

relazione finale, 01. April 2018

# **«Materiale di riempimento di sonde geotermiche»**

**Analisi e statistiche del mercato, dei requisiti, delle caratteristiche e della qualità dei materiali di riempimento utilizzati in Svizzera**

**Autore**

Dr. Andreas Ebert  
Geo Explorers AG  
Wasserturmplatz 1  
CH-4410 Liestal  
[www.geo-ex.ch](http://www.geo-ex.ch)

**Questo studio è stato commissionato da SvizzeraEnergia.  
Gli autori sono i soli responsabili del contenuto.**

**Indirizzo**

SvizzeraEnergia, Ufficio federale dell'energia (UFE)  
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen. Indirizzo postale: CH-3003 Berna  
Infoline 0848 444 444. [www.svizzeraenergia.ch/consulenza](http://www.svizzeraenergia.ch/consulenza)  
[energieschweiz@bfe.admin.ch](mailto:energieschweiz@bfe.admin.ch), [www.svizzeraenergia.ch](http://www.svizzeraenergia.ch)

# INDICE

<b>1</b>	<b>Introduzione.....</b>	<b>4</b>
1.1	Situazione iniziale .....	4
1.2	Obiettivi del progetto .....	5
<b>2</b>	<b>Requisiti materiale di riempimento .....</b>	<b>6</b>
2.1	Funzioni principali del riempimento.....	6
2.2	Ulteriori requisiti del materiale di riempimento .....	7
2.3	Fasi di lavoro: Miscelazione e riempimento .....	11
2.3.1	Norme generali.....	11
2.3.2	Prodotti utilizzati generalmente .....	12
2.3.3	Miscelazione: procedura e requisiti.....	12
2.3.4	Iniezione / processo di riempimento e requisiti .....	16
2.4	Composizione e idratazione del cemento .....	18
2.5	Stato della ricerca e della letteratura .....	19
<b>3</b>	<b>Requisiti cantonali per il materiale di riempimento delle sonde geotermiche .....</b>	<b>22</b>
3.1	Introduzione .....	22
3.2	Procedimento .....	22
3.3	Risultati .....	23
3.4	Conclusione .....	25
<b>4</b>	<b>Statistiche sui materiali di riempimento utilizzati in Svizzera e sul controllo della qualità.....</b>	<b>26</b>
4.1	Introduzione e procedura .....	26
4.2	Risultati e conclusioni.....	26
<b>5</b>	<b>Caratteristiche e confronto dei materiali di riempimento utilizzati.....</b>	<b>31</b>
5.1	Requisiti per i materiali di riempimento .....	31
5.2	Caratteristiche dei materiali di riempimento e requisiti di miscelazione .....	32
5.3	Come la tipologia e la miscelazione dei materiali di riempimento influenzano qualità e longevità .....	33
5.4	Miglioramento dei materiali da costruzione per il riempimento.....	34
<b>6</b>	<b>Analisi dei materiali di riempimento iniettati .....</b>	<b>37</b>
6.1	Procedura.....	37
6.2	Densità delle sospensioni campionate.....	37
6.3	Resistenza al gelo dei materiali di riempimento .....	40
6.4	Ulteriori caratteristiche dei materiali da costruzione campionati.....	42
<b>7</b>	<b>Forme di controllo.....</b>	<b>44</b>
<b>8</b>	<b>Conclusioni e raccomandazioni .....</b>	<b>46</b>
8.1	Requisiti generali per il riempimento .....	46
8.2	Requisiti e raccomandazioni cantonali.....	46
8.3	Materiali di riempimento utilizzati: caratteristiche e raccomandazioni .....	47
8.4	Materiali da riempimento migliorati .....	49
8.5	Conclusione: il variare della qualità della malta utilizzata in Svizzera .....	50
8.6	Raccomandazioni di miglioramento conclusive .....	51
<b>9</b>	<b>Osservazioni finale .....</b>	<b>51</b>
<b>10</b>	<b>Bibliografia .....</b>	<b>52</b>

# 1 Introduzione

## 1.1 Situazione iniziale

SvizzeraEnergia è il programma di miglioramento dell'efficienza energetica che è stato lanciato dal consiglio federale nel 2001 e che viene portato avanti dall'Ufficio Federale dell'Energia (UFE), con lo scopo di incrementare la percentuale di energie rinnovabili. Il programma dovrebbe dare un contributo significativo al raggiungimento degli obiettivi di politica energetica e climatica. Il piano si concentra sulla sensibilizzazione, l'informazione, la consulenza, l'istruzione, la formazione e la certificazione della qualità dei requisiti più importanti.

Gli impianti con pompe di calore a sonde geotermiche, se ben pianificati, ottimamente preparati e funzionanti, possono ottenere un rendimento energetico significativamente più elevato rispetto alle pompe di calore ad aria/acqua. Dato che l'installazione di un impianto di sonde geotermiche è ad alta intensità di capitale rispetto ad altri sistemi di generazione del calore, l'efficienza produttiva ed i bassi costi operativi sono fondamentali per l'ammortamento dei costi di produzione. In coerenza con la politica energetica, occorre impedire che gli impianti con un elevato potenziale di efficienza siano gestiti in modo inefficiente. Inoltre è necessario constatare che le sonde geotermiche, non installate in maniera ottimale, possono rappresentare un pericolo per le falde acquifere.

Il presente documento dovrebbe contribuire ad aumentare la qualità e l'efficienza delle sonde geotermiche e a comprendere meglio la situazione del mercato. Data la limitata accessibilità alle sonde geotermiche dopo la loro realizzazione, è fondamentale che la perforazione, l'installazione e il riempimento siano approntati correttamente e nelle migliori condizioni possibili. Questo include anche il controllo della qualità, perché in Svizzera la fase di riempimento è marginalizzata e l'accordo con EnergiaSvizzera ha lo scopo di colmare questa lacuna.

Il suolo svizzero perforato per la realizzazione di sonde geotermiche è di circa 2'500'000 metri cubi ogni anno. I materiali utilizzati per il riempimento provengono da diversi produttori. Anche la miscelazione e la pressatura avvengono spesso in maniere diverse. Al fine di garantire la protezione delle acque sotterranee ed il funzionamento a lungo termine degli impianti, il riempimento è di fondamentale importanza. Non solo la qualità e la longevità del materiale è fondamentale, ma anche la corretta miscelazione e la successiva iniezione.

Attualmente non esiste una statistica completa sui materiali di riempimento che vengono utilizzati, né dove vengono posati né con quale frequenza. Allo stesso modo non è verificabile la concretizzazione dei requisiti cantonali riguardanti il riempimento, con i quali dovrebbe essere garantita la protezione delle acque sotterranee. Nonostante l'importanza della fase di riempimento, dell'introduzione delle sospensioni e del processo di iniezione, queste ultime non sono controllate sufficientemente. Finora non esiste ancora un'analisi completa dei materiali di riempimento utilizzati in Svizzera per quanto riguarda la loro qualità e la loro longevità.

Gli obiettivi specifici di questo progetto sono descritti nel capitolo seguente. I lavori presi in considerazione sono stati eseguiti tra agosto 2017 e marzo 2018.

## 1.2 Obiettivi del progetto

In Svizzera, le sonde geotermiche vengono riempite o con la cosiddetta miscela standard APP (proporzione di miscelazione predefinita e miscelazione sul posto) o con miscele pronte all'uso all'uso di diversi produttori. Non identificabile se le direttive del APP e dei produttori dei preparati siano eseguite correttamente o se tutti i preparati utilizzati soddisfino i requisiti della guida all'implementazione dell'UFAM "Utilizzo del calore del suolo e sottosuolo" (2009).

Lo scopo di questo studio è di analizzare i seguenti punti:

- Analisi delle caratteristiche dei materiali di riempimento e dei loro requisiti di miscelazione inclusa la definizione e il confronto dell'influenza sulla qualità e longevità dei diversi materiali di riempimento (a seconda dei rapporti di miscelazione e dei tipi di miscelazione), comprese le indicazioni sulle possibili procedure di controllo
- L'eventuale ampliamento dei requisiti cantonali per i materiali di riempimento e la loro miscelazione
- Chiarimenti sul rapporto costi-benefici dei materiali da costruzione speciali con migliore conduttività termica, resistenza ai solfati e sigillatura accelerata, inclusa una valutazione dei prodotti offerti e delle loro reali caratteristiche
- Raccomandazioni per il miglioramento della situazione attuale

I materiali di riempimento sono diversi e per questo sono richiesti requisiti differenti. Allo stesso modo i metodi di miscelazione sono diversi, così come i controlli e i test di qualità vengono eseguiti in maniere differenti. Il problema principale è che non è chiaro, se, e con che accuratezza viene eseguito il riempimento, di che qualità è la sospensione introdotta e se il materiale da costruzione utilizzato soddisfa i requisiti. Tutti i suddetti influenzano la qualità a lungo termine del riempimento. Se il sistema non funziona in maniera ottimale la qualità inadeguata di quest'ultimo è verificabile solo dopo diversi anni (per esempio un riempimento insufficiente, uno scarso accoppiamento alla roccia, scarsa resistenza al gelo o ai solfati). Il caso più dannoso è rappresentato dal congelamento della sonda dovuto all'insufficiente alimentazione energetica.

Per l'importanza che ricopre la fase di riempimento, sono state eseguite le seguenti analisi dettagliate:

- Richiesta e statistiche dei requisiti cantonali per il riempimento e i materiali da costruzione
- Analisi statistiche dei materiali di riempimento utilizzati e delle procedure utilizzare, realizzate attraverso sondaggi sottoposti alle società di perforazione
- Analisi delle caratteristiche, della qualità, della longevità dei materiali di riempimento più utilizzati e della malta speciale, secondo i requisiti generali, le schede tecniche dei produttori e delle indicazioni bibliografiche
- Analisi dei campioni di sospensione dal cantiere e della procedura (miscelazione, pressatura e test di qualità)

## 2 Requisiti materiale di riempimento

Di seguito sono elencati in forma tabulare e descritti in dettaglio i requisiti più importanti per i materiali di riempimento. Si basano essenzialmente sui requisiti dell'UFAM (Aiuto all'esecuzione 2009), sulla normativa SIA 384/6 e sull'APP (Associazione svizzera delle pompe di calore), nonché sui requisiti rispettati in Germania e sulle pubblicazioni rilevanti e riconosciute. I requisiti descritti costituiscono la base per l'analisi dei materiali di riempimento e delle fasi della procedura. Se questi requisiti sono soddisfatti, si può presumere che la qualità del riempimento sia buona. I requisiti vengono divisi nei successivi due paragrafi. Il primo descrive i requisiti minimi e i compiti principali del riempimento, i quali derivano essenzialmente dai requisiti normativi. Il secondo invece elenca i requisiti ulteriori.

### 2.1 Funzioni principali del riempimento

Ogni foro viene riempito dopo aver posizionato i tubi della sonda geotermica. Il riempimento deve soddisfare determinati requisiti relativi alla protezione delle acque sotterranee, delle caratteristiche tecniche dell'impianto di riscaldamento. I requisiti più importanti in Svizzera per il riempimento delle sonde geotermiche sono menzionati nella normativa SIA 384/6 e nella guida all'implementazione UFAM "utilizzo del calore del suolo e sottosuolo" (2009). Molti degli altri requisiti raccomandati sono descritti e valutati in varie pubblicazioni; vedi il capitolo 2.5.

I compiti principali del riempimento dei fori delle sonde geotermiche o di fori simili sono (riferimenti corrispondenti nel capitolo 2.5):

Funzione	Dettagli ed utilizzi
Agganciamento al sottosuolo	Con il miglior collegamento possibile al sottosuolo, il <b>flusso termico</b> dovrebbe essere garantito. L'energia dovrebbe essere condotta, se possibile senza incontrare resistenza, dal sottosuolo alla sonda e viceversa.
Rendere stagno il foro	<p>Per proteggere in modo permanente le acque sotterranee (ad esempio, evitare cortocircuiti idraulici o perdite del fluido termo-vettore nel sottosuolo). Secondo vari studi (vedi riferimenti nel capitolo 2.5) e l'azienda internazionale per le pompe di calore geotermiche, la permeabilità dovrebbe essere <math>\leq 1 \cdot 10^{-9}</math> m/s (secondo l'UFAM 2009 e l'APP 2013 a <math>\leq 1 \cdot 10^{-7}</math> m/s). Va notato che generalmente la permeabilità dell'intero sistema <i>foro – riempimento – sonda</i> è di 1 o 2 ordini di grandezza più grande e diminuisce con il passare del tempo. L'impermeabilità a lungo termine è determinata dallo sviluppo della struttura durante la polimerizzazione, ma anche dai minerali di argilla rigonfiabili miscelati nel materiale di riempimento. Quest'ultimo senza minerali di argilla tende a formare delle fessure e ad ottenere permeabilità inferiori.</p> <p>La sigillatura ed il conseguente impedimento della circolazione delle acque sotterranee attraverso il foro è obbligatoria in presenza di rocce contenenti solfato, in maniera tale da impedire i danni di subsidenza associata al carsismo di gesso o i danni di aumento di volume causati dalla trasformazione di anidrite in gesso. Un episodio esemplare rintracciabile negli ultimi anni è ciò che è accaduto a Staufen (Germania).</p>
Isolamento dalla superficie	Grazie a questo si dovrebbe impedire che l'acqua possa entrare e/o uscire e che si possano <b>contaminare</b> le acque sotterranee. Spesso il materiale del riempimento nel pozzo è soggetto a cedimento, per questo le aree vicino alla superficie dovrebbero essere riempite con

	pellets di argilla.
Garantire stabilità	Il pozzo dovrebbe essere stabilizzato in maniera permanente e i tubi della sonda protetti da eventuali danni. Questo risultato si ottiene attraverso la resistenza minima. Secondo l'UFAM (2009), dopo 28 giorni la resistenza alla pressione dovrebbe essere di almeno <b>1,5 N / mm<sup>2</sup></b> . Il valore è molto basso rispetto al calcestruzzo di edilizia con valori di almeno 20 N / mm <sup>2</sup> ! Per il raggiungimento dei valori minimi, non è solo necessario un buon materiale da costruzione, ma anche una corretta elaborazione ed iniezione.

Per adempiere a questa funzione è necessario un cemento di tipo standard come descritto nel paragrafo F.3 della normativa SIA 384/6: 100 kg di bentonite + 200 kg di cemento + 900 l di acqua. Altri requisiti importanti per i materiali di riempimento riguardano le loro proprietà in termini di qualità, longevità, utilizzo ed installazione, questi vengono descritti nel capitolo seguente.

## 2.2 Ulteriori requisiti del materiale di riempimento

Sempre più spesso vengono imposti al materiale di riempimento ulteriori requisiti termici, reologici e meccanici. Questi dipendono dalla situazione geologica, dal sistema di riscaldamento, dagli aspetti idrogeologici e dalle pretese relative alla qualità ed alla lavorazione. Ulteriori requisiti sono elencati di seguito (riferimenti corrispondenti nel capitolo 2.5):

Ulteriori requisiti	Dettagli ed utilizzi
Densità	<p>La densità della sospensione all'ingresso nel pozzo dovrebbe essere di almeno <b>1.1-1.3 kg/dm<sup>3</sup></b> (UFAM 2009, APP 2013 o riferimenti nel capitolo 2.5), in modo tale che il fango di perforazione e l'acqua possano essere completamente rimossi dal pozzo. A seconda delle condizioni, la densità dovrebbe essere maggiore di circa 0.1-0.3 kg/dm<sup>3</sup> di quella del fluido di perforazione o dell'acqua di falda. La densità più comunemente utilizzata è di circa 1.4-1.6kg/dm<sup>3</sup>. La densità dovrebbe corrispondere alle istruzioni del produttore ed essere controllata e registrata. Il <b>valore di acqua/solidi</b> dovrebbe essere compreso tra 0,2 e 1,0 (raccomandazioni dei "Bund/ Länder-arbeitsgruppen" 2015). A valori di acqua/solidi maggiori a 0.4, l'acqua rimane nei pori anche dopo l'idratazione completa. Più alto è il contenuto di acqua, minore sono la resistenza al gelo del riempimento, la densità, la conduttività termica e la tenuta, in più aumenta il tasso di sedimentazione (relazione del Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech 2016). Al contrario, le sospensioni sono più facili da iniettare.</p> <p>La densità della sospensione deve essere adattata alla <b>profondità della sonda</b> per evitare lo schiacciamento dei tubi (SIA 384/6 F.3). La pressione esterna che agisce attraverso la sospensione sul tubo della sonda, il quale è riempito con acqua e sigillato a pressione, per le sonde PN16 (PN20) non deve superare la pressione interna di 8 bar (12 bar), e comunque la sovrappressione interna non deve superare 21 bar (25 bar).</p>
Conducibilità termica	La conduttività termica ottimale assicura che il flusso di calore tra il sottosuolo e il tubo della sonda funzioni correttamente. È vantaggioso mantenere i valori di conduttività termica simili a quelli della composizione del sottosuolo, altrimenti devono corrispondere almeno ad un valore di <b>0.85 W/m<sup>3</sup></b> del riempimento standard della SIA 384/6.

	<p>I materiali di riempimento termicamente migliorati con additivi appropriati come grafite, polvere di quarzo o polvere di ferro riducono la resistenza termica e consentono quindi al calore e al freddo del sottosuolo di raggiungere la sonda più rapidamente e viceversa. Questi materiali vengono sempre più utilizzati in particolare nei campi di sonde geotermiche e per sistemi di riscaldamento e raffreddamento. L'aumento dell'efficienza può essere di notevole consistenza. I materiali da costruzione termicamente migliorati mostrano valori di conducibilità termica di circa <b>2 W/m<sup>3</sup></b>, che in realtà variano a seconda del rapporto di miscelazione e delle influenze idrogeologiche.</p>
Resistenza al gelo	<p>I casi precedenti dimostrano che soprattutto con l'aumento della durata di utilizzo è possibile che le temperature del sistema vadano al di sotto degli 0 ° C, (Rapporto UFE 2017 "Analisi dei sistemi di sonde geotermiche", Rohner &amp; Rybach 2001). Per questo, viene utilizzato come fluido termovettore, un fluido resistente al gelo che consente anche il funzionamento al di sotto dei 0° C. Sono sempre più noti casi in cui si registrano danni dovuti al gelo.</p> <p>A temperature di esercizio sotto i 0° C durante l'avviamento e lo spegnimento della pompa di calore, si verificano cicli di gelo-disgelo in prossimità della sonda. Un materiale di riempimento non resistente al gelo, come per esempio il cemento standard ai sensi della norma SIA 384/6 paragrafo F.3 o i materiali prefabbricati usati comunemente, possono essere danneggiati dai ripetuti congelamenti e scongelamenti. La formazione di ghiaccio è associata ad un'espansione del volume del 9% che causa delle crepe nel materiale di riempimento, nelle quali si infila acqua sotterranea che genera fessure e ulteriori cicli di scongelamento indebolendo la struttura. In tal modo il materiale di riempimento non può più garantire l'impermeabilizzazione, la resistenza, e la tenuta al sottosuolo e di conseguenza neanche la sua funzionalità e longevità. Oltre che alla minore estrazione di calore e alla diminuzione della protezione delle acque sotterranee, possono verificarsi anche danni secondari come ad esempio sollevamenti o cedimenti. Una insoddisfacente trasmissione di calore porta ad una ulteriore diminuzione delle temperature del sistema e di conseguenza ad un ulteriore potenziale di danno.</p> <p>Sarebbe necessario un <b>certificato d'ispezione</b> relativo alla resistenza al gelo e disgelo. Tuttavia attualmente non esistono metodi di prova standardizzati per quanto riguarda la resistenza al gelo dei materiali di riempimento delle sonde geotermiche. Vari studi dimostrano che il modo in cui vengono effettuati i test influenza in modo decisivo i risultati (vedi riferimenti nel capitolo 2.5). Il materiale da costruzione, dopo aver subito ripetuti cicli di gelo-disgelo (ad esempio sei volte secondo le VDI 4640), risulterebbe avere un'<b>irreversibile instabilità strutturale</b>. Criteri utili per verificare quest'ultima sono ad es. nessuna scagliatura, bassa formazione di crepe, massa costante, cambiamento della permeabilità di max. un ordine di grandezza, velocità ultrasonica costante, percentuale di minerali argillosi gonfiabili (vedi capitolo 2.5). Tuttora la migliore protezione antigelo è un dimensionamento sufficiente. In alternativa si può anche rinunciare all'antigelo e azionare la sonda solamente con acqua.</p> <p>La resistenza al gelo del riempimento viene considerata di scarsa importanza, in quanto secondo la norma SIA 384/6 dovrebbe essere dimensionato in tal modo che la temperatura media del fluido dopo 50 anni sia ancora di almeno -1,5 ° C, e che quindi il riempimento non si geli o che si geli solo parzialmente. In Germania la protezione antigelo</p>

