SS44 Passo di Giovo 10° tornante.....	68
4.26	Composizione e caratteristiche del calcestruzzo - SS238 Strada delle Palade KM 10.....	69
4.27	Composizione e caratteristiche del calcestruzzo - SS238 Strada delle Palade KM 16.....	70
5.1	Appuntamenti e partecipanti degli incontri	73
5.2	Appuntamenti degli eventi pubblici	74

A.3 Indice delle figure

1.1	Figure di lesioni esemplari.....	4
2.1	Influenza del vetro solubile sul sistema dei pori	7
3.1	Disposizione dei campioni all'interno delle piastre di prova - WP 3	9
3.2	Manti delle casseforme analizzati - WP3.....	10
3.3	Pittogrammi delle influenze esaminate - WP 3	11
3.4	Disposizione dei campioni all'interno delle piastre di prova - WP 4	13
3.5	Rendering del livello del fuoco in fase di progettazione - Prove del fuoco WP 6.....	15
3.6	Immagini SEM della qualità superficiale degli agenti di protezione superficiale	19
3.7	Analisi della superficie degli agenti di protezione superficiale	20
3.8	Determinazione delle profondità di penetrazione	20
4.1	Immagini del primo getto di calcestruzzo - WP 3	22
4.2	Distribuzione del deterioramento da agenti atmosferici in caso di riempimento verticale - prove supplementari WP 3	32
4.3	Immagini sulla produzione dei campioni di prova - WP 4	35
4.4	Immagini della profondità di penetrazione al microscopio a fluorescenza -WP 4.....	38
4.5	Immagini sulla produzione dei campioni di prova - WP 5	41
4.6	Confronto delle superfici dopo l'applicazione - WP 6 Condizioni ambientali e di post-trattamento	47
4.7	Stoccaggio delle piastre di prova - WP 6 Durabilità	50
4.8	Immagini sulla produzione dei campioni di prova - WP 6 Prove del fuoco.....	53
4.9	Posizione dei sensori - WP 6 Prove del fuoco	54
4.10	Lesioni dopo le prove del fuoco.....	55
4.11	A12 Galleria Senftenberg.....	57
4.12	Schizzo delle aree di protezione - A12 Galleria Senftenberg	57
4.13	A12 raccordo Kufstein Süd	59
4.14	Schizzo delle aree di protezione - A12 raccordo Kufstein Süd	59
4.15	S16 Sannabrücke	61
4.16	Schizzo delle aree di protezione - S16 Sannabrücke.....	61
4.17	A13 Travi perimetrali dell'Europabrücke.....	62
4.18	Schizzo delle aree di protezione - A13 Travi dell'Europabrücke.....	62

4.19	B180 Niklasgalerie.....	64
4.20	Schizzo delle aree di protezione - B180 Niklasgalerie	64
4.21	L13 Tafelweggalerie	65
4.22	Schizzo delle aree di protezione - L13 Tafelweggalerie	65
4.23	L36 Cavalcavia della pista di fondo Seefeld	66
4.24	Schizzo delle aree di protezione - L36 Cavalcavia della pista di fondo Seefeld.....	66
4.25	LS114 Plan.....	67
4.26	Schizzo delle aree di protezione - LS114 Plan	67
4.27	SS44 Passo di Giovo 10° tornante	68
4.28	Schizzo delle aree di protezione - SS44 Passo di Giovo 10° tornante.....	68
4.29	SS238 Strada delle Palade KM 10.....	69
4.30	Schizzo delle aree di protezione - SS238 Strada delle Palade KM 10.....	69
4.31	SS238 Strada delle Palade KM 16.....	70
4.32	Schizzo delle aree di protezione - SS238 Strada delle Palade KM 16.....	70
5.2	Pagina iniziale	76
5.3	Articolo nella rivista "Tirol Kommunal" - 05.06.2017.....	77
5.4	Tiroler Landeszeitung - edizione 4/settembre 2017	77
5.5	Poster.....	78
5.6	Roll up.....	79

A.4 Diagramma

4.1	Effetto degli agenti di protezione superficiale - WP 3.....	26
4.2	Influenza del manto della cassaforma - WP 3.....	28
4.3	Influenza della direzione di applicazione - WP 3.....	30
4.4	Influenza del pre-trattamento - WP 3.....	30
4.5	Influenza della temperatura di applicazione - WP 3.....	31
4.6	Influenza della tecnica applicativa - WP 3	31
4.7	Influenza della direzione del getto sul deterioramento da agenti atmosferici - prove aggiuntive WP 3.....	32
4.8	Deterioramento da agenti atmosferici su superficie - Prove aggiuntive WP 3.....	33
4.9	Frammentazione nel calcestruzzo dopo l'idrodemolizione - Prove aggiuntive WP 3.....	33
4.10	Profondità di penetrazione degli agenti di protezione superficiale - WP 4.....	37
4.11	Risultati - WP 4.....	38
4.12	Risultati - WP 5.....	43
4.13	Risultati - WP 6 Condizioni ambientali e post-trattamento.....	48
4.14	Risultati del Work Package 6 Durabilità.....	51
4.15	Curve di temperatura delle prove del fuoco	55
4.16	Contenuto di cloruro in due livelli di profondità - A12 Galleria Senftenberg	58
4.17	Contenuto di cloruro a due livelli di profondità - A12 raccordo Kufstein Süd.....	60
4.18	Contenuto di cloruro a due livelli di profondità - A12 raccordo Kufstein Süd.....	63