	<p>è trattata con più importanza perché è regolata dalle norme della VDI che sono più restrittive.</p>
Resistenza ai solfati	<p>La resistenza al solfato è particolarmente richiesta in aree con strati ricchi di gesso e anidrite. Questo per evitare che l'acqua sotterranea aggressiva decomponga il cemento. I solfati soluti nell'acqua attaccano il cemento e il calcestruzzo.</p> <p>A seconda della composizione del materiale di riempimento (alluminato tricalcico <math>C_3A</math>, solfato, acido silicico, carbonato), delle temperature, del pH e delle concentrazioni di solfato si può ettringite (solfato di alluminato di calcio) o thaumasite (silicato di calcio carbonato solfato idrato) (vedere riferimenti capitolo 2.5). Aumentando il volume (sfregamento del solfato) si verificano delle fessurazioni o delle destabilizzazioni strutturali.</p> <p>Nei materiali da costruzione resistenti ai solfati il <b>contenuto di <math>C_3A</math></b> non deve superare determinati limiti, in modo che l'ettringite non si formi con l'aiuto di composti reattivi di alluminio. Per quanto riguarda la formazione di thaumasite, sono richiesti <b>requisiti più stringenti sui leganti</b> (ad es. maggiore elasticità). Per quanto riguarda la resistenza al solfato, non esistono ancora metodi di prova standardizzati. Le procedure di prova indicate possono quindi essere esaminate criticamente.</p>
Requisiti tecnici	<p>L'indurimento avviene con tempistiche diverse a seconda delle caratteristiche: dopo 7 giorni, la forza compressiva uniassiale deve raggiungere almeno <b>1 N/mm<sup>2</sup></b> e dopo 28 giorni almeno <b>1.5 N/mm<sup>2</sup></b> (UFAM 2009). L'esperienza ha dimostrato che il tappo della sonda viene spesso aperto troppo velocemente dopo il riempimento. Per questo è importante che si compatti rapidamente in modo che si eviti lo schiacciamento dei tubi. Una bassa degradazione garantisce una stabilità permanente.</p> <p>Scarso tasso di cedimento, affinché sia assicurato un volume costante. Per far sì che il tasso sia basso, e per ottenere una resistenza costante nell'intera colonna del pozzo, la sospensione dovrebbe essere il più stabile e omogenea possibile. Ciò è definito dal tasso di sedimentazione (UFAM 2009, APP 2013: <b>tasso di sedimentazione max. 2%</b> della profondità del foro, max. 5 m).</p> <p>Un buon comportamento tixotropico è vantaggioso per un'installazione ottimale o nel processo d'iniezione. Occorre ottenere una fluidità che sia compresa tra <b>10 – 70 N/m<sup>2</sup></b> (raccomandazioni dei "Bund/Länderarbeits-gruppen" 2015). La viscosità della sospensione dovrebbe abbastanza bassa da riempire tutte le cavità, ma anche abbastanza alta affinché questa non defluisca inutilmente nel sottosuolo. La misurazione è il tempo di efflusso di un litro di sospensione dal cono di Marsh, il quale dovrebbe essere compreso tra i <b>40-100 secondi</b> (raccomandazioni del "Arbeitskreis Geothermie" 2015). Un'ulteriore misurazione è la viscosità plastica con valori compresi tra 0,25 e 1,25 Pa * s (lavoro del "Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech" 2016).</p> <p>Un tempo di elaborazione ottimale garantisce una presa abbastanza rapida del materiale di riempimento all'interno del foro, ma allo stesso tempo neanche troppo rapida in maniera tale da garantire un riempimento completo.</p>

	<p>Un alto rendimento ed una bassa erodibilità sono vantaggiose per ragioni economiche.</p> <p>Per proteggere i tubi della sonda, il calore di idratazione non deve superare i <b>40°C</b> raccomandati dai produttori di tubi di sonde convenzionali. A causa di uno spazio anulare piuttosto piccolo, della bassa percentuale di klinker e della dissipazione termica nel substrato/acqua sotterranea, la temperatura della sonda, in condizioni normali, si alza di max. qualche grado (Touzin 2017). Una reazione lenta ed un conseguente rilascio minore del calore di idratazione sono importanti per lo sviluppo della microstruttura, poiché reazioni rapide e temperature elevate possono portare a tensioni, assestamenti, e quindi alla generazione di crepe.</p> <p>Per le miscele pronte all'uso all'uso, è obbligatorio seguire le <b>istruzioni di miscelazione</b> del produttore. Solo in questo modo vengono rispettate le proprietà sopra citate. Per i fori profondi, deve essere presa in considerazione la densità del riempimento. Per impedire che i tubi delle sonde profonde non vengano schiacciati, non dev'essere modificata la formula della miscela, ma si dovrebbe usare un materiale di riempimento adeguato con una densità inferiore o si dovrebbe effettuare una cementazione a gradini (vedi SIA 384/6, F.3).</p>
Ecocompatibilità	<p>Il materiale da costruzione deve essere sicuro e non deve mettere in pericolo le acque sotterranee. Di conseguenza, dovrebbe essere testato. Questo riguarda per esempio il pH, che non dovrebbe subire aumenti significativi nelle acque sotterranee circostanti. Generalmente, durante la polimerizzazione si verifica una parziale perdita di qualità (come per es. un basso aumento del pH, perdite di sospensione a seconda della permeabilità nel substrato, reazioni chimiche dipendenti dalla composizione chimica dell'acqua), che però è insignificante a causa della sua bassa incidenza. Dovrebbero essere disponibili test certificati appropriati.</p>
Resistenza chimica	<p>A seconda della composizione chimica dell'acqua, il materiale da costruzione dovrebbe essere stabile in presenza di acidi carbonici che dissolvono il calcare e sali scambiabili (sali di magnesio e ammonio). La carbonatazione causa a seconda dell'umidità restringimento o gonfiamento. Inoltre non deve cambiare il comportamento di gonfiamento delle argille in presenza di sali disciolti, altrimenti perdono il loro effetto sigillante (vedi raccomandazioni "Bund/ Länderarbeitsgruppen" 2015 e il lavoro di "Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech" 2016).</p>

Per la garanzia della **qualità a lungo termine** della sonda geotermica, sono particolarmente importanti l'impermeabilità, la resistenza al gelo e la resistenza al solfato. Gli altri parametri sono decisivi per il successo a breve termine della sonda geotermica. Se però questi ultimi non sono soddisfatti, ciò influenza anche la funzionalità a lungo termine della sonda geotermica. Un'elevata **percentuale di minerali argillosi rigonfiabili** (principalmente montmorillonite) favoriscono la longevità grazie alla capacità di auto-guarigione ed alla proprietà di rigonfiamento a lungo termine in caso di danni causati da gelo o da solfati, in oltre favoriscono una resistenza maggiore alle acque aggressive, un comportamento di cedimento inferiore e una maggiore resistenza al gelo.

## 2.3 Fasi di lavoro: Miscelazione e riempimento

### 2.3.1 Norme generali

In Svizzera i requisiti di riempimento vengono regolamentati in conformità alle direttive dell'UFAM (**guida all'implementazione "Utilizzo del calore dell'acqua sotterranea" UFAM 2009**). A questi si aggiungono anche la SIA 384/6 e la maggior parte delle direttive cantonali. I requisiti dettagliati per il materiale da costruzione sono menzionati nei capitoli 2.1 e 2.2. Per la procedura di riempimento, è richiesto quanto segue: *"Immediatamente dopo la messa in posizione della sonda geotermica nel foro, il pozzo dev'essere riempito completamente con una sospensione indurente dal basso verso l'alto, senza formazione di spazi vuoti. Il riempimento deve essere effettuato tramite un tubo aggiuntivo attaccato al piede di sonda che rimane nel foro. Per una sospensione adeguata valgono i valori indicativi dell'allegato A7. La quantità di sospensione dev'essere registrata. Se la quantità necessaria di sospensione supera il doppio del volume del pozzo, il processo di riempimento dev'essere sospeso istantaneamente e l'autorità competente dev'essere informata a riguardo. "*

Il riempimento è descritto in maniera più dettagliata nel paragrafo 6.17-20 del regolamento dell'associazione professionale svizzera delle pompe di calore APP (**lista delle imprese di perforazione con marchio di qualità, Regolamenti 2013**): dopo l'inserimento nel foro, la sonda geotermica deve essere riempita completamente con una sospensione a indurimento plastico, senza spazi vuoti e dal fondo del foro alla superficie. Il riempimento deve essere effettuato mediante un tubo supplementare fissato al piede della sonda e che rimarrà nel foro. *Per la sospensione valgono i seguenti requisiti minimi:*

- *peso specifico della sospensione: almeno 1.2 kg/dm<sup>3</sup> o come specificato dal produttore,*
- *Proprietà allo stato indurito: coefficiente di permeabilità  $k_f \leq 1 \times 10^{-7}$  m/s, nessuna formazione di fessure, nessuna sedimentazione (opalite non consentita). L'assestamento della sospensione non deve superare il 2% della profondità di perforazione, massimo 5 m, altrimenti deve essere effettuato un adeguato post-riempimento.*

*Ad esempio, la seguente miscela standard per 1 m<sup>3</sup> di sospensione presenta queste caratteristiche: 100 kg di bentonite, 200 kg di cemento e 900 kg di acqua. Possono essere utilizzati solo additivi privi di rischi ambientali. Per le miscele pronte all'uso, è necessario osservare i rapporti di miscelazione determinate dalle istruzioni del produttore.*

*Deve essere installato almeno un impianto di iniezione per ogni committenza di perforazione. Le tubazioni possono essere rimosse solo dopo il riempimento. Dopo il riempimento, deve essere eseguita e registrata una prova di portata e una prova di tenuta secondo il SIA 384/6. "*

La **norma SIA 384/6 F.3** tratta anche la densità della sospensione al fine di evitare lo schiacciamento dei tubi della sonda. A seconda della resistenza e della profondità/lunghezza della sonda e della densità del riempimento, la pressione differenziale dall'esterno all'interno al piede della sonda geotermica non deve superare determinati valori. Vedi anche il capitolo 2.2 e 2.3.2. Ad esempio nelle sonde PN16 una sospensione con densità pari a 1,6 t / m<sup>3</sup> può essere inserita solo fino a 340 m di profondità/lunghezza, altrimenti la pressione in testa alla sonda sigillata supererebbe in breve tempo la pressione massima ammissibile di 21 bar. In alternativa, sarebbe necessario eseguire una cementazione a gradini o utilizzare un riempimento più leggero. Ad una densità della sospensione di, per es., 1,4 t / m<sup>3</sup>, la sonda sigillata a pressione potrebbe essere installata fino a più di 400 m. Va notato che la densità della sospensione deve sempre essere miscelata secondo le istruzioni del produttore. Se è necessaria una sospensione più leggera, si deve utilizzare una miscelata pronta corrispondente con una densità inferiore. Sul mercato sono disponibili miscele con valori di 1,25 t / m<sup>3</sup>.

La miscelatura stessa, gli ulteriori requisiti concreti per il materiale da costruzione, così come i controlli o i test di prova sul sito di perforazione non sono standardizzati e raramente vengono controllati. Di conseguenza, vengono utilizzati un'ampia varietà di materiali, attrezzature di miscelazione e processi d'iniezione (vedi anche capitolo 4). Il capo trivellatore gestisce in maniera diversa sia il controllo del materiale di riempimento che il processo d'iniezione..

Delle ulteriori linee guida attuali e relativamente dettagliate sono (vedi anche capitolo 2.5): *"Raccomandazioni per geotermia superficiale"* del *"Arbeitskreis Geothermie"* (2015), *"Raccomandazioni sulla permeabilità"* del *"Bund-Länderarbeitsgruppe"* (2015).

La procedura generale per la realizzazione ed il riempimento di una sonda geotermica è mostrata schematicamente in Fig.1.

### 2.3.2 Prodotti utilizzati generalmente

Più comunemente vengono utilizzate delle miscele pronte all'uso confezionante in sacchi. Le cosiddette miscele autoprodotte vengono utilizzate raramente. Sono poi utilizzati vari materiali da costruzione con proprietà diverse (vedi capitolo seguente). Se l'autorità, il progettista o il committente non fanno esplicita richiesta vengono utilizzati prodotti standard poco costosi e facilmente processabili. I vantaggi delle miscele pronte all'uso rispetto alle miscele autoprodotte sono che le quantità iniettate, le proprietà e le specifiche possono essere controllate dal produttore in maniera più efficiente. Inoltre per le miscele pronte all'uso il rischio che il materiale di riempimento non soddisfi ad es. la resistenza al gelo e ai solfati, la tenuta nel pozzo o la conduttività termica, è inferiore. Del prodotto devono sempre essere presi in considerazione le esigenze e i requisiti, come ad esempio una proprietà termica migliorata, una densità inferiore per sonde molto profonde oppure i vincoli normativi (ad esempio resistenza al solfato). Nel caso di sonde con rigenerazione o ricarica termica, è necessario prestare attenzione affinché le alte temperature non danneggino il materiale di riempimento a causa della disidratazione e della diminuzione del volume.

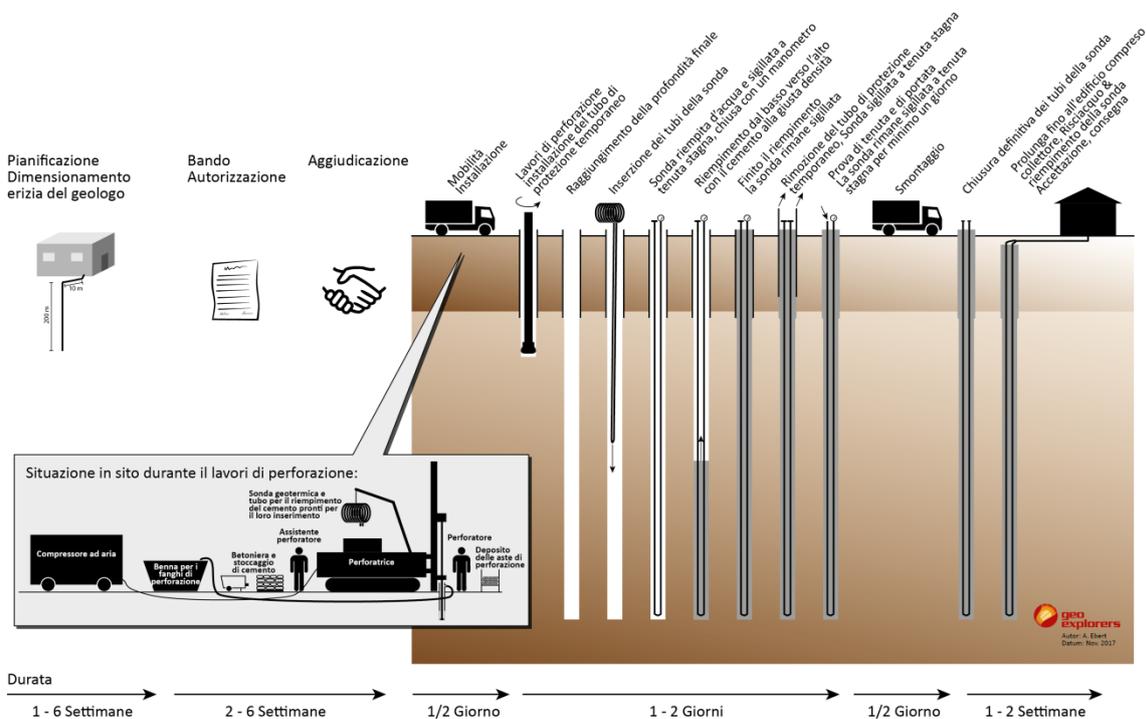


Fig. 1 Procedimento della posa in opera di una sonda geotermica

### 2.3.3 Miscelazione: procedura e requisiti

Il materiale da costruzione a secco, generalmente composto da miscela prefabbricata, viene mescolato in situ con acqua per poi essere utilizzato subito. La miscelazione avviene ad es. con un mescolatore colloidale.

La qualità e le proprietà del riempimento dipendono non solo dal materiale da costruzione, ma anche dal modo in cui la sospensione viene miscelata. In questo caso, la densità effettiva e l'omogeneità della sospensione da introdurre sono di particolare importanza, ma sono da considerare anche l'intensità, il tempo di permanenza e di rigonfiamento. Gli strumenti di miscelazione devono poter essere utilizzati in modo appropriato, miscelare sufficientemente e garantire al prodotto il corretto tempo di miscelazione e di rigonfiamento. Solo in questo modo tutti i componenti del materiale da costruzione (soprattutto i colloidali) si possono decomporre correttamente. Generalmente sono consigliati tempi di miscelazione che non superino i dieci

minuti. È molto importante ottenere la densità corretta in base alle indicazioni del produttore. Questa misurazione non deve essere fatta ad occhio, come spesso accade, ma dev'essere correttamente misurata. L'utilizzo di un aerometro o di una semplice pesatura di un volume definito possono essere due soluzioni. Inoltre, bisogna assicurarsi che la sospensione introdotta sia omogenea, non coaguli ed abbia una viscosità corretta (ad es. tempi di migrazione di un minuto). In generale, vengono utilizzate tre forme di miscelazione: miscelatori colloidali, miscelatori forzati o pompe per iniezione di malta, e miscelazioni in vasca d'agitazione. In Svizzera, la maggior parte delle miscelazioni vengono effettuate con l'aiuto di miscelatori forzati o miscelatori colloidali, con una frequenza d'utilizzo maggiore dei primi. Le vasche sono usate relativamente poco (vedi anche capitolo 4).

#### Miscelatore colloidale (Figura 2):

Il cemento viene versato attraverso una griglia e lavorato insieme ad acqua in un recipiente di miscelazione di circa 150 l, utilizzando un miscelatore ad alta forza di taglio per ottenere una sospensione omogenea. La miscela viene poi pompata in un contenitore secondario (circa 150-300 l), in cui avviene la decompostazione ottimale dei colloidali rigonfiabili (minerali argillosi). Da questo, la sospensione viene pompata attraverso il tubo di iniezione nello spazio anulare con l'ausilio di una pompa a vite eccentrica. Grazie ai due contenitori, è possibile operare un'iniezione rapida e non è necessario attendere a lungo per la miscelazione e la decomposizione dei colloidali. La qualità della miscelazione può essere controllata molto bene, in modo da ottenere una sospensione omogenea e stabile, che sedimenti poco e che mostri buone proprietà di flusso. Devono essere rispettati i rapporti di miscelazione, i tempi di miscelazione e di gonfiatura indicati dai produttori. La portata del miscelatore colloidale è leggermente più alta rispetto ai miscelatori forzati. Per questo necessita di maggiore potenza e la gestione del processo è leggermente più complessa.



Fig. 2 Miscelatore colloidale

#### miscelatore forzato / miscelatore a colata continua / pompa per iniezione di malta (Fig. 3):

Il cemento viene versato attraverso una griglia in un miscelatore a forma d'imbuto e da lì

trasportato con una vite in una piccola camera di miscelazione, dove il cemento viene miscelato continuamente con acqua e pompato immediatamente nel tubo di iniezione. A differenza del miscelatore colloidale, la sospensione non viene mescolata poi successivamente iniettata, ma i due processi avvengono contemporaneamente. Le opinioni divergono sul fatto che in questo modo il riempimento venga eseguito più rapidamente. Un vantaggio è che il macchinario maneggevole e risulta semplice da utilizzare. Inoltre, si deve lavorare con acqua pulita. Non è quindi possibile l'aggiunta di fango o di acqua di perforazione, come si è verificato occasionalmente negli altri sistemi di miscelazione. Gli svantaggi sono che la sospensione, rispetto alla miscelazione nel miscelatore colloidale o nella vasca d'agitazione, può essere controllata meno accuratamente, e per far sì che siano garantite una corretta omogeneità e densità è necessario aggiungere costantemente cemento ed acqua, perché la densità viene impostata all'inizio e dipende dall'approvvigionamento idrico. I casi passati mostrano come ci siano capi trivellatori che gestiscono i miscelatori molto bene, ma allo stesso tempo si è notato che durante il riempimento l'approvvigionamento idrico viene regolato in maniera casuale causando così una sproporzione tra acqua e cemento. Spesso si registrano problemi dovuti all'ostruzione della vite o allo scoppio del tubo d'iniezione tra il miscelatore e la testa del pozzo. Quest'ultimo è probabilmente dovuto, nella maggior parte dei casi, al fatto che il rapporto di acqua/solidi e/o l'omogeneità della sospensione non siano più corretti; il problema è causato in parte dalle diverse condizioni di pressione nel sistema di distribuzione dell'acqua all'interno del cantiere. Il fornitore raccomanda che gli utenti siano regolarmente addestrati, che i miscelatori siano mantenuti correttamente, che la densità venga misurata e registrata con una bilancia all'inizio e alla fine del processo di miscelazione e che il rifornimento idrico, ovvero il valore di acqua/solidi, sia impostata correttamente. Inoltre, l'effettiva decomposizione delle parti di argilla rigonfiabile avviene solamente nello spazio anulare.



Fig. 3 miscelatore per malte

#### **miscelazione in vasca d'agitazione (Fig. 4):**

Poche attività di trivellazione mescolano la sospensione del riempimento in una vasca. Questa procedura consente di miscelare una quantità maggiore di materiale che può essere pompata in

una sola volta nello spazio anulare. Nella vasca può essere mescolata la miscela pronta all'uso o anche le miscele autoprodotte. Lo svantaggio può essere che, a seconda della stima, la quantità sia insufficiente o, al contrario, ecceda materiale di sospensione che debba essere successivamente smaltito. Durante la miscelazione in una vasca grande, occorre prestare attenzione affinché l'intero volume della sospensione sia ben miscelato e omogeneo e che i tempi di miscelazione e di permanenza massima siano comunque mantenuti. Rispetto ai miscelatori forzati, la vasca ha il vantaggio di poter controllare meglio l'omogeneità e la densità delle sospensioni rendendo quest'ultima più facile da ottenere.



Fig. 4 vasca d'agitazione per miscelare la sospensione

Durante il mescolamento dei materiali da costruzione con l'acqua, è necessario sottolineare quanto segue:

- L'uso di materiali da costruzione che soddisfino i **requisiti minimi** specificati nei capitoli 2.1 e 2.2. Eventualmente sono necessari materiali da costruzione resistenti al solfato.
- **Materiale da costruzione sufficiente sul cantiere.** Criterio spesso non soddisfatto che comporta l'impossibilità di riempire dal basso verso l'alto, in assenza di spazi vuoti e di completare in una sola volta il riempimento. Il volume necessario dovrebbe essere calcolato in anticipo. Per le perdite di cemento dovute alla geologia (ad esempio carsismo, zone di guasto) si dovrebbe calcolare il materiale supplementare. Il materiale da costruzione deve essere conservato protetto dall'umidità.
- **Densità della sospensione** ed un **controllo regolare** durante la miscelazione, specialmente per il miscelatore forzato. I valori della densità sono la maniera più semplice per verificare che la sospensione sia stata miscelata secondo le istruzioni del produttore (si veda la scheda tecnica!). Solo in questo modo il riempimento otterrà una resistenza sufficiente e la sospensione eliminerà completamente, e nel miglior modo possibile, il fluido di perforazione dal foro. Se la sospensione è troppo fluida, il riempimento non raggiungerà la forza minima richiesta. Nel peggiore dei casi non si verificherà il consolidamento. Inoltre non verrà raggiunta la conduttività termica desiderata che di conseguenza potrebbe portare alla disgregazione della sospensione. Il rischio è di avere una tenuta troppo bassa per la protezione delle acque sotterranee, formazione di camere d'acqua potenzialmente a rischio congelamento e quindi dannose per la struttura del riempimento.

- **Omogeneità.** La sospensione non deve essere grumosa.
- **Viscosità** determinata dal produttore in modo tale che la sospensione possa essere iniettata correttamente e che la pressione all'interno del tubo di iniezione non sia troppo alta.
- **Valutazione della fluidità (cono di Marsh).** Valori più alti (cioè più viscosi) possono essere positivi, in modo tale che il pozzo sia riempito interamente e senza interruzioni (tempo di efflusso circa 40-100 secondi).
- **Tasso di sedimentazione:** dovrebbe essere minore di 1.5%.
- La sospensione non deve **separarsi**.
- **Annotare** il materiale da costruzione, data di produzione e quantità. In maniera da avere una documentazione in caso di possibili danni.

Per le miscele autoprodotte è problematico eseguire delle prove per garantirne la qualità. Nelle miscele pronte all'uso, invece, la densità è spesso troppo alta (vedi capitolo 6).

### 2.3.4 Iniezione / processo di riempimento e requisiti

Il tubo di iniezione, che è collegato al piede della sonda geotermica, viene introdotto nel foro insieme ad essa. I tubi della sonda vengono riempiti con acqua e sigillati a pressione prima di iniziare il riempimento. La chiusura a tenuta di pressione riduce il rischio che i tubi della sonda vengano schiacciati dalla colonna di sospensione nello spazio anulare. A seconda della profondità della sonda e della densità della sospensione, dovrebbe essere inserito un altro tubo di iniezione fino a metà della profondità del foro, in modo tale che sia possibile una cementazione a gradini. Le aste di riempimento sono relativamente rare o addirittura non utilizzate in Svizzera.

Per far sì che il fluido di perforazione sia completamente rimosso, il riempimento dello spazio anulare avviene col metodo Tremie. La sospensione miscelata e idonea viene iniettata dal basso verso l'alto. Si riempie finché la sospensione non emerge dalla superficie e fintantoché la densità della sospensione emergente corrisponda a quella introdotta (Fig.1). A seconda del miscelatore, il riempimento avviene in modo discontinuo o continuo. Per controllare la pressione della sonda (è consentita una pressione dall'interno verso l'esterno massima di PN16 di 21 bar (vedi capitolo 2.2)) è necessario montare un manometro alla testa della sonda. I tubi di questa rimangono sigillati a pressione fino alla solidificazione parziale della sospensione. Questa fase, facente parte delle fasi di idratazione, necessita di alcune ore (vedi capitolo 2.4). Spesso si presume erroneamente che la sospensione si sia stabilizzata entro un'ora. Per compensare il problema di dover estrarre le tubazioni protettive temporanee è possibile usare dei giunti a tenuta di pressione. Questi vengono utilizzati da diverse società di perforazione, in modo che le tubazioni protettive provvisorie possano essere tolte ugualmente. Se ciò non viene fatto, i tubi della sonda devono essere sottoposti il prima possibile a nuova pressione successivamente al prelievo delle tubazioni protettive. Il tubo di iniezione viene colmato e generalmente rimane all'interno del foro. Per le sonde profonde, è necessario eseguire una cementazione a gradini in modo che i tubi della sonda non vengano schiacciati o che la pressione all'interno del tubo non sia troppo alta. Ciò dipende dalla densità delle sospensioni e riguarda le sonde poste ad una profondità di circa 250 m. L'esperienza mostra che spesso a queste profondità vengono raggiunte pressioni troppo elevate all'interno del tubo della sonda o nel tubo di iniezione e per questo il processo di iniezione deve essere interrotto. La cementazione a gradini viene eseguita in due fasi, in modo che dopo la prima iniezione la sospensione si possa solidificare parzialmente. Nella seconda fase, il riempimento prosegue tramite il secondo tubo di iniezione. L'esperienza mostra che spesso volte il secondo tubo di iniezione viene inserito nel foro dopo la prima fase, e che poi attraverso questo avviene l'ulteriore riempimento. Poiché spesso il tubo di iniezione è troppo corto o difficilmente può raggiungere una profondità maggiore, si presume che il riempimento della seconda fase avvenga in maniera discontinua. I cedimenti del riempimento si verificano frequentemente e non possono essere evitati. Se il volume del cedimento non risulta essere troppo elevato, può essere riempito con pellet di argilla .

Durante il riempimento devono essere osservati i seguenti requisiti:

- **Riempimento continuo** dal basso verso l'alto per garantire un riempimento completo senza spazi vuoti (→ flusso di calore garantito, assenza di infiltrazioni d'acqua)

- Seguire le **istruzioni** delle autorità, ad esempio packer, calza, tipo di cemento (ad es. resistente ai solfati)
- **Densità della sospensione** superiore a quella del fluido di perforazione, in modo che il fluido di perforazione sia completamente spinto verso l'alto all'infuori del foro (generalmente si consiglia una densità di circa  $\geq 1.2 \text{ kg/dm}^3$ )
- Rispettare le **istruzioni del produttore** per la miscela, di modo che le proprietà come la conducibilità termica e la resistenza possano essere raggiunte
- Osservare la resistenza del **tubo di iniezione** (a circa 34 bar, spesso scoppia il tubo perché la sospensione è troppo densa o la pressione è troppo alta)
- Il trivellatore dovrebbe **riconoscere e documentare le cavità** durante la perforazione (come cedimenti durante la perforazione o improvvisa elevata penetrazione d'acqua), per ridurre così al minimo le perdite di cemento incontrollabili (ad es. per cavità grandi può essere posizionato un packer sopra di essa).
- Per le perdite di cemento prevedibili, ad es. con rocce incoerenti dovrebbero essere utilizzati packer o calze che prevengano le perdite di cemento.
- Per le **uscite artesiane delle acque sotterranee**, la sospensione dovrebbe essere, per esempio, caricata con barite o si dovrebbero usare materiali di riempimento speciali che si compongono rapidamente.
- **Controllo e documentazione** della pressione nel tubo della sonda, della densità della sospensione, della quantità e dell'omogeneità
- Se ci sono **perdite** è necessario contattare un geologo



Fig. 5 Sospensione che emerge alla testa del pozzo.

### Cosa influenza la qualità del riempimento:

- La maggior parte delle volte il processo viene fermato quando la sospensione arriva alla testa del pozzo. In realtà dovrebbe continuare a fuoriuscire fino a quando la sua densità corrisponde a quella della sospensione iniettata. A seconda delle condizioni ambientali, ad esempio all'interno di un giardino, questa pratica non è sempre utilizzabile!
- I distanziatori o l'accentramento aiutano a minimizzare gli spazi vuoti nel riempimento, ma rendono più difficile l'installazione. La posizione spaziale dei tubi della sonda influenza il profilo di temperatura nel riempimento e quindi anche un possibile congelamento parziale.
- Generalmente la qualità del riempimento è influenzata dai seguenti parametri: riempimento continuo privo di spazi vuoti (il posizionamento dei tubi all'interno del foro influenza la formazione di spazi vuoti, ad es. se sono attorcigliati o meno), acque sotterranee / litologia, qualità di cemento / densità del cemento, omogeneità, profondità del pozzo, superficie della sonda.

## 2.4 Composizione e idratazione del cemento

I materiali di riempimento standard sono costituiti dai seguenti componenti principali: clinker di cemento, bentonite e materiali aggregati come la sabbia di quarzo. Dalla cottura a 1450 ° C di calcare finemente macinato, argilla / marna, sabbia di quarzo e ossido di ferro, e con il gesso e l'anidrite successivamente aggiunte viene prodotto il cemento (cemento Portland). Durante il processo di combustione si formano i componenti principali: silicato tricalcico ( $C S$  bzw.  $3 CaO \times SiO_2$ ), silicato bicalcico ( $C S$  bzw.  $2 CaO \times SiO_2$ ), alluminato tricalcico ( $C A$  bzw.  $3 CaO \times Al_2O_3$ ) e ferriti di alluminato di calcio (per esempio  $C (A,F)$  o  $4 CaO \times Al_2O_3 \times Fe_2O_3$ ). Più finemente viene macinato il cemento, maggiore è la resistenza che sviluppa e maggiore è la velocità di reazione del clinker. A seconda delle proprietà richieste, vengono aggiunti altri additivi come per esempio la grafite per una maggiore conduttività termica.

Il cemento funge da legante idraulico e si indurisce quando si aggiunge acqua ad un riempimento stabile. All'inizio dell'idratazione, si formano prodotti principali come silicato di calcio idrato e ettringite (solfato idratato) (vedi ad esempio Taylor 1992). Il rapporto di acqua/cemento della miscela varia fra circa 0,3 e 0,8. L'idratazione con la formazione della struttura dei prodotti di idratazione nei pori può essere approssimativamente suddivisa in 3 fasi: irrigidimento, solidificazione e indurimento della struttura. La velocità e la durata della reazione dipendono quindi, in modo significativo, dallo spazio tra pori e dal rapporto fra acqua e cemento. La resistenza è determinata dal contenuto di argilla mediante la formazione di idrati di silicato di calcio idrato o idrati di calcio alluminato.

Nei primi minuti fino a circa 2 ore, vengono sciolti solfati di calcio e solfati di alcali, che reagiscono con le fasi del clinker e formano i primi cristalli di ettringite e di idrati di silicato di calcio. Tuttavia, questi sono ancora troppo piccoli e non riempiono lo spazio dei pori, non formando ancora una struttura solida. La struttura è solo leggermente più rigida ed è ancora instabile. Nel periodo che va all'incirca da 2 a 24 ore dopo la miscelazione, inizia un'intensa idratazione delle fasi del clinker. La crescita progressiva e l'incastro dei cristalli di idrati di silicato di calcio e di ettringite creano una struttura di base e lo spazio dei pori viene riempito. Quando il numero delle fasi attive del clinker diminuisce, la velocità di reazione viene ridotta. La sospensione si irrigidisce sempre di più. Nel periodo dai 2 ai 28 giorni, i prodotti di idratazione continuano a crescere nello spazio dei pori stabilizzando così la microstruttura, ed il materiale da costruzione raggiunge la sua resistenza.

Durante l'idratazione viene rilasciato calore. L'energia termica rilasciata dipende dalla quantità di materiale da costruzione e dalla composizione del clinker di cemento. Poiché nel settore dei materiali di riempimento per sonde geotermiche è richiesta una resistenza più bassa rispetto a quella del calcestruzzo, la percentuale del clinker di cemento usato è inferiore. Di conseguenza viene anche rilasciato meno calore. Il calore rilasciato può essere misurato nelle sonde geotermiche. Il riscaldamento è da pochi decimi a pochi gradi ed è trascurabile dopo circa 10 giorni (Touzin, 2017).

## 2.5 Stato della ricerca e della letteratura

I requisiti più importanti per il riempimento di sonde geotermiche in Svizzera sono menzionati nella **normativa SIA 384/6** e nella **guida all'implementazione "Utilizzo del calore dal suolo e sottosuolo" dell'UFAM** (2009). Inoltre i requisiti minimi per il materiale di riempimento vengono descritti anche nel **regolamento marchio di qualità della APP §6.17** e nelle varie direttive dei cantoni. Questi ultimi fanno riferimento principalmente alla SIA e alla guida all'implementazione.

Soprattutto in Germania, negli ultimi anni, sono stati realizzati alcuni studi sulla qualità dei materiali di riempimento. Di solito si riferiscono però a test di laboratorio. Mentre alcuni stati federali hanno anche pubblicato studi e manuali dettagliati. Per il presente lavoro sono importanti le seguenti pubblicazioni. Vengono elencati solo i più recenti, in quanto riassumono i lavori più vecchi, elaborandoli e descrivendoli spesso in dettaglio.

Una buona sintesi del livello di conoscenze dei requisiti del riempimento, nonché il modo in cui deve essere effettuato un corretto riempimento, si svolge nel **"Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie" vom Arbeitskreis "Geothermie" der Fachsektion Hydrogeologie und Ingenieurgeologie** (Raccomandazioni per la geotermia in prossimità della superficie - Progettazione, costruzione, gestione e monitoraggio - EA Geothermie" del Arbeitskreis "Geotermia" della sezione Idrogeologia e geologia ingegneristica - 2015) .

I seguenti articoli accademici si sono occupati, in particolare, dei requisiti relativi ai materiali di riempimento e ai metodi di prova, soprattutto per quanto riguarda la resistenza al gelo, requisiti fondamentali per la qualità a lungo termine della sonda geotermica:

Dissertazione di **Herrmann, V.J. (2008) „Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonde"** (Indagini geologiche ingegneristiche per il riempimento di fori per sonde geotermiche). Diversi materiali di riempimento utilizzati nel campo delle sonde geotermiche sono stati testati in laboratorio e in studi su vasta scala, per testare la resistenza al gelo. Anche i metodi di prova sono stati testati e adattati. Inoltre, sono stati sviluppati materiali da costruzione per il riempimento che non si fessurano quando si verificano cicli di gelo e disgelo. Per i materiali di riempimento non antigelo, i cicli di gelo-disgelo provocano fessure e un distacco dei tubi della sonda. Le miscele standard e pronte all'uso sono fluide e pompabili, ma in generale non resistenti al gelo. Con tutti i metodi di prova sono state trovate crepe irreversibili in queste miscele. Più la sospensione contiene acqua, più il materiale da costruzione è stato danneggiato.

I criteri per la resistenza al gelo sono, ad esempio, danni microscopici e macroscopici alla struttura, variazione della velocità degli ultrasuoni o della massa. Il campione non deve presentare fessure di larghezza  $>0,1$  mm. L'azione degli agenti atmosferici, cioè la perdita di peso dopo ogni variazione di gelo-disgelo, deve essere  $<1$  g. I tempi di transito degli ultrasuoni in entrambe le direzioni assiali rimangono costanti. L'estensione verticale del provino è  $<1\%$ . Inoltre, dopo 28 giorni, il modulo dinamico di elasticità deve essere  $> 75\%$ .

Con rapporti di acqua/solidi maggiori di 1, i campioni si sono completamente disgregati. A valori di circa 0,4 si sono formate fessure, ma i campioni non si sono rotti. I cementi a lenta polimerizzazione tendevano a mostrare meno danni. I materiali da costruzione resistenti al gelo avevano un basso contenuto d'acqua con valori di acqua/solidi di circa 0,25 (circa il 20% in peso). Minore è la quantità d'acqua nel sistema, minore è la possibilità di lenti di ghiaccio e crepe dovute all'espansione del volume. I seguenti fattori influenzano i risultati dei test: dimensioni, forma, recipiente del campione, luogo, metodo di congelamento, distanza dei campioni, umidità e dimensioni della camera. Ad esempio i campioni devono essere mantenuti umidi durante le prove e le provette devono avere una certa dimensione minima.

Dissertazione di **Anbergen, H. (2015) „Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden"** (Metodo di prova per determinare l'influenza alternata di gelo e disgelo sui materiali di riempimento per sonde geotermiche). A causa della mancanza di metodi di prova standardizzati, questo studio ha sviluppato un metodo di prova proprio per la resistenza al gelo dei materiali di riempimento, testato su vari materiali da costruzione e numericamente verificato. Il metodo di prova si basa generalmente sulla misurazione riproducibile della permeabilità del sistema dopo cicli di gelo-disgelo, poiché in caso di danni dovuti al gelo quest'ultima aumenta con il rammollimento strutturale, ad es. formazione di crepe. I criteri di prova erano: la precisione di scala del provino, il congelamento dall'interno verso l'esterno tramite un tubo di sonda integrato e la misurazione diretta della conduttività idraulica. Si è

constatato che la tenuta del sistema dei tubi della sonda e del riempimento insieme, è inferiore di due ordini di grandezza rispetto alla tenuta del solo materiale da costruzione (a seconda delle condizioni superficiali dei tubi della sonda) e che le prime alternanze di gelo-disgelo sono determinanti per la tenuta. Dopo 6 cicli di gelo-disgelo è possibile affermare che il coefficiente di permeabilità non è più sottoposto a variazioni. Durante i cicli di gelo-disgelo, il coefficiente di permeabilità dell'intero sistema è aumentato da una media di  $10^{-10}$  a  $10^{-8}$  m/s a  $10^{-10}$  a  $10^{-8}$  m/s, cioè in media di una, massimo di tre ordini di grandezza. Questi ultimi si riferiscono al riempimento con materiali da costruzione senza minerali argillosi rigonfiabili, in quanto non provocano rigonfiamenti. Le variazioni di permeabilità sono legate al materiale, cioè ogni prodotto presenta una diversa permeabilità iniziale, che però varia in tutti, nei primi 6 cicli di gelo-disgelo. Si deve perciò tener conto dell'età del campione, poiché i campioni più vecchi mostrano una permeabilità inferiore. Inoltre, in questo studio sono stati confrontati e valutati molti dei metodi di prova esistenti.

Il lavoro del progetto di ricerca "Verbund EWS-tech" (2016) è quello un po' più completo. Nel quadro di questo lavoro, in prove di laboratorio e su larga scala, sono stati esaminati diversi metodi di prova sui materiali da costruzione tradizionali e termicamente migliorati, per quanto riguarda le loro proprietà (densità, reologia, omogeneità, stabilità) e le influenze ambientali, come l'acqua e la temperatura, ed è stata testata la qualità dei materiali da costruzione per il riempimento (durata, permeabilità, ...). In più, venivano variati vari parametri come il contenuto di acqua/solidi o il tempo di miscelazione. È stato dimostrato che la maggior parte dei metodi di prova produce risultati comparabili.



Fig. 6 Miscela pronta dopo 0, 2 e 4 cicli di gelo-disgelo

Dalla dissertazione Herrmann 2008. Miscela pronta all'uso a base di quarzo con il 32% in peso di acqua.

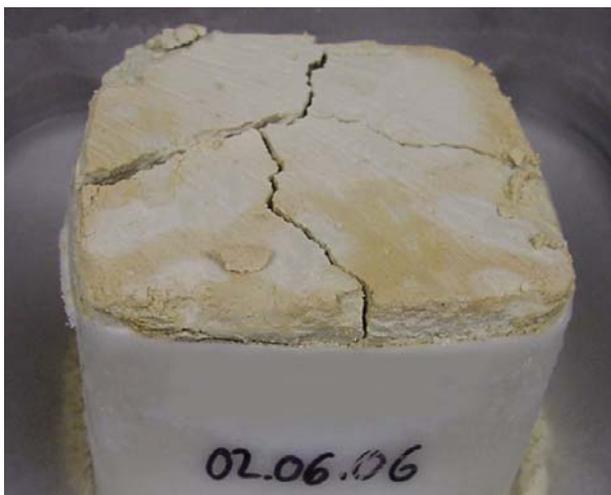


Fig. 7 Miscela standard dopo 6 cicli di gelo-disgelo

Dalla dissertazione Herrmann 2008, miscela standard secondo SIA 384/6.

Una Bund/Länderarbeitsgruppe dei servizi geologici statali in Germania ha sviluppato una **“Empfehlung für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde”** (Raccomandazione per i requisiti di permeabilità idraulica del sistema di sonde geotermiche - 2015), in cui vengono elaborati molti dati di base esistenti sui requisiti e le proprietà dei materiali da costruzione, la loro miscelazione, il riempimento ed i controlli. Per proteggere le acque sotterranee e la funzionalità della sonda geotermica, per l'intero sistema ( foro 9 riempimento - tubo sonda) si dovrebbe ottenere un coefficiente di permeabilità di almeno  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s per l'intero ciclo di vita, tenendo conto della resistenza al solfato, della resistenza al gelo e delle proprietà richieste del materiale da costruzione (conducibilità termica, plasticità, ritiro, ecc.). La tabella n. 5 riporta i requisiti minimi e i criteri di valutazione concreti per il materiale da costruzione. Maggiore è il contenuto di minerali di argilla gonfiabili, maggiore è la densità, l'autoguarigione grazie alla capacità di rigonfiamento a lungo termine (ad esempio in caso di danni da gelo o solfato), maggiore durata, maggiore resistenza all'acqua aggressiva, un basso comportamento di assestamento ed una maggiore resistenza al gelo.

Ulteriori **esami di idoneità** completi sui diversi materiali da iniezione per sonde geotermiche sono descritti nel rapporto della **Niederbrucker & Steinbacher (2007) Austria**. Essi dimostrano concretamente che la qualità delle miscele standard o delle miscele autoprodotte, in termini di resistenza, massa di assestamento, resistenza al gelo, impermeabilità, conduttività termica sono significativamente peggiori di quelle delle miscele pronte all'uso, o che in alcuni casi non soddisfano i requisiti minimi.

## 3 Requisiti cantonali per il materiale di riempimento delle sonde geotermiche

### 3.1 Introduzione

Con la perforazione si creano delle vie d'acqua artificiali che devono essere nuovamente sigillate in maniera rapida e ottimale, per proteggere le acque sotterranee. Il materiale di riempimento deve essere in grado di adempiere a questo compito. Per questo motivo, le autorità cantonali autorizzano le perforazioni solo se è possibile un corretto riempimento, e se vengono protette le acque freatiche. A seconda della litologia, sono necessari speciali materiali di riempimento, calze o prodotti simili, oppure in condizioni avverse non è praticabile nessun tipo di perforazione. Inoltre, per le autorità cantonali è importante garantire la compatibilità ambientale e la longevità dei materiali di riempimento sempre a protezione delle acque sotterranee.

Una base importante è costituita dalla guida all'implementazione dell'UFAM (2009), alla quale si riferiscono la maggior parte delle autorità cantonali (per i requisiti cfr. capitolo 2). Poiché in alcuni casi il sottosuolo varia notevolmente da un cantone all'altro, anche il riempimento deve corrispondere a requisiti diversi. Nelle zone carsiche o in presenza di strati ricchi di anidrite e gesso, le specifiche sono diverse da quelle, ad esempio, della molassa dell'*Altopiano svizzero*. Per questo motivo sono stati presi in analisi i requisiti cantonali.

### 3.2 Procedimento

Sono stati analizzati i siti web dei cantoni per quanto riguarda i requisiti dei materiali da costruzione per il riempimento. In particolare, sono stati richiesti i manuali d'istruzione con riferimenti alla norma SIA 384/6, all'APP o alla guida all'implementazione dell'UFAM. In alcuni cantoni, le autorizzazioni sono accompagnate da schede informative che specificano i requisiti per il riempimento. Inoltre, la domanda di autorizzazione può includere, ad es. il produttore, il tipo, la quantità o la conduttività termica del materiale di riempimento. Sono state inoltre effettuate ricerche specifiche per verificare se siano stati soddisfatti requisiti più severi di quelli previsti ad es. dalle direttive UFAM del 2009. Sulla base delle informazioni a nostra disposizione, sono state effettuate richieste specifiche alle persone responsabili presso le autorità cantonali. Le seguenti domande sono state poste per verificare o correggere le nostre ricerche:

Per quanto riguarda i requisiti, le informazioni contenute nei manuali di istruzione, nelle autorizzazioni e nelle domande:

- I requisiti generali per il riempimento sono disponibili sulla homepage cantonale (ad es. manuale di istruzioni, link con riferimenti alla SIA 384/6, FWS, alla guida all'implementazione dell'UFAM, ecc.).
- Requisiti per il riempimento menzionati nella autorizzazione (ad es. manuale di istruzioni allegato direttamente sull'autorizzazione come clausola)
- Informazioni sui materiali di riempimento richiesti nella domanda (ad es. produttore, tipologia, quantità, conduttività termica).
- Indicazioni sui potenziali problemi di riempimento (ad es. carsismo, falda freatica) e relative misure richieste, erano ad es. nell'autorizzazione?
- Che cosa è specificamente menzionato o richiesto in più per quanto riguarda il riempimento (ad es. cementazione dal basso verso l'alto, cementi speciali resistenti ai solfati, calza nel settore di protezione dell'acqua  $A_u$ , ecc.)?
- Quando, dove e perché sono previsti requisiti particolari (ad es. carsismo, Gipskeuper, ecc.)?

Controllo, documentazione, conseguenze:

- Il riempimento viene controllato e documentato? (in caso affermativo, con quale frequenza, un solo controllo o sistemico, da parte di chi)?
- I dati sul riempimento vengono registrati sistematicamente dal cantone (ad es. tipo di cemento, quantità di cemento, perdite di cemento, ecc.)?

- Eventualmente non venga riempito correttamente (ad es. densità inadeguata, non completamente dal basso verso l'alto, ecc.) come si comporta il cantone?

Esperienze:

- Che esperienza ha avuto il cantone nel campo dei cementi (problemi, danni, ecc.)?

### 3.3 Risultati

Dei 26 cantoni intervistati, a seconda delle domande, hanno risposto dai 14 ai 16 cantoni. I dati sono stati integrati all'interno della nostra ricerca (dicembre 2017) e inclusi nella valutazione.

#### Requisiti e/o informazioni nei manuali di istruzioni, nelle autorizzazioni e nelle domande

Su 16 homepage cantonali sono reperibili i requisiti generali per il riempimento (riferimenti alla norma SIA 384/6, all'APP e/o all'autorità di esecuzione UFAM 2009, alcuni con riferimenti o requisiti simili a quelli della guida di esecuzione dell'UFAM). 14 cantoni fanno riferimento ai corrispondenti regolamenti / requisiti sul riempimento. In almeno 10 cantoni le rispettive homepage e autorizzazioni contengono riferimenti. In effetti, le homepage cantonali fanno maggiormente riferimento ad un specifico manuale di istruzioni oppure al modello generale di utilizzo dell'energia geotermica. Fanno riferimento all'UFAM 8 cantoni. 5 cantoni, invece, alla norma ISA 384/6 e all'APP. Per le autorizzazioni, 9 cantoni fanno riferimento alla norma ISA 384/6, 8 cantoni all'UFAM e 4 all'APP. 5 cantoni, invece, fanno riferimento al manuale di istruzioni.

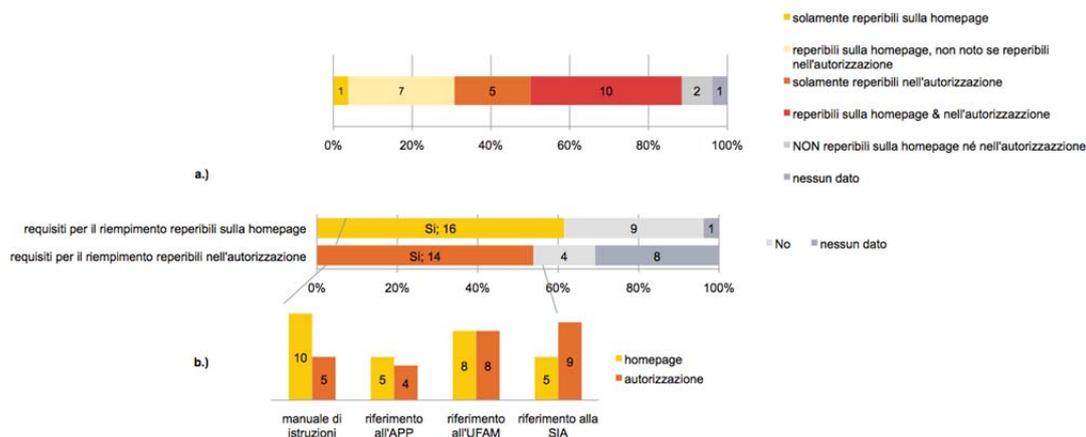


Fig. 8 a.) I requisiti per il riempimento si trovano sulla homepage o menzionati nell'autorizzazione b.) I requisiti per il manuale d'istruzione allegato / il modello generale di utilizzo dell'energia geotermica o i riferimenti alla norma SIA 384/6, all'APP, oppure all'UFAM (possibilità di risposte multiple).

Nella domanda 1 cantone richiede informazioni specifiche sul produttore, il tipo di cemento, la quantità di cemento progettata e la conduttività termica del cemento. 14 cantoni che hanno risposto, nella domanda non richiedono alcuna informazione riguardo il riempimento.

In 6 su 16 cantoni sono indicati possibili problemi di riempimento (ad es. strati spessi di roccia sciolta, carsismo, falde acquifere, pericoli legati alla presenza di gas, Gipskeuper). In 2 cantoni viene fatto specifico riferimento al carsismo e ai conseguenti problemi causati dalla perdita di cemento. 1 cantone ha piani a lungo termine per informare i richiedenti dell'esistenza del carsismo su delle mappe ben elaborate. 5 cantoni informano riguardo i problemi relativi alla protezione delle acque e richiedono, in alcuni casi, corrispondenti pretese (ad esempio: installazione di una calza per evitare che la sospensione defluisca, utilizzo di un materiale di riempimento resistente ai solfati nello Gipskeuper, limitazione della profondità o monitoraggio da parte di geologi).

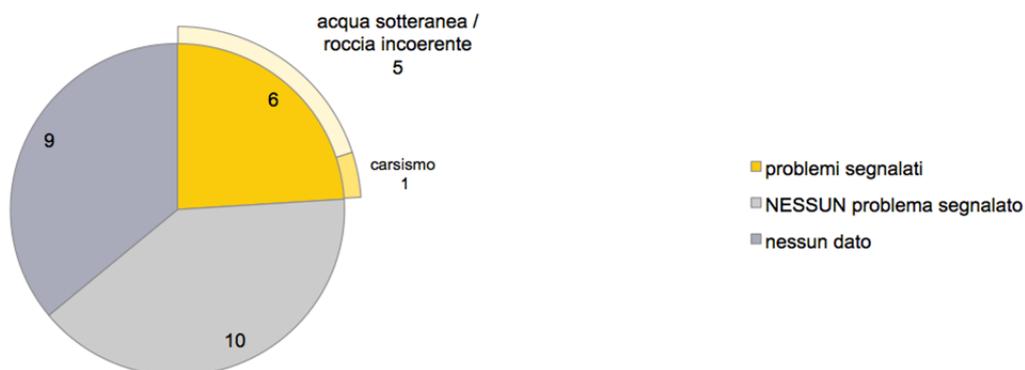


Fig. 9 Segnalazione di problemi durante il riempimento

In termini concreti, sono necessarie procedure e misure diverse per quanto riguarda il riempimento. Dei 26 cantoni intervistati, solo 16 hanno partecipato ai questionari.

10 cantoni citano esattamente le direttive dell'UFAM o la SIA o l'APP (cfr. 2.3.1). **Di solito si tratta di un estratto in quale è scritto che lo spazio anulare deve essere completamente riempito dal basso verso l'alto con una sospensione adeguata al fine di garantire un'integrazione della sonda nel sottosuolo permanente, stabile fisicamente e chimicamente. Le proprietà del materiale di riempimento (ad es. densità, coefficiente di permeabilità, resistenza al gelo) generalmente non sono menzionate.**

Per la maggior parte, i cantoni attribuiscono più importanza alla protezione delle acque sotterranee che alla funzionalità a lungo termine della sonda geotermica stessa. La protezione delle acque sotterranee è di competenza del cantone, mentre l'efficienza funzionale è una responsabilità privata. Di conseguenza, non vengono richiesti requisiti sulla conducibilità termica o sul tipo di cemento. Vengono invece fornite indicazioni riguardanti, ad esempio, le perdite di cemento in strati di roccia sciolta o cavità carsiche, con specifiche corrispondenti come l'installazione di una calza. In 10 cantoni vengono menzionati esplicitamente ulteriori problemi che quindi devono essere affrontati. Tra queste si segnalano la presenza di Gipskeuper (6 cantoni), falde artesiane (2 cantoni) e le immissioni di gas (2 cantoni). Di conseguenza sono necessari materiali da costruzione resistenti ai solfati, installazioni tecniche aggiuntive, come i packer, o il riempimento immediato dello spazio annulare. Un ulteriore requisito per il riempimento, che non è menzionato né dall'UFAM né dal SIA né dall'APP, è richiesto solo in un cantone, ed è il seguente: per i campi di sonde geotermiche poste in aree con un elevato riscaldamento antropico delle acque sotterranee, è necessario un cemento a bassa conducibilità termica.

Inoltre, 4 cantoni hanno richiamato l'attenzione sulle responsabilità. In 4 cantoni il provvedimento è di competenza del geologo ed in 2 dell'impresa di perforazione. In 16 cantoni su 16 la documentazione per la domanda è disponibile online.

#### Controllo, documentazione, conseguenze

In 1 cantone su 16 vengono raccolti sistematicamente i dati relativi al riempimento (ad es. tipo di cemento, quantità di cemento, perdite di cemento, ecc.) e vengono effettuati controlli in situ. In 9 cantoni, il riempimento è in parte documentato dall'ufficio geologico di accompagnamento o in parte dall'impresa di trivellazione e poi trasmesso al cantone. In un cantone viene accertato se le condizioni per il riempimento sono state realizzate conformemente all'autorizzazione. In 5 dei 16 cantoni il riempimento non viene né rilevato, né controllato, né documentato. 10 cantoni non hanno risposto alla domanda.

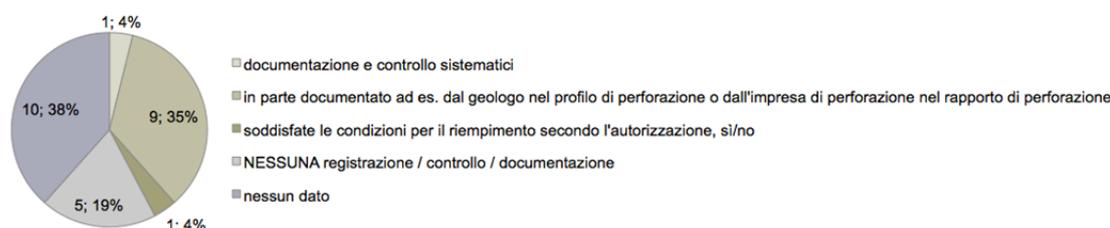


Fig. 10 Documentazione, raccolta sistematica di dati sul riempimento e controlli

13 cantoni su 26 hanno risposto alla domanda sul come procedere in caso di riempimento incompleto. Cinque cantoni hanno segnalato che tale caso non è riconosciuto o lo è raramente o che l'ente non ne viene avvisato. In 2 cantoni il riempimento incompleto non ha conseguenze. 1 cantone valuta ogni caso individualmente.

In un cantone, l'azienda di perforazione viene sensibilizzata da un ufficio di esperti, nonché da ingiunzioni scritte o colloqui con imprenditori responsabili in caso di violazioni multiple. In 1 cantone la sonda deve essere messa fuori servizio. Ma ciò non è mai accaduto finora. In 2 cantoni, in caso di presenza di falde artesiane, è vietato installare ulteriori sonde. In 2 cantoni viene contattata l'impresa di perforazione. In un cantone, le misurazioni devono essere effettuate dal trivellatore o dall'idrogeologo.

### Esperienze

Solo 7 cantoni su 14 hanno riportato un'esperienza nella gestione del riempimento in caso di diversi problemi. In 3 cantoni sono state registrate perdite di sospensione nel carsismo e in 1 cantone perdite nella molassa subalpina. In 3 cantoni è stato necessario riempire le falde artesiane perforate.

## 3.4 Conclusione

Quasi tutti i cantoni impongono requisiti al riempimento. In poco più della metà dei casi, questi dati si trovano sia sulla homepage che nell'autorizzazione. A regola i cantoni fanno riferimento all'APP e alla SIA o direttamente all'UFAM. Spesso vengono citati brevi estratti. Più frequentemente è indicato l'utilizzo di una sospensione adeguata, che garantisca una tenuta permanente ed una integrazione della sonda nel sottosuolo che risulti permanente e chimicamente stabile. Questi requisiti sono in realtà completi, senza dover menzionare ulteriori proprietà dettagliate del materiale da costruzione. In questo modo il committente o l'impresa di perforazione ha la libertà di scegliere il materiale da costruzione adatto e di installarlo corrispondentemente.

La protezione delle acque sotterranee è particolarmente importante per i cantoni (~4/5 dei cantoni partecipanti). Per questo motivo è spesso richiesto un riempimento senza interruzioni dal basso verso l'alto, anche se il cantone non ne controlla la stabilità e la qualità, entrambi fattori che, a lungo termine, possono incidere sulla protezione delle acque. I requisiti speciali per la gestione del riempimento in caso di falde artesiane, *Gipskeuper*, presenza di gas, ecc. sono fortemente legati alla relativa geologia.

Per questo motivo i cantoni AG, BL, JU e VS richiedono, in alcuni casi, materiali da costruzione speciali.

Le ispezioni in situ e le registrazioni sistematiche vengono effettuate solo nel cantone SO. In circa ¼ di tutti i cantoni partecipanti ai questionari, i dati vengono registrati solamente dall'impresa di perforazione o dal geologo che li accompagna. Le precauzioni necessarie in caso di problemi sono in parte a carico del geologo o dell'impresa di perforazione. Molti cantoni ritengono che i problemi relativi al riempimento siano riconosciuti o segnalati solo in pochissimi casi. Alcuni cantoni hanno richiesto di individuare quali provvedimenti sarebbe sensato inserire nell'autorizzazione. In alcuni casi, il controllo non è considerato un compito del cantone. Meno della metà dei cantoni partecipanti al sondaggio indica possibili problemi di riempimento e propone soluzioni adeguate.

Per le raccomandazioni, si rimanda al capitolo 8.

## 4 Statistiche sui materiali di riempimento utilizzati in Svizzera e sul controllo della qualità

### 4.1 Introduzione e procedura

Un'analisi dei materiali di riempimento utilizzati in Svizzera è possibile solo se si conoscono i materiali da costruzione utilizzati, in che quantità, e in che modo vengono miscelati, iniettati e controllati. Per tale motivo sono state contattate tutte le aziende di perforazione operanti in Svizzera, alle quali è stato chiesto di compilare un questionario.

Sono state poste le seguenti domande:

1. Utilizzate miscele pronte all'uso o auto-prodotte?
2. Qual è il vostro consumo annuale di cemento?
3. Quali materiali di riempimento utilizzate per le sonde geotermiche (produttore, tipo di cemento, quantità annuale)?
4. Metri totali di perforazione all'anno?
5. Utilizzate strumenti di misurazione digitale per il controllo della qualità (portata, pressione)? Se sì, specificare il tipo di dispositivo.
6. Utilizzate strumenti di misurazione digitale per determinare la densità e la quantità di riempimento? Se sì, specificare il tipo di dispositivo.
7. In caso di mancata risposta a una delle domande precedenti: Con quale frequenza utilizzate cementi speciali?
8. Come si mescola il cemento (ad es. miscelatore forzato, miscelatore colloidale, vasca)?
9. Come viene controllata/registrata la densità del cemento iniettato?
10. Quante volte all'anno avviene la misurazione della qualità del riempimento durante il processo di iniezione?
11. Ci sono, secondo la sua esperienza, dei cementi che sono problematici?
12. Qual è la vostra procedura per prevenire lo schiacciamento delle sonde a profondità maggiori di 250 m?

I risultati più importanti sono descritti di seguito.

### 4.2 Risultati e conclusioni

Delle 40 società di perforazione contattate, 19 hanno risposto. Alcune sono poco, o per nulla, attive sul territorio svizzero. I metri totali di perforazione annuali, delle aziende che hanno risposto, sono di circa **1.700 km all'anno** (situazione 2016/2017). In Svizzera vengono attualmente perforati un totale di circa 2500 km all'anno. I risultati dell'indagine sono quindi significativi, anche se non tutte le aziende di perforazione hanno risposto. Ciò è dimostrato dal fatto che il principale fornitore di malta in Svizzera vende circa 5'500 tonnellate di materie prime all'anno, mentre l'indagine prende in considerazione circa 5'000 tonnellate. Il range dei metri di perforazione per ogni azienda è compreso tra circa 11.000 e 260.000 m (punti blu nella Fig.11).

Sono state utilizzate circa **9200 tonnellate di materiale di riempimento** o cemento. Il 17% di queste era costituito da miscele auto-prodotte o standard. Si noti che le aziende di perforazione più grandi usano soprattutto le proprie miscele (barre gialle nella Fig.11). Nel 2016, 12 delle 19 aziende di perforazione hanno utilizzato cementi speciali come i materiali da costruzione termicamente migliorati o resistenti ai solfati (barre rosse nella Fig.11). La quantità utilizzata rappresenta circa l'8% di tutti i materiali di riempimento adoperati.

La quantità media di riempimento per 100 metri di perforazione è di circa 700 kg (triangoli verdi in Fig.12). Tuttavia, si noti che, a seconda del materiale da costruzione utilizzato, in 100 metri di perforazione sono utilizzate quantità diverse. Per il BTD Filler 350 e le miscele auto-prodotte, questo valore è mediamente di circa 360 kg per 100 metri di perforazione e per i prodotti di Küchler di circa 950 kg per 100 metri di perforazione. Va notato che il valore di acqua/solidi gioca un ruolo decisivo per le varie proprietà ed i vari requisiti (vedi capitolo 2). Il rendimento dovrebbe essere valutato di conseguenza in modo critico.

La maggior parte della sospensione viene miscelata con il miscelatore forzato o continuo, seguito dal miscelatore colloidale (lettere in Fig.12). Alcune aziende di perforazione utilizzano molteplici

sistemi. Si osservi che le aziende di perforazione più piccole utilizzano principalmente il miscelatore forzato, mentre le aziende più grandi con metri di perforazione >100.000 m tendono ad utilizzare miscelatori colloidali e/o vasche d'agitazione. Le aziende che utilizzano materiali da costruzione Kùchler tendono ad utilizzare i miscelatori continui Mungg (distribuiti da Kùchler).

I prodotti usati in Svizzera sono riportati nella Fig.12. I prodotti di Kùchler sono utilizzati da ca. il 54% con il K Injekttherm 110 che è il più utilizzato. Seguono i prodotti di BTD (ca. 20%), le miscele auto-prodotte (ca. 17%) e i cementi speciali di HDG-Umwelttechnik GmbH (ca. 5%).

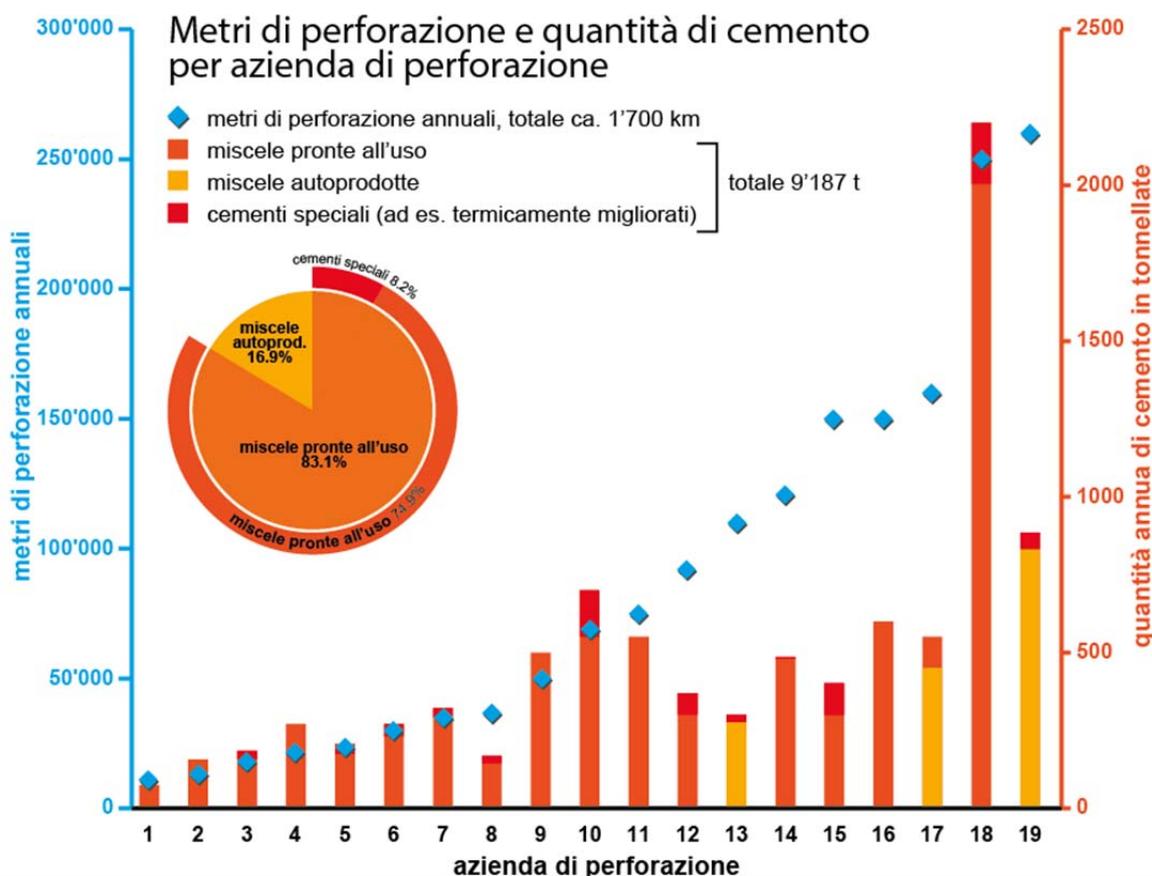


Fig. 11 Metri di perforazione (diamanti blu) e quantità di cemento (barre gialle, arancioni, rosse) per azienda di perforazione all'anno

### I seguenti problemi si sono verificati con i materiali di riempimento:

Tredici società di perforazione non hanno fornito alcuna informazione o non hanno, finora, avuto esperienze problematiche con i materiali di riempimento. A parte ciò viene segnalato quanto segue: in parte un volume di assestamento troppo elevato; in parte troppo ricco di quarzo e quindi difficile da pompare; i cementi termicamente migliorati utilizzati per sonde profonde sono problematici a causa del loro peso; dati in parte errati; non esiste malta resistente al gelo - inoltre non è necessaria malta resistente al gelo, in quanto anche il terreno si congela e il riempimento non è responsabile del congelamento, ma è il dimensionamento ad essere sbagliato; pompe di miscelazione della malta non mescolare correttamente.

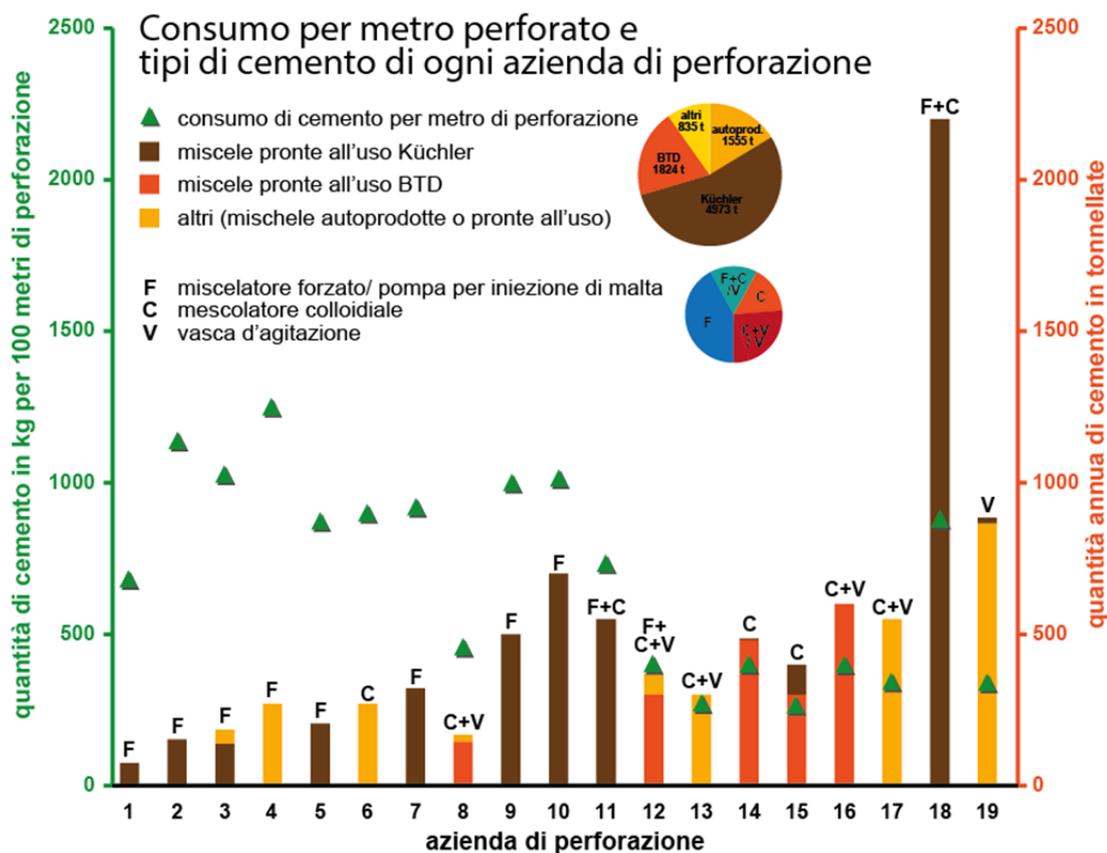


Fig. 12 Tipologie di cemento utilizzate (barre) e consumo per metro forato (triangoli verdi)

Le barre colorate rappresentano i diversi tipi di cemento utilizzati (ordinata destra). I triangoli verdi mostrano il consumo medio di cemento di ogni azienda (in kg) per 100 metri di perforazione (determinato dalla quantità annuale di cemento utilizzato e dal totale dei metri di perforazione di ogni azienda). Le lettere sopra la barra indicano quale miscelatore viene utilizzato per miscelare la sospensione. I due grafici a torta confrontano i tipi di cemento e le betoniere utilizzate.

La **procedura per le sonde profonde >250 m** per prevenire la compressione dei tubi è stata eseguita come segue (19 aziende partecipanti):

- **x4 volte** non è stata fornita **alcuna informazione**, o non sono state posate sonde geotermiche così profonde.
- **x11 volte** è stato menzionato il **controllo della pressione** con un manometro nei tubi della sonda e in parte la pressione di iniezione.
- **x8 volte** è stato menzionato il processo di **cementazione a gradini** come possibile procedura, per cui solo alcuni indicano che sono stati installati diversi tubi per l'iniezione. Inoltre viene nominato anche il riempimento successivo dall'alto. Nota: quest'ultima è stata osservata più volte nei siti di perforazione quando la pressione interna superava i valori critici.
- **x4 volte** è stato detto che come contromisura la **sonda viene messa sotto pressione** (ad es. precompressa a 5 bar).
- **x3 volte** è stato detto che la **sospensione viene diluita maggiormente**. Nota: In generale, il riempimento deve essere sempre mescolato secondo l'indicazione del produttore.
- **x3 volte** è stato affermato l'utilizzo di un **materiale da costruzione più leggero**.
- **x3 volte** è stato menzionato che i tubi della sonda a partire di una certa profondità vengono

riempiti con acqua e successivamente **chiusi**. Nota: Secondo SIA 384/6 paragrafo 5.4.3, non solo le sonde geotermiche profonde devono essere riempite completamente d'acqua e sigillate a tenuta di pressione durante il riempimento, ma è un comportamento necessario con tutte le sonde.

- Singole risposte: utilizzare sonde PN20 o 30, precedentemente riempire il foro, attendere una notte, e poi sigillare la sonda a tenuta di pressione. Nota per l'ultima indicazione: nelle risposte precedenti relative al controllo della pressione viene inclusa la chiusura a tenuta stagna. Qui, tuttavia, è stato esplicitamente affermato che la chiusura a tenuta di pressione impedisce lo schiacciamento! La sola chiusura non può impedire lo schiacciamento; vedi SIA 384/6 F.3.

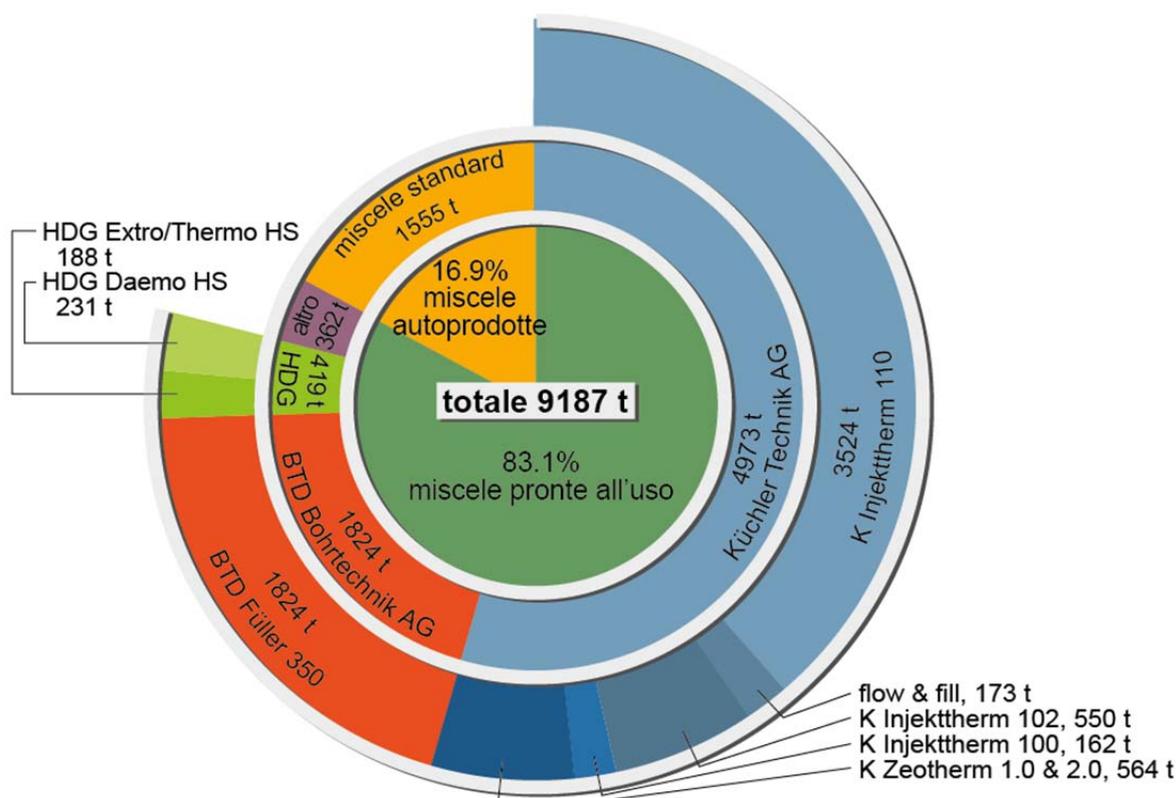


Fig. 13 Materiali da costruzione utilizzati in Svizzera, secondo l'indagine

Oltre la metà dei prodotti utilizzati sono Küchler (circa il 54%), seguiti dai prodotti BTD (circa il 20%), dalle miscele autoprodotte (circa il 17%) e dai cementi speciali HDG-Umwelttechnik GmbH (circa il 5%).

I parametri più importanti sono il controllo della pressione interna dei tubi della sonda e la risposta corrispondente (ad es. cementazione a gradini), nonché la scelta adattata dei materiali (materiali di riempimento più leggeri e/o sonde più resistenti alla pressione). In ogni caso, non si dovrebbe semplicemente inserire la sospensione dall'alto, altrimenti non è possibile un riempimento totale evitando la formazione di spazi vuoti. Durante il riempimento i tubi della sonda devono sempre essere riempiti d'acqua e chiusi a tenuta di pressione. Dopo il riempimento, i tubi della sonda devono rimanere chiusi fino a quando il riempimento non si è stabilizzato, in modo da escludere una successiva compressione.

Tab. 1 Risposte riguardanti i controlli di qualità (19 partecipanti / risposte)

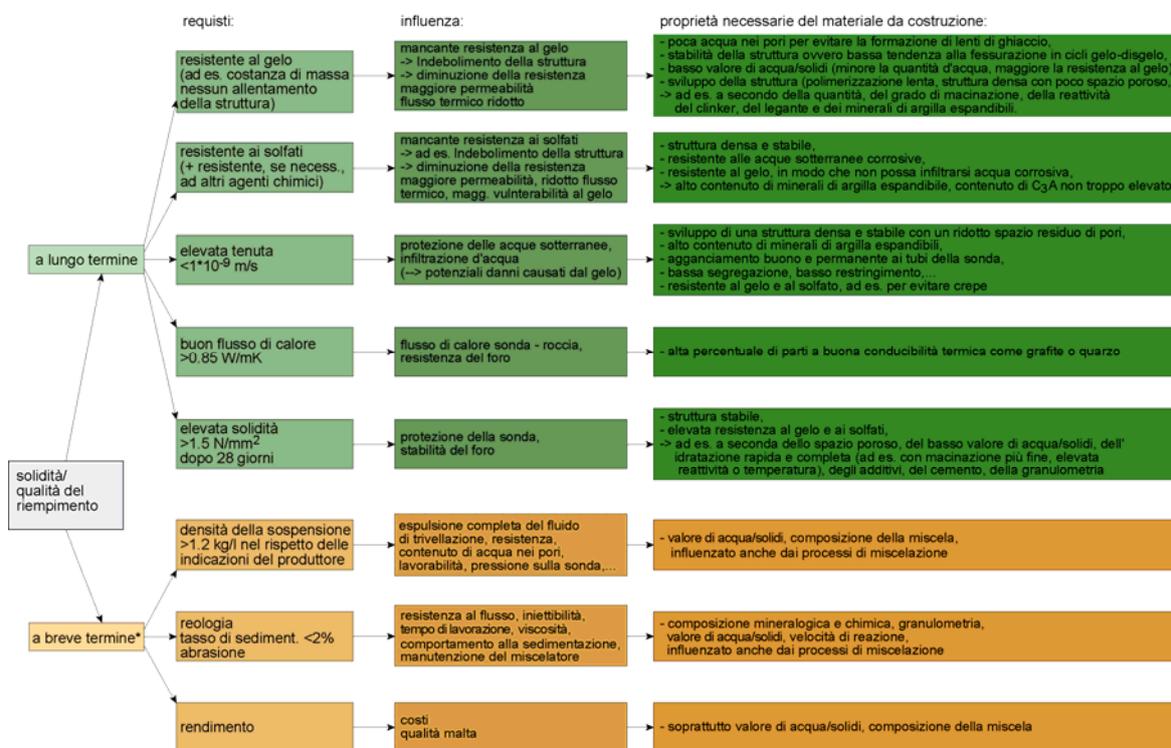
Misura di controllo	Impieghi avvenuti	Nessun uso / nessun controllo	Tipi di dispositivi
Impiego di strumenti di misurazione digitale per la prova di portata e pressione	14 aziende di perforazione li utilizzano, ma l'esperienza sul sito di perforazione e le risposte individuali mostrano che alcune aziende li utilizzano solo occasionalmente o quando richiesto.	5 volte	7 volte è citato il dispositivo DPG-C3 di Geowatt; altrimenti vengono menzionati autocostruzioni o viene misurata digitalmente, ma non in modo completamente automatizzato
Impiego di strumenti di misurazione digitali per il riempimento	6 aziende di perforazione utilizzano le attrezzature almeno quando richiesto; in media queste aziende prevedono la misurazione del riempimento per circa il 10% dei progetti.	13 volte	4 volte è stato citato il Geowatt HMG; in caso contrario, vengono utilizzati dispositivi propri
Come si controlla la densità della sospensione	11 volte viene menzionata la misurazione di un volume definito con una bilancia. L'esperienza maturata nei cantieri dimostra che la misurazione della densità effettiva è piuttosto rara. I dati rimanenti sono il conteggio dei sacchi o la stima della lunghezza del foro e del valore di acqua/solido.	3 volte non specificato né controllato	Bilancia e misurino

## 5 Caratteristiche e confronto dei materiali di riempimento utilizzati

Come mostra il capitolo 4, in Svizzera vengono utilizzati i seguenti materiali da costruzione per il riempimento, qui elencati in ordine decrescente: K-Injekttherm 110, BTD-Füller 350, miscele standard, K-Zeotherm, K Injekttherm 102, HDG Daemo HS, HDG Extro/Thermo HS e Flow & Fill. I due prodotti finiti K-Injekttherm 110 e BTD-Füller 350 rappresentano insieme il 58% dei materiali da costruzione utilizzati. Alcune società di perforazione hanno utilizzato entrambe queste due miscele.

### 5.1 Requisiti per i materiali di riempimento

Il capitolo 2 descrive i requisiti più importanti cui devono rispondere i materiali di riempimento per le sonde geotermiche. Questi, possono essere suddivisi in requisiti a breve e lungo termine. La miscelazione, il processo di riempimento, la stabilità iniziale o la segregazione corrispondono ai requisiti a breve termine. Mentre la durata e la stabilità a lungo termine del riempimento sono i requisiti fondamentali in termini di protezione delle acque sotterranee e per la funzionalità delle sonde geotermiche. Alcuni tra i requisiti come, ad es. la resistenza al gelo e ai solfati o l'aumento della conducibilità termica sono soddisfatti da cementi speciali. Nella tabella in Fig.14 sono riassunti i requisiti, i loro effetti e le proprietà del cemento necessarie affinché tali vengano raggiunti. Tutto ciò è descritto in dettaglio nel capitolo 2. La seguente tabella ha lo scopo di aiutare a confrontare i materiali da costruzione utilizzati.



\* Le pretese a breve termine influenzano in una certa misura anche le pretese a lungo termine. Ad es. una sospensione troppo acquosa può portare a numerose lenti d'acqua, che indeboliscono indirettamente la resistenza al gelo perché è presente più acqua, che può congelare e quindi destabilizzare la struttura. Oltre ai requisiti imposti al materiale di costruzione stesso, un'influenza importante è data anche dalla corretta miscelazione ed iniezione (vedere Capitolo 2).

Fig. 14 Requisiti a breve e lungo termine per il materiale di riempimento

È difficile stabilire le capacità di durata, nel breve o lungo periodo, di un materiale di riempimento, perché ogni caratteristica deve soddisfare un determinato compito. Può verificarsi che il materiale da costruzione sia in grado di soddisfare un'esigenza in maniera ottimale, ma incapace di

ottemperare i requisiti di un'altra. Ciò rende la valutazione soggettiva, e in questo senso, i requisiti a breve e lungo termine sono in conflitto tra di loro. Ad esempio, un valore di acqua/solido elevato corrisponde a facilità di lavorazione ed elevata resa. Al contrario, è stato dimostrato che questi materiali sono meno resistenti al gelo, producono un tasso di sedimentazione più elevato e hanno una resistenza inferiore.

Per un funzionamento ottimale a lungo termine e per un riempimento durevole, stabile e denso, sono utili minerali d'argilla rigonfianti (ad es. bentonite), un basso valore di acqua/solidi ed una formazione lenta e ottimale della microstruttura durante l'idratazione. Un buon flusso termico può essere facilmente ottenuto con l'utilizzo di additivi come la grafite, senza ridurre le altre proprietà.

## 5.2 Caratteristiche dei materiali di riempimento e requisiti di miscelazione

Di seguito sono riportate le proprietà e le caratteristiche a lungo termine più importanti dei materiali da costruzione più utilizzati per il riempimento. Per il confronto vengono forniti anche i valori delle campionature (cfr. capitolo 6). La valutazione complessiva è riportata nel capitolo 8.

Tabella 2 Caratteristiche e specifiche di miscelazione dei materiali da costruzione ,più comunemente utilizzati, per il riempimento

Malta:	K-Injekttherm 110	BTD-Füller 350	Miscela standard, da cantiere o propria	K-Zeotherm
Percentuale (Fig 13):	38%	20%	17%	6%
Totale malta utilizzata	81%			
Descrizione dei prodotti da parte del produttore	Alto rendimento, buona conducibilità termica, leggero → per sonde profonde, buona reologia, bassa tasso di sedimentazione	Molto vantaggioso, alta resistenza al solfato, ecocompatibile nel rispetto delle leggi idriche, volume stabile	Soddisfa i requisiti secondo le direttive dell'UFAM 2009	Malta speciale, ad alta conducibilità termica, resistente al solfato e al gelo, conveniente, leggero → per sonde profonde, buona reologia
Densità consigliata dal produttore	1.45 kg/l	1.22 kg/dm <sup>3</sup>	Circa 1.2 kg/dm <sup>3</sup> (secondo Herrmann 2008)	1.48 kg/l
Densità campionature (capitolo 6)	1.27-1.74 kg/dm <sup>3</sup> 8 campioni	1.06-1.26 kg/dm <sup>3</sup> 9 campioni	1.48 kg/dm <sup>3</sup> un campione	1.16-1.59 kg/dm <sup>3</sup> 4 campioni
Raccomandazioni per il valore di acqua/solido	0.8 (secondo il produttore)	2.48 (secondo il produttore)	3 (secondo la SIA 384/6 F.3)	0.8 (secondo il produttore)
Permeabilità	*	<1*10 <sup>-10</sup> m/s (secondo DIN 18130, dopo 28 giorni)	<6*10 <sup>-8</sup> m/s (secondo Herrmann 2008)	*
Resistenza dopo 7 / 28 giorni	0.7 / 1.5 N/mm <sup>2</sup>	1.1 / 2.0 N/mm <sup>2</sup>	- / 0.09 N/mm <sup>2</sup> (secondo Niederbrucker & Steinbacher 2007)	*
Conducibilità termica	0.9 W/mK (secco) 2.0 W/mK (umido)	0.8 W/mK	0.8 W/mK (umido, secondo ad es., Herrmann 2008)	>2 W/mK
Tasso di sedimentazione	-3.5%	Nessun dato	Dipende dalla preidratazione, fino al	*

			31% (secondo Niederbrucker & Steinbacher 2007)	
Resistenza al gelo	Nessuna raccomandazione del produttore	Nessuna raccomandazione del produttore	No (secondo Herrmann 2008, Niederbrucker & Steinbacher 2007)	Resistente al gelo secondo il produttore
Resistenza al gelo delle campionature (capitolo 6)	Degradazione dopo 2 cicli di gelo-disgelo	Fratture capillari dopo 2 cicli di gelo-disgelo	Non testato	Nessuna modifica della struttura
Resistenza al solfato	Nessuna raccomandazione del produttore	Elevata resistenza ai solfati secondo il produttore	No	Resistente ai solfati secondo il produttore
Reologia (tempo di percorrenza / viscosità)	*	Circa 60 s (secondo DIN V 4126-100) / $3.2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	Circa 30 s / 400 mPas (secondo Herrmann 2008)	*
Particolarità		Valore di acqua/solidi molto alto	varie miscele con, ad es, opalite, bentonite, cementi vari → Ampio campo di applicazione	Resistenza al gelo ed elevata conducibilità termica comprovate

(\* E' in corso un lunga fase di verifica. Le cifre non saranno disponibili prima di ottobre 2018. Per riferimenti vedi Fig.14 e capitolo 2)

### 5.3 Come la tipologia e la miscelazione dei materiali di riempimento influenzano qualità e longevità.

Come dimostrano diversi studi e la tabella n.1 (ad es. Herrmann 2008 e Niederbrucker & Steinbacher 2007), le caratteristiche dei vari materiali di riempimento variano notevolmente. In generale, le miscele standard, di cantiere o proprie, riportano risultati peggiori nella maggior parte delle caratteristiche (ad es. resistenza, massa di assestamento, resistenza al gelo, permeabilità). A seconda delle argille rigonfiabili utilizzate, delle composizioni mineralogiche e chimiche, dei processi di miscelazione e dei tempi di gonfiamento, alcune delle miscele autoprodotte raggiungono valori insufficienti. È dimostrato che il tipo di cemento, da solo, non è l'unico elemento decisivo nel garantire delle buone caratteristiche ed una buona qualità, ma anche una corretta miscelazione e l'iniezione della malta (es. omogeneità, valore di acqua/solido o densità indicata dal produttore, riempimento dal basso verso l'alto; vedi anche i capitoli 2 e 8).

Diverse caratteristiche sono determinanti per la stabilità a lungo termine e la funzionalità del riempimento (vedi anche i capitoli 2 e 8). Oltre alla resistenza al gelo e ai solfati, è necessario garantire la stabilità strutturale e la resistenza, che a loro volta dipendono, ad esempio, dal valore di acqua/solido, dal contenuto di minerali argillosi, dal legante e dal tempo di indurimento. Se il riempimento non è resistente e non soddisfa nemmeno i requisiti minimi, non può più garantire la tenuta, l'agganciamento, la resistenza ed il flusso di calore.

Molti studi dimostrano che la resistenza al gelo è una caratteristica importante. Ciò è dovuto all'aumento delle sonde sottoraffreddate e della densità delle sonde installate. Con valori acqua/solidi  $>0,4$ , l'acqua rimane nei pori anche dopo la completa idratazione (si vedano le raccomandazioni dei "Bund/ Länder-arbeitsgruppen" 2015). Maggiore è il contenuto d'acqua, minore è la resistenza al gelo del materiale di riempimento ed anche la solidità, la conduttività termica e l'impermeabilità (Herrmann 2008). Anche se il miglior materiale da costruzione soddisfa tutti i requisiti necessari, ma non è resistente al gelo, non può soddisfare i requisiti a lungo termine per un'integrazione della sonda nel sottosuolo che sia durevole, stagna e stabile. Il capitolo seguente ed i vari studi mostrano come alcuni materiali da costruzione per il riempimento presentino una forte destabilizzazione strutturale dopo pochi cicli di gelo-disgelo.

Va notato che bassi valori di acqua/solido sono, al contrario, piuttosto sfavorevoli per la fluidità e l'iniezione della sospensione, così come densità più elevate possono portare ad uno schiacciamento in caso di sonde profonde. Occorre quindi trovare un buon equilibrio tra la lavorazione, l'iniezione e la qualità a lungo termine del riempimento. Tuttavia, le statistiche mostrano che più volte vengono utilizzati materiali di riempimento di buona qualità e a lungo termine. Si tratta di malte speciali, come ad esempio il più utilizzato Zeotherm.

## 5.4 Miglioramento dei materiali da costruzione per il riempimento

Come illustrato nel capitolo 4, vengono generalmente utilizzate solo malte speciali Kùchler (Zeotherm 1.0 e 2.0) ed HDG (Extro, Thermo, Daemo HS). Questi presentano una maggiore conducibilità termica, resistenza al gelo e ai solfati. Insieme, essi costituiscono circa il 10% dei materiali da riempimento utilizzati.

Il fatto che siano di qualità superiore è indiscutibile. Tuttavia, si pone la questione del rapporto costi-benefici e se i prodotti soddisfino effettivamente le raccomandazioni.

Per quanto riguarda le **descrizioni dei produttori**, è determinante il modo in cui il materiale da costruzione è stato testato (ad es. in un ambiente secco/aperto o umido/chiuso e con quale valore di acqua/solido della miscela) e come poi venga utilizzato concretamente. Le specifiche del produttore si basano spesso su test effettuati nei propri laboratori e basati su procedure diverse o sconosciute. Le controanalisi con metodi di prova diversi dei singoli produttori danno spesso risultati diversi. Per alcuni parametri non ci sono rapporti dei test o non sono stati testati affatto (vedi tabella n.2). La comparabilità è difficile e bisogna credere alle descrizioni. Come mostra il capitolo 6, variando i rapporti di miscelazione variano anche i valori di densità. Di conseguenza, le caratteristiche specifiche soddisfano in maniere diverse le loro funzioni. Come è già stato detto più volte, anche il miglior materiale da costruzione non è in grado di soddisfare i requisiti in caso di miscelazione ed iniezione inadeguate. Ma il grado d'incidenza e l'effettiva capacità dei materiali di adempiere concretamente ed in modo permanente alle proprie funzioni, dovrebbe essere verificata e misurata sistematicamente. Ciò dovrebbe essere fatto in modo indipendente con l'utilizzo di metodi di prova adeguati e differenti. Tuttavia, come dimostrano le singole misurazioni comparative (vedere i riferimenti nel capitolo 2), in condizioni di umidità le conduttività termiche indicate vengono generalmente raggiunte. Il miglioramento della conducibilità termica viene spesso ottenuto insieme all'aumento della resistenza al gelo ed ai solfati. Come dimostrano gli studi (vedi capitolo 2) e le nostre ricerche semplificate nel capitolo 6, questi materiali da costruzione migliorati mantengono in gran parte la resistenza al gelo indicata.

Per la **comparazione dei costi-benefici** sono state effettuate delle simulazioni con il software EWS della Huber Energietechnik AG. È stata variata la conducibilità termica del riempimento per calcolare così la nuova metratura necessaria per la perforazione. Le simulazioni sono state fatte pensando ad una tipica casa unifamiliare con un'unica sonda geotermica, e ad campo di 4 sonde. Inoltre, è stata variata la conducibilità termica del sottosuolo (substrato standard con 2,2 W/mK ed un substrato con una conducibilità termica superiore di 2,8 W/mK, ad es. in calcari, arenarie molassiche ricche di quarzo o in caso di un flusso d'acqua sotterranea). Come si vede, nel caso di un riempimento termicamente migliorato, con una minore resistenza del pozzo è possibile risparmiare metri di perforazione. Con un prezzo aggiuntivo medio per metro di perforazione compreso tra: circa 2,5 CHF (dati forniti dal produttore) e 4,5 CHF (costi aggiuntivi a carico dell'impresa di perforazione), con un riempimento migliore, i costi aggiuntivi dati dalla malta più costosa sono compensati quasi totalmente dai metri di perforazione risparmiati. Maggiore è la conducibilità termica del sottosuolo, minori sono i costi aggiuntivi dati dalla malta termicamente migliorata, in quanto successivamente sono necessari meno metri di perforazione. Considerando che la maggior parte dei materiali di riempimento termicamente migliorati utilizzati presentano anche qualità più elevate, come ad esempio resistenza al gelo, impermeabilità o stabilità strutturale a lungo termine, a parità di costi si ottiene un significativo valore aggiunto.

Tab. 3 Influenza della conducibilità termica del riempimento sui metri di perforazione della sonda comparati ai costi aggiuntivi

	Tipica nuova costruzione unifamiliare		4 sonde in serie, distanza sonda 7 m	
	Riempimento normale	Riempimento <b>migliorato</b>	Riempimento normale	Riempimento <b>migliorato</b>
energia di riscaldamento senza WW	12'000 kWh	12'000 kWh	48'000 kWh	48'000 kWh
energia di riscaldamento WW	4'000 kWh	4'000 kWh	16'000 kWh	16'000 kWh
Freecooling	-	-	2'400 kWh	2'400 kWh
COP B0/W35	4.5	4.5	4.5	4.5
COP B0 / W55	2.8	2.8	2.8	2.8
potenza termica WP	8 kW	8 kW	32 kW	32 kW
Conducibilità termica del substrato standard (maggiore conducibilità termica del substrato)	2.2 (2.8) W/mK	2.2 (2.8) W/mK	2.2 (2.8) W/mK	2.2 (2.8) W/mK
profilo di temperatura standard	3°C/100 m	3°C/100 m	3°C/100 m	3°C/100 m
Aspettativa di operatività	50 anni, temperatura di fruizione e di ritorno media - 1.5°C	50 anni, temperatura di fruizione e di ritorno media - 1.5°C	50 anni, temperatura di fruizione e di ritorno media - 1.5°C	50 anni, temperatura di fruizione e di ritorno media - 1.5°C
<b>Conducibilità termica del riempimento</b>	<b>0.8 W/mK</b>	<b>2.0 W/mK</b>	<b>0.8 W/mK</b>	<b>2.0 W/mK</b>
<b>Lunghezza di perforazione secondo simulazione incl. sicurezza del 10%.</b>	<b>169 m (147 m)</b>	<b>156 m (134 m)</b>	<b>4*197 m (171 m)</b>	<b>4*184 m (156 m)</b>
<b>Costi aggiuntivi</b> per metri in più di perforazione + 45 CHF / dovuti alla scarsa conduttività termica  o per un riempimento migliorato + 4,5 CHF / per l'utilizzo di malta più costosa	(169m-156m) * 45,- = <b>585 CHF</b>  (13m * 45,- = 585,-)	156m * 4.5,- = <b>624,-</b> (134m*4.5,- = 603,-)	(4*(197m-184m)) * 45,- = <b>2'340 CHF</b>  (60m*45,- = 2'700,-)	736m*4.5,- = <b>2'944,-</b> (624m*4.5,- =2'808,-)
Commenti	Rispetto al riempimento termicamente migliorato, sono necessari più metri di perforazione (13 m). → Costi di	I costi aggiuntivi per un riempimento migliorato (603,-) corrispondono all'incirca ai metri di perforazione risparmiati (585,-)	A causa dell'influenza termica reciproca, sono necessari più metri di perforazione rispetto all' EFH (197 invece di 169 m per sonda).	Considerando i metri di perforazione risparmiati nei substrati con maggiore conducibilità termica, i costi aggiuntivi dovuti al

	perforazione corrispondente mente maggiori di 585,-			miglioramento del riempimento sono inferiori rispetto a quelli normali (108 CHF invece di 604 CHF).
--	---	--	--	---

*I materiali di riempimento con una maggiore conducibilità termica (ad es. Zeotherm 2.0) hanno generalmente anche qualità superiori per quanto riguarda la resistenza al gelo o la stabilità strutturale a lungo termine. Grazie alla maggiore conducibilità termica che consente di risparmiare sui metri di perforazione, si ottiene un riempimento di qualità superiore e più durevole abbattendo i costi aggiuntivi.*

## 6 Analisi dei materiali di riempimento iniettati

### 6.1 Procedura

Grazie alla collaborazione coi capi trivellatori dei cantieri è stato possibile prelevare 42 campioni di sospensione durante il processo di riempimento. Sono stati prelevati 35 campioni dal miscelatore (per lo più tramite il tubo di iniezione, raramente direttamente dal miscelatore) e 7 campioni dalla sospensione che è fuoriuscita dalla trivellazione non appena il livello di cemento ha raggiunto la superficie. L'obiettivo era quello di raccogliere il maggior numero possibile di campioni da tutti i materiali di riempimento e da diverse aziende di perforazione. L'aver presenziato al processo di riempimento ha inoltre permesso di analizzare la procedura.

I campioni sono stati paragonati per densità, omogeneità, tasso di sedimentazione, sviluppo della resistenza ed in parte per la resistenza al gelo. A tal fine le sospensioni sono state prelevate con contenitori da 1 o 1,5 litri, che, salvo qualche eccezione, sono stati riempiti totalmente. Per simulare le stesse condizioni all'interno del foro / roccia i contenitori sono stati tenuti chiusi. Le analisi rappresentano dei primi semplici confronti e non sostituiscono le analisi di laboratorio. Esse devono intendersi soltanto come una panoramica generale ed in particolare mostrano in che modo vengono miscelati i materiali di riempimento sul sito di trivellazione. Di particolare interesse era verificare se le sospensioni avessero la densità raccomandata dai produttori. Non si tratta di determinare l'effettiva qualità dei prodotti di malta, ciò andrebbe verificato con delle analisi in laboratorio standardizzate. La verifica della resistenza al gelo è stata un primo semplice esame comparativo di come la microstruttura si sviluppa sotto lo stress del gelo (fessurazioni, variazioni di volume e di massa). La densità è stata determinata con una bilancia. L'omogeneità, il tasso di sedimentazione e lo sviluppo della struttura durante le prove di gelo-disgelo sono stati determinati mediante controllo ottico. La resistenza è stata controllata a mano per determinare se le sospensioni si induriscono a sufficienza e in che lasso di tempo lo fanno.

### 6.2 Densità delle sospensioni campionate

#### Densità della sospensione

Nella figura n.15 sono illustrate le misurazioni delle diverse densità delle sospensioni, ed è indicata anche la densità raccomandata dal produttore. Sono stati riscontrati 8 diversi tipi di malta. Il numero di miscele diverse per tipo di malta varia da 1 a 11. Le sospensioni campionate possono essere ricondotte a 10 diverse aziende di perforazione ed a 17 capi trivellatori.

Le densità dei fanghi per tipo di cemento presentano una differenza fino a 0,4 kg/l rispetto al valore di riferimento specificato dal produttore. In media lo scostamento è di circa 0,17 kg/l, mentre per il BTDFüller 350 ha un valore minimo di 0,07 kg/l. A parte il BTDF, la miscelazione tende ad essere troppo spessa, il che migliora la qualità del riempimento (ad es. resistenza, impermeabilità, resistenza al gelo) rispetto alle miscele "acquose". Inoltre, ciò dimostra che, a quanto pare, non si risparmia materiale per abbassare i costi del progetto. Con densità elevate, in caso di sonde profonde, è necessario fare attenzione che queste ultime non vengano schiacciate. Ciononostante, la miscela deve essere generalmente mescolata secondo le raccomandazioni del produttore.

Sono stati analizzati campioni prelevati da miscelatori continui, colloidali ed uno da una vasca d'agitazione. Tuttavia, non vi è una chiara correlazione tra le densità delle sospensioni ed i miscelatori. Si riscontra però che la densità risultante dall'uso dei miscelatori colloidali sia più vicina ai valori raccomandati e che vari in misura minore. Mentre l'utilizzo di diversi tipi di malta è rappresentativo di come la densità dipenda dal variare di quest'ultima e non dall'operato delle diverse squadre di perforazione.

6 campionature hanno mostrato una densità di sospensione inferiore a 1,2 kg/l, ossia al di sotto del valore indicativo dell'APP. Questi materiali di riempimento sono probabilmente di qualità inferiore, in particolare il materiale da costruzione BTDFüller 350, che ha già un elevato valore di acqua / solido e che conseguentemente raggiunge ancora più rapidamente densità troppo basse se il rapporto di miscelazione non è impostato con precisione.

Si noti che l'omogeneità dei riempimenti varia, soprattutto con i mescolatori continui. In alcuni casi è stato possibile riscontrare una struttura grumosa, o le miscele erano già rilevabili otticamente con spessori o acuosità diverse. Ciò può essere in parte attribuito al fatto che la massa lorda non è stata aggiunta costantemente, l'approvvigionamento idrico è stato ripetutamente ripristinato, oppure che, sempre l'approvvigionamento idrico, non è stato costante. Probabilmente sarebbe opportuno analizzare durante l'intero processo di riempimento la densità, così da determinarne le variazioni.

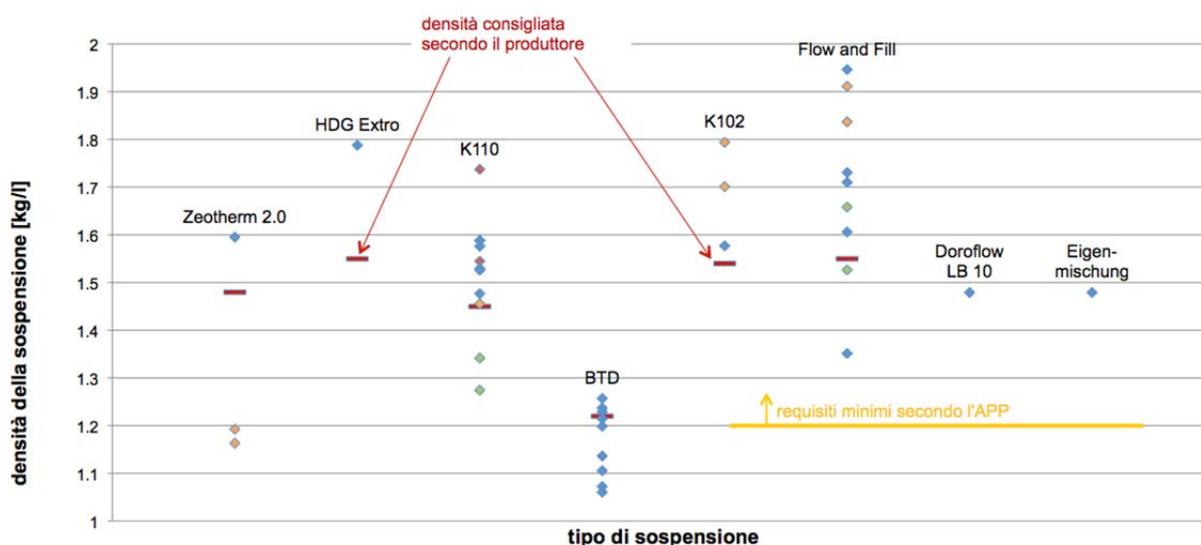


Fig. 15 Densità di sospensione determinata dal tipo di malta.

La densità consigliata dal produttore viene rappresentata in rosso. I campioni di flusso e deflusso della rispettiva iniezione vengono visualizzati con lo stesso colore (arancione o verde). I requisiti minimi sono compresi tra 1,1 e 1,3 kg/l (cfr. capitolo 2.2).

### Confronto della densità della sospensione al flusso di mandata e di ritorno

Come mostra la Fig.16, ci si può aspettare che ci siano differenze di densità della sospensione prima che entri e dopo che esca dal foro. Durante i 7 processi di iniezione sono stati prelevati campioni dal tubo di mandata / di iniezione e dalla sospensione che usciva dal foro. Cinque dei sette campioni provenienti dalla fuoriuscita della sospensione dal pozzo hanno una densità inferiore rispetto al campione corrispondente al flusso di mandata. Inoltre, non vi è alcuna correlazione con infiltrazioni d'acqua nel foro. Per 2 campioni la densità è maggiore nel flusso di ritorno. Ciò può essere dovuto alla diversa omogeneità delle sospensioni durante il processo di miscelazione, come già indicato in precedenza. Queste malte sono state preparate con un mescolatore continuo. Le densità più basse nei campioni del flusso di ritorno possono essere spiegate col fatto che la sospensione, durante la salita, viene diluita con l'acqua presente nel foro.

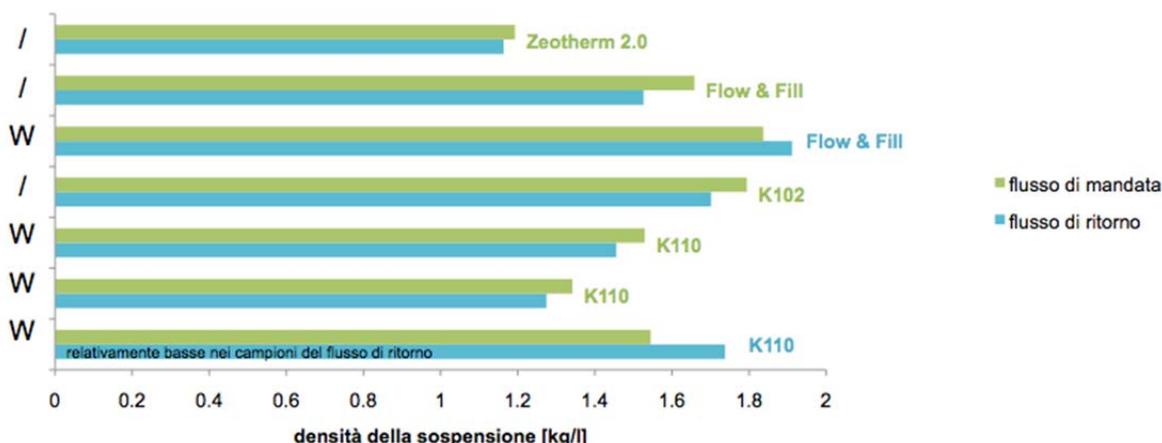


Fig. 16 Confronto fra le densità delle sospensioni nei campionamenti del flusso di mandata e di ritorno.

Le infiltrazioni d'acqua nel foro sono contrassegnate a sinistra con "W"

### Densità della sospensione vs. lunghezza della sonda

Durante la misurazione della deflessione e/o della temperatura nei tubi della sonda, si è osservata più volte una leggera schiacciatura dei tubi della sonda (ciò accade alle sonde più profonde), perché gli strumenti di misurazione rimangono bloccati nella curva dovuta alla deflessione. È evidente che il problema si pone durante il riempimento, nel caso di riempimenti troppo pesanti, o di sonde non correttamente chiuse a tenuta stagna, oppure se la testa viene aperta troppo presto. Secondo la norma SIA 384/6, per evitare sovrappressioni, la densità della sospensione deve essere adattata alla lunghezza della sonda o deve essere eseguita una cementazione a gradini.

È raro che la pressione interna del tubo della sonda non venga monitorata con un manometro durante l'intero processo di riempimento. In generale, la tubazione di protezione viene estratta subito dopo il riempimento, ed il tappo a tenuta di pressione della sonda viene spesso aperto o rimosso completamente. Si osserva spesso che in seguito la sonda non viene più sottoposta a pressione. Tuttavia, sempre più capi trivellatori utilizzano attacchi rapidi che consentono di estrarre le tubazioni di protezione senza dover aprire i tubi della sonda.

L'effettiva concretizzazione dei dati è mostrata con l'aiuto della Fig.17. Il grafico mostra che non esiste una chiara correlazione tra la profondità della sonda e la densità del riempimento, per cui quest'ultima non viene adattata alla profondità della sonda. Solo con il K110 si ha la tendenza ad utilizzare una densità di sospensione inferiore con l'aumentare della lunghezza della sonda. Inoltre, i valori mostrano come tutti i riempimenti effettuati non superano la densità massima consentita, a partire dalla quale l'installazione non è più consentita. Secondo alcuni capi trivellatori il materiale di riempimento viene però mescolato sempre con lo stesso rapporto di acqua/solidi. Nonostante alcuni svantaggi del BTM, la bassa densità di questa malta è vantaggiosa per la stabilizzazione della sonda.

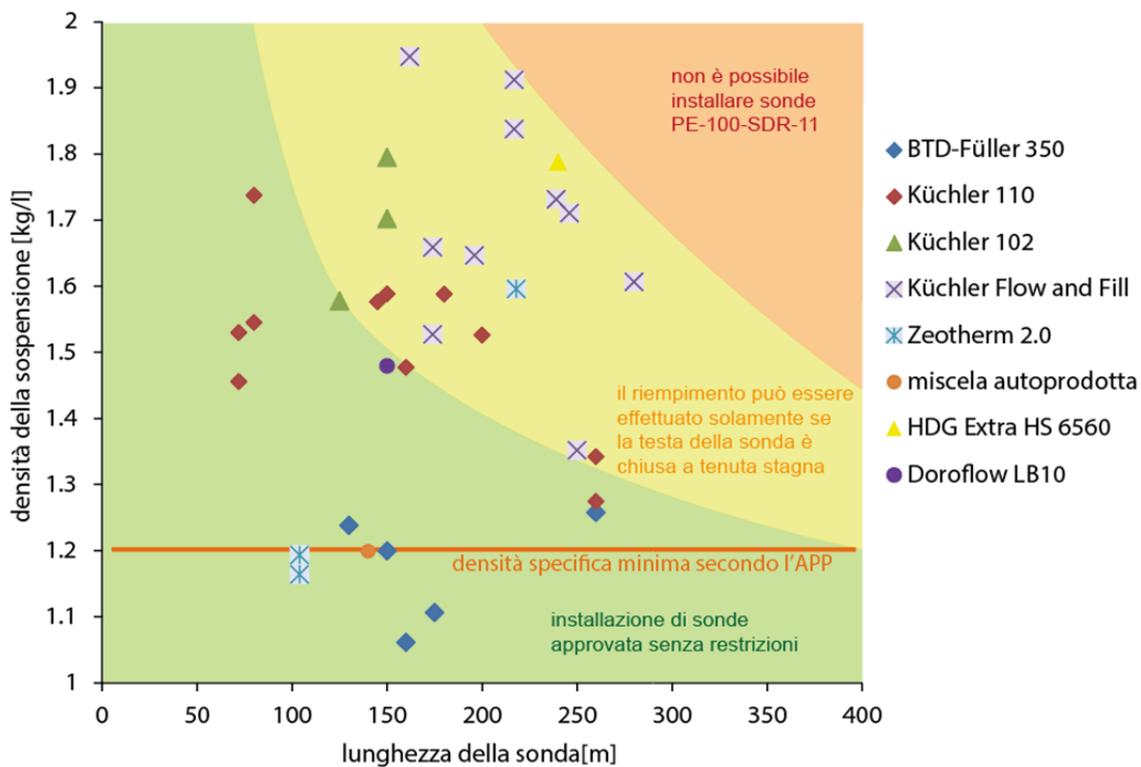


Fig. 17 Densità della sospensione in funzione della lunghezza della sonda

Nei fondi colorati vengono applicati i limiti secondo la norma SIA 384/6, secondo i quali, a seconda della densità della sospensione, la testa della sonda può essere: aperta; chiusa a pressione; oppure il riempimento deve essere eseguito tramite cementazione a gradini in modo tale che i tubi della sonda non vengano schiacciati.

### 6.3 Resistenza al gelo dei materiali di riempimento

In diversi studi e rapporti (vedi riferimenti e capitolo 2), la resistenza al gelo è considerata un parametro molto importante per la qualità a lungo termine del riempimento. Per tale motivo, questa è stata testata solo su alcuni campioni selezionati del sito di perforazione. Sono stati scelti i tipi di malta più utilizzati, sia le malte economiche che le malte di alta qualità, Kùchler 110, BTD-Füller 350, Zeotherm 2.0 e Flow and Fill.

Come descritto nel capitolo 6.1, è stata effettuata solo una semplice verifica (proposte per verifiche più approfondite si trovano, ad esempio, in Anbergen 2015). Dai campioni in bottiglia sono state ricavate fette di circa 7 cm di larghezza con un diametro di 10 cm. Il bordo della bottiglia è stato lasciato sul campione. Per simulare le condizioni reali, i campioni sono stati imballati ermeticamente ed esposti a 5 cicli di gelo-disgelo. Dopo il 5° scongelamento, i campioni sono stati immersi per due volte e poi sottoposti ad altri due cicli di gelo-disgelo. Tutti i campioni sono stati esposti esattamente alle stesse condizioni, e nessuno di questi presentava fessure prima del primo congelamento.

Dopo la seconda fase di congelamento, sono stati osservati i primi effetti significativi nei campioni del Flow and Fill e del BTD. Si sono formate numerose fessure con spaziature fino a 0,2 mm nel Flow and Fille e numerose fratture capillari nel BTD. Nel K110 si può notare un'alterazione sotto forma di distacchi simile alla ghiaia. Durante gli ulteriori cicli di congelamento e scongelamento, la struttura non presenta variazioni significative. Il campione di Zeotherm non mostra alcuna modifica strutturale anche dopo diversi cicli di gelo-disgelo.

Se i campioni vengono sottoposti ad un bagno d'acqua tra i cicli di gelo-disgelo, si verifica un ulteriore forte indebolimento della struttura. Nel campione di K110, al primo bagno d'acqua dopo il quinto ciclo di gelo e disgelo, è stata osservata una forte perdita di massa, allo stesso modo il campione di BTD presenta il solito problema ma in forma decisamente più una leggera. Dopo altri 2 cicli di

congelamento e scongelamento, le fessure nel Fill and Flow si sono allargate fino a 1,3 mm. Nel BTD si sono formate numerose fessure fino a 0,6 mm di larghezza.

Dopo un altro bagno d'acqua e un ciclo di gelo e disgelo, in particolare il BTD si presenta gravemente danneggiato. Le fessure, larghe fino a 0,6 mm, attraversano l'intero campione. Anche il campione del Flow and Fill mostra un ulteriore aumento delle fratture capillari. Il K110 mostra solo sporadicamente alcune fratture capillari. Per i campioni di BTD di Küchler 100 si determina un'ulteriore perdita di massa. Dopo altri 2 cicli di congelamento e scongelamento, peggiora notevolmente la qualità del BTD. Zeotherm 2.0, invece, non presenta ancora crepe o perdite di massa.

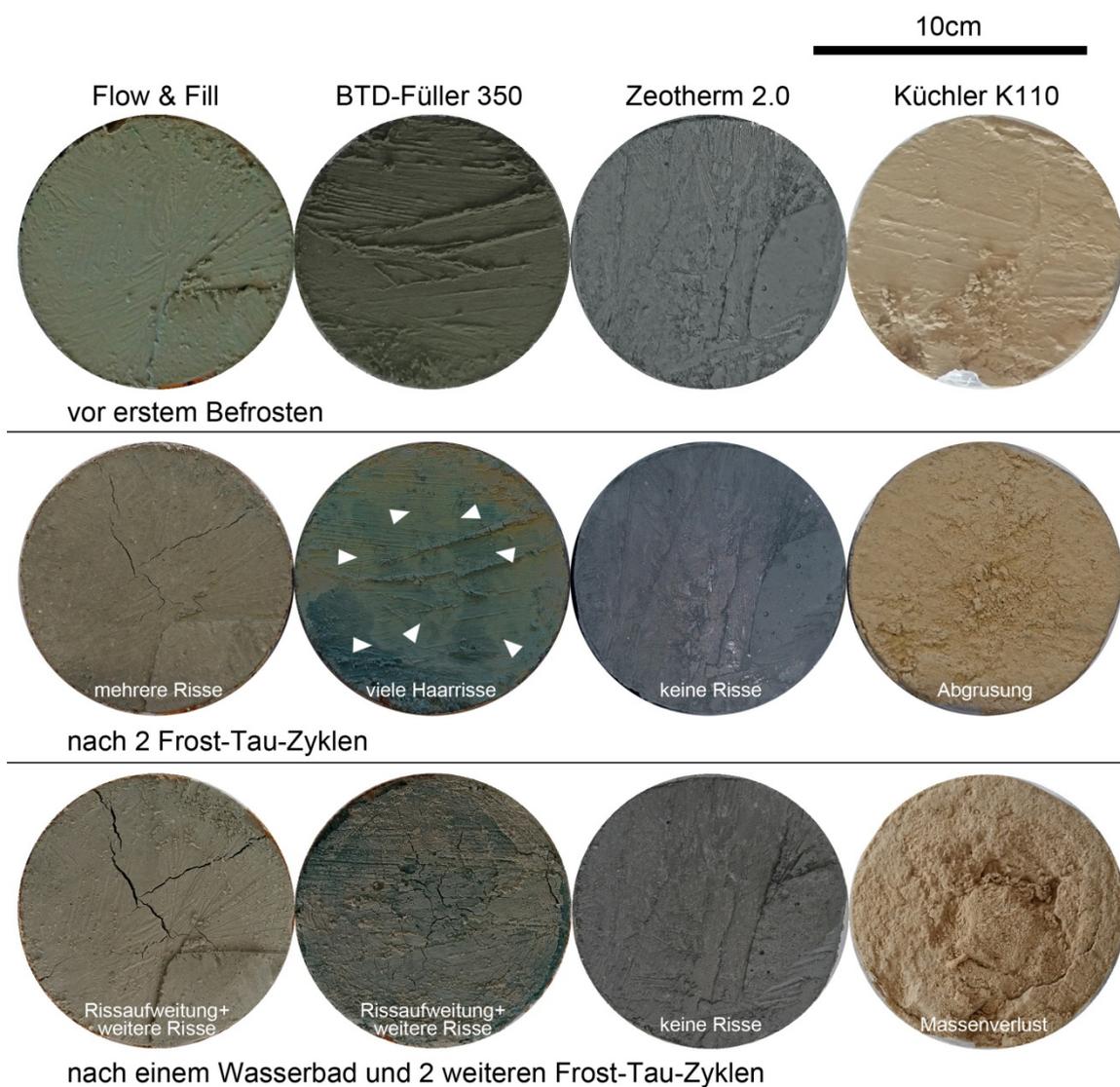


Fig. 18      Modifiche della struttura dopo pochi cicli di gelo-disgelo

Ogni colonna rappresenta lo stesso tipo di campione o di malta. La prima fila mostra i campioni completamente induriti, appena tagliati, prima dell'inizio del test. Gli stessi campioni nella fila centrale mostrano le prime crepe o fessure dopo 2 congelamenti, ad eccezione di Zeotherm. Dopo 5 cicli di gelo-disgelo, un successivo bagno d'acqua e altri 2 cicli di gelo-disgelo, tutti tranne lo Zeotherm mostrano un ulteriore significativo indebolimento della struttura con conseguente perdite di massa.

## Conclusione:

Come specificato dai produttori, solo il Zeotherm 2.0 di Küchler è resistente al gelo. Tutti gli altri mostrano, subito dopo uno o due cicli di gelo-disgelo, crepe, fratture capillari o sintomi di degradazione. Ciò non è particolarmente problematico se le sonde sono progettate correttamente e se non si verificano fenomeni di gelo significativi. Tuttavia sembra che le sonde non siano sempre dimensionate correttamente o che non vengano prese in considerazione le sonde circostanti, o le nuove pompe di calore con COP migliore. Di conseguenza, nelle immediate vicinanze delle sonde si verifica un sottoraffreddamento più rapido o più intenso. Questo comportamento è dimostrato anche dalle valutazioni di Kriesi (2017), oltre che dall'aumento dei casi di danni dovuti ai congelamenti.

Se il riempimento si congela si verificano fessurazioni e destabilizzazioni strutturali nella maggior parte dei materiali utilizzati. Di conseguenza, non sono più assicurate la tenuta, la forza, il flusso di calore e l'agganciamento alla roccia.

## 6.4 Ulteriori caratteristiche dei materiali da costruzione campionati

Passate 24 ore, su 8 campioni di cemento omogenei e non disgregati, 3 erano ancora decisamente morbidi anche se sotto pressione. I campioni rimasti morbidi sono due di K110 e uno di BTD. Tre campioni fortemente sgregati, risultavano ancora morbidi nella parte alta della sospensione a contatto con l'acqua, tutto ciò anche dopo diversi mesi. Non è stata eseguita nessuna prova per determinare l'esatta resistenza alla pressione.

3 campioni su 42, in sospensione presentavano un ampio tasso di sedimentazione o segregazione. Il contenuto d'acqua demiscelata era del 15, 20 fino al 35% (2xFlow&Fill, 1x K110, Fig.19). I campioni separati sono stati miscelati con un mescolatore continuo. 2 provengono dalla stessa azienda di perforazione, ma da diversi capi trivellatori. Altrimenti, i campioni hanno mostrato un assestamento nullo o trascurabile (per tipi di malta vedi Fig.15). Anche i campioni di BTD con il più alto valore di acqua/solidi raccomandato non hanno mostrato segregazione.



Fig. 19 Diversa ti di decantazione dei riempimenti campionati

A sinistra 2 campioni di sospensione isolata, a destra campioni omogenei e non isolati.

Durante il rilevamento è stato notato che, a volte, le sospensioni immesse nel foro dai mescolatori continui erano grumose. Alcune volte si è dovuto interrompere il riempimento perché il mescolatore continuo risultava ostruito, o perché il tubo di iniezione era scoppiato. Inoltre alcuni cantieri non avevano fin dall'inizio abbastanza materiali per il riempimento. Per di più, l'approvvigionamento idrico non è stato sempre costante, di conseguenza alcune sospensioni

iniettate risultavano temporaneamente disomogenee. Solo in alcuni casi isolati non è stato utilizzato il manometro per il monitoraggio della pressione nella sonda. In linea di massima, tuttavia, il processo di riempimento ha funzionato bene e le sospensioni sono state omogenee e facili da lavorare. In generale, il riempimento è stato effettuato dal basso verso l'alto, e solo in rari casi la sospensione è stata iniettata dall'alto.

## 7 Forme di controllo

Le diverse forme di controllo del riempimento sono già state descritte e discusse in dettaglio in diversi rapporti. Le relazioni più importanti sono state stilate da: Hess et al. (2015) (Garanzia della qualità delle sonde geotermiche, panoramica dei metodi di misurazione per la verifica del riempimento), e le raccomandazioni dei "Bund/Länderarbeitsgruppen" 2015.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di descrivere i metodi di controllo in maniera tale da agevolare la buona riuscita del riempimento e che questa sia verificabile. Non si tratta di individuare degli spazi vuoti nel riempimento, perché per fare ciò si utilizzano, ad esempio, **misurazioni termiche, radiometriche o magnetiche**. Queste ultime sono descritte in dettaglio in SvizzeraEnergia 2015. Tuttavia, tutte le misurazioni sono interpretative e solo grazie all'aiuto dell'esperienza è possibile trarre conclusioni sufficienti. Alcuni esempi: i profili di temperatura misurati possono mostrare, ad esempio, un flusso d'acqua sotterranea o un calore di idratazione tramite i quali è possibile determinare la presenza di un riempimento completo. Un TRT (thermal response test) aumenta la quantità di informazioni relative ai profili di temperatura. In alternativa, la sonda geotermica può essere ispezionata con una sorgente radioattiva, cosicché le anomalie di densità del riempimento possono essere rilevate con l'aiuto della retrodiffusione (*backscatter*). Metodo che però in Svizzera non viene offerto, se non nelle zone di frontiera, perché non è visto di buon occhio. Se il materiale di riempimento è trattato con additivi ferromagnetici, è possibile misurare la suscettibilità magnetica, e conseguentemente la qualità del riempimento, sia durante il processo stesso che successivamente nella sonda geotermica. Anche in questo caso non ci sono fornitori svizzeri e il margine di interpretazione è ampio, soprattutto se il sottosuolo naturale contiene già componenti ferromagnetiche.

La maniera più semplice è quella di controllare il **materiale utilizzato**. I prodotti Kùchler richiedono generalmente circa una tonnellata di materia prima ogni 100 metri di perforazione. Con il BTD Filler 350, vengono utilizzati circa 360 kg per 100 metri di foratura (Fig.12). In questo modo è facile verificare se ci sono abbastanza sacchi di materiale pronto prima dell'inizio del riempimento, e quanti ne sono stati utilizzati dopo. Questo tipo di controllo può essere effettuato, ad esempio, dal geologo, dal committente o dall'architetto. Inoltre è possibile controllare l'omogeneità della sospensione e la procedura utilizzata dalla persona responsabile della miscelazione, ad esempio se il materiale viene versato continuamente nel miscelatore continuo.

La maniera più facile di controllare e stabilire una corretta miscelazione è quella di determinare la **densità della sospensione miscelata**. La densità può essere facilmente determinata con l'uso di una **bilancia** e di un recipiente coi quali si può prestabilire il valore di acqua/solidi corretto. Questo processo è particolarmente importante con i mescolatori continui, perché se la miscelazione avviene in una vasca o in un miscelatore colloidale, la quantità di acqua dolce e di malta può essere dosata più facilmente e non vi è dipendenza dall'impianto di approvvigionamento idrico del cantiere che spesso presenta delle mancanze. In caso di mescolatori colloidali o di vasche d'agitazione, fare attenzione che venga utilizzata solo acqua pulita (non acqua proveniente dal foro!) e che venga miscelata per un tempo sufficientemente lungo. In effetti, la densità deve essere sempre verificata preferibilmente all'inizio e alla fine del processo di riempimento. Anche i produttori di malte lo raccomandano. Il geologo, il committente o l'architetto dovrebbero verificare se è presente una bilancia adeguata e verificare anche i dati registrati. Secondo l'indagine nel capitolo 4, molte aziende di perforazione dichiarano di utilizzare una bilancia, anche se i fatti dimostrano che questa viene utilizzata sporadicamente ed il dosaggio viene fatto ad occhio. A conferma di ciò si osservino i diversi valori di densità raccolti e riportati nel capitolo 6. Per le betoniere colloidali il problema è minimo, in quanto solitamente vengono aggiunti e miscelati la stessa quantità d'acqua ed il medesimo numero di sacchi di malta secondo le specifiche del produttore ( per esempio per il BTD-Füller 350, 2 sacchi e 110 litri d'acqua). In alternativa, la misurazione della densità può essere effettuata anche con l'uso degli **aerometri** che forniscono rapidamente un risultato preciso, risultando però meno robusti.

Se il processo di riempimento deve essere misurato in modo molto preciso, è possibile fare delle misurazioni di riempimento digitali. Sul mercato svizzero sono disponibili diverse attrezzature messe in commercio da uffici geologici, dai produttori di malte o dagli uffici metrologici. A seconda del tipo di strumento si possono misurare contemporaneamente diversi parametri, come: la quantità di iniezione risolta nel tempo, la pressione di iniezione, la portata volumetrica e la densità della sospensione. In questo modo è possibile verificare, escludendo interruzioni e falsificazioni, la corretta densità di sospensione e la quantità di riempimento durante l'intero processo, nonché impostare il corretto valore di acqua/solidi. In questo modo è possibile rilevare e localizzare anche

le perdite nelle cavità. Queste misurazioni sono spesso richieste nei grandi campi di sonde geotermiche. A seconda dell'esperienza, le misurazioni possono essere eseguite dal personale di perforazione stesso o da esperti esterni. In Svizzera pochi impianti di perforazione dispongono di tali attrezzature integrate direttamente sulle macchine che sia quindi in grado di registrare il riempimento. Per i progetti di piccole dimensioni, queste misurazioni sono relativamente costose e i metodi di prova sopra citati sono altrettanto sufficienti, soprattutto perché di solito viene effettuato un monitoraggio più intensivo da parte del committente.

In generale, si può affermare che al riempimento non viene dato molto peso. Questo forse è dovuto alla mancanza di consapevolezza su quali siano le possibili conseguenze, ed essendo il riempimento per lo più non visibile, bisogna fidarsi dei responsabili del processo. Di conseguenza il riempimento viene controllato in maniera insufficiente. A dimostrazione di ciò riportiamo la risposta di un produttore (spesso anche loro ignari delle conseguenze) che afferma che la resistenza al gelo dei materiali non è rilevante perché il riempimento è sempre al di sotto del limite di congelamento (un metro al di sotto della superficie!). Nei colloqui con i capi trivellatori sembra che molti siano all'oscuro delle conseguenze di un riempimento incompleto o di una miscelazione non corretta. Molti progettisti e geologi, e ancor più i committenti, sono inconsapevoli dell'importanza della tipologia di cemento, della corretta miscelazione della sospensione o di riempimento privo di vuoti.

## 8 Conclusioni e raccomandazioni

### 8.1 Requisiti generali per il riempimento

Il capitolo 2 elenca i requisiti più importanti, inclusi i valori limite per il materiale di riempimento. Tra questi troviamo la densità, il valore di acqua/solidi, la resistenza alla pressione, la permeabilità, la stabilità strutturale (ad es. sotto l'influenza del gelo o di acqua corrosiva), la reologia e la conduttività termica. Raggiunti questi requisiti, il riempimento può garantire le funzioni più importanti, come l'agganciamento permanente al suolo, il flusso di calore, la protezione dei tubi della sonda e la protezione delle acque sotterranee. Con l'aiuto di questi requisiti, è possibile valutare la qualità di un materiale di riempimento.

### 8.2 Requisiti e raccomandazioni cantonali

Il capitolo 3 illustra i requisiti cantonali per i materiali di riempimento. In genere i cantoni fanno riferimento alle indicazioni della guida all'implementazione dell'UFAM 2009, anche citate nella norma ISA 384/6 o nell'APP. Non vengono menzionati requisiti ancor più dettagliati di questi. Tuttavia, l'estratto citato più frequentemente, secondo cui lo spazio anulare deve essere riempito con una sospensione adeguata dal basso verso l'alto senza lasciare spazi vuoti, in modo da garantire un'integrazione della sonda nel substrato che sia stagna, permanente, e stabile sia fisicamente che chimicamente, è sufficientemente utilizzato. Il committente è quindi libero di decidere quali prodotti utilizzare per soddisfare queste specifiche di permanente idoneità.

Solo nei cantoni in cui è possibile perforare strati di gesso o di anidrite (ad es. Basilea Campagna, Argovia o Soletta) vengono richiesti i materiali da costruzione resistenti ai solfati. Mentre in un solo cantone sono predisposti i requisiti di conduttività termica (utilizzo di un cemento a bassa conduttività termica in aree con acqua freatica fortemente riscaldata). Ulteriori requisiti particolari sono richiesti, talvolta, nelle aree a rischio artesiane o di gas naturale. Questi, riguardano per lo più la realizzazione tecnica del riempimento (ad es. l'uso di imballatori e il riempimento immediato) rispetto al tipo ed alla qualità del materiale del riempimento. In generale, quest'ultimo non viene controllato sistematicamente, ma solamente in poche occasioni. I dati sul riempimento, generalmente, non sono richiesti dal cantone e vengono raccolti raramente. Solo in un cantone viene richiesto di specificare il materiale di riempimento e le sue caratteristiche.

I casi passati hanno mostrato che, in genere, il riempimento viene effettuato secondo le norme, ma comunque si registrano diversi riempimenti inadeguati (per es. presentano lacune e spazi vuoti, la densità delle sospensioni non è corretta, oppure quest'ultima non è omogenea). Un aumento dei controlli, seppur non sistematico, ed una concreta sensibilizzazione da parte del geologo, del fornitore o del cantone stesso aumenterebbero automaticamente la qualità della realizzazione. Ciò non porterà necessariamente a costi aggiuntivi. In alcuni cantoni, per esempio, il geologo potrebbe integrare questi controlli durante il suo normale monitoraggio geologico e cercare di organizzare le visite al sito di perforazione in modo da poter essere presente durante il processo di riempimento (ad es. verificando se sono presenti una bilancia ed un numero sufficiente di sacchi di malta; controllando i valori di densità misurati; esaminando i mescolatori).

Tuttavia, è discutibile se il cantone debba imporre requisiti specifici per quanto riguarda le proprietà e la qualità del materiale di riempimento. Se il cantone richiede determinati materiali da costruzione per garantire la longevità ed il miglioramento dell'intero sistema, in una certa misura, si schiera dalla parte del progettista e se ne assume la responsabilità. Effettivamente, il requisito spesso citato con lo scopo di garantire un'integrazione della sonda nel sottosuolo che sia stagna, permanente, e stabile sia fisicamente che chimicamente è sufficiente.

La situazione è leggermente diversa quando si tratta di resistenza al gelo. Ci si interroga se questo debba essere richiesto in linea di principio, poiché secondo Kriesi, R. (2017) circa 1/3 delle 91 sonde geotermiche esaminate sono surraffreddate, e sono aumentati i casi di sonde congelate. Il potenziale di sottoraffreddamento è intensificato dalla densità crescente dei sistemi di sonde geotermiche, nei quali le sonde circostanti, spesso, non vengono considerate nel dimensionamento (Ebert e Dörner, 2017). Poiché i cicli di gelo e disgelo danneggiano gravemente la struttura dei riempimenti non resistenti al gelo (capitoli 2 e 6.3), sarebbe opportuno che il cantone richiedesse materiali da costruzione resistenti al gelo per garantire la protezione delle acque sotterranee e la necessaria tenuta dei riempimenti. Il cantone è generalmente meglio

informato del committente ed è a conoscenza di tutti i progetti esistenti. Sarebbe quindi utile per la protezione delle acque sotterranee e l'efficienza energetica che stabilisse degli standard adeguati (ad es. resistenza al gelo, conduttività termica) in aree con elevata densità di sonde geotermiche o con problemi geologici.

### 8.3 Materiali di riempimento utilizzati: caratteristiche e raccomandazioni

Come mostra il capitolo 4 sulle **statistiche** delle malte utilizzate, le tipologie adoperate sono relativamente poche. Solo un 10% ca. utilizza materiali di riempimento speciali. I produttori o fornitori che dominano il mercato sono solo due. È emerso che le piccole imprese di perforazione tendono ad utilizzare malte e mescolatori diversi rispetto alle imprese di perforazione più grandi.

Il capitolo 5 descrive le **caratteristiche** dei materiali di riempimento più comunemente utilizzati. Poiché non esistono dei test uniformi e indipendenti per queste malte, il confronto è difficile e si è, in parte, legati alle raccomandazioni fornite, in quanto per i singoli parametri non esistono dei rapporti sulle verifiche fatte (vedi anche i paragrafi seguenti). È chiaro e comprensibile che i produttori non divulgano tutti i dettagli a causa della concorrenza! Se non si tiene conto della resistenza al gelo, in teoria, le miscele pronte all'uso risultano adeguate (ciò è confermato anche in diversi studi, vedi i riferimenti). Oltre alle miscele standard (cfr. capitolo seguente), le miscele pronte all'uso soddisfano i requisiti minimi, anche se sussistono differenze significative per quanto riguarda la stabilità strutturale, la resistenza, il grado di sedimentazione, la reologia, ecc. (vedi vari studi nel capitolo 2). In Svizzera, le richieste di materiali vengono fatte direttamente ai produttori dalle aziende di perforazione, essendo che queste, nella maggior parte dei progetti, sono libere di decidere i materiali di riempimento. Non sorprende quindi che si ponga particolare attenzione al rendimento, al prezzo, alla praticabilità ed alla reologia. Inoltre, nei colloqui coi produttori e i capi trivellatori, è emerso che requisiti come la tenuta o la resistenza al gelo non vengono presi in considerazione, e che alcune malte utilizzate non dispongono, per esempio, di un coefficiente di permeabilità (tabella n.2). In generale, il valore di acqua/solidi, la tipologia e la percentuale di minerali argillosi, così come la tipologia e la qualità del clinker, sono importanti per la resistenza a lungo termine, la stabilità strutturale, il grado di sedimentazione, la resistenza al gelo e ai solfati, nonché per la tenuta e la conducibilità termica dei materiali di riempimento. A tal proposito, le malte speciali presentano generalmente ottime qualità e possono essere consigliate per la stabilità e la qualità a lungo termine (vedi capitolo 5.4). Come dimostrato dalle simulazioni del capitolo 5.4, i costi aggiuntivi per la malta migliorata possono essere ampiamente giustificati dall'aumento della qualità e dal risparmio in termini di metri di perforazione. I produttori di materiali di riempimento insieme ai produttori di tubi per le sonde sono chiamati ad aumentare la stabilità strutturale e la tenuta del sistema. Quest'ultima è solitamente molto più bassa se si considera il sistema complessivo di tubazioni e malte rispetto alla sola malta. È necessario ottenere densità più elevate, ovvero valori di acqua/solidi inferiori, anche se in conflitto con la resa e la reologia, (cfr. capitolo 2 e paragrafo successivo). Va osservato che una densità più elevata è in contraddizione con le sonde relativamente profonde che si utilizzano in Svizzera, in quanto è possibile che a causa di una sospensione più pesante avvenga uno schiacciamento dei tubi delle sonde. In questo caso è necessario eseguire una cementazione a gradini oppure utilizzare una malta più leggera. La qualità complessiva dipende anche dalla corretta miscelazione ed iniezione (vedi i paragrafi seguenti).

**Molti parametri dei materiali sono in conflitto tra di loro**, come ad esempio il tasso di sedimentazione ed i tempi del viscosimetro a imbuto di Marsh, poiché entrambi dipendono dal valore di acqua/solidi. Un elevato contenuto d'acqua comporta tempi di percorrenza ridotti e al contrario un grado di sedimentazione maggiore. Un alto contenuto d'acqua porta ad una migliore reologia, compressibilità e resa, ma anche ad una minore densità, impermeabilità, stabilità strutturale, conducibilità termica e resistenza al gelo, così come ad un maggiore grado di sedimentazione. A seconda delle esigenze, è difficile definire i benefici e gli svantaggi, soprattutto per le sonde profonde. Tuttavia, per quanto riguarda la longevità, si può affermare quanto segue: per una qualità a lungo termine, cioè per garantire resistenza, stabilità della microstruttura, impermeabilità e flusso di calore, si dovrebbero usare malte con valori bassi di acqua/solidi ed aumentare i requisiti per la conduttività termica, la resistenza al gelo e al solfato (cfr. riferimenti nel capitolo 2). Occorre quindi considerare se il valore di acqua/solidi, essendo abbastanza importante, debba essere aggiunto ai requisiti dell'allegato A7 della guida all'implementazione

dell'UFAM (2009). Secondo diversi studi, questo valore dovrebbe essere perlomeno inferiore a 1. Il fornitore più importante di malte in Svizzera raccomanda per i proprio prodotti valori di 0,8. Ciò significa che è possibile implementare una richiesta di questo tipo. A questo punto miscele standard o auto-prodotte con 100 kg di bentonite, 200 kg di cemento e 900 l d'acqua non sarebbero più ammesse (vedi sotto).

**Resistenza al gelo:** il capitolo 6.3 ed una serie di studi (vedi Herrmann, V.J., 2008) dimostrano che la maggior parte delle miscele più comuni non sono resistenti al gelo e dopo il primo ciclo di gelo-disgelo presentano nuove crepe. Di conseguenza, il riempimento non è più in grado di svolgere i suoi compiti più importanti, ovvero: impermeabilizzazione per la protezione delle acque di falda, e agganciamento al substrato per il flusso di calore (vedi capitolo 2). Un allentamento della struttura comporta una diminuzione della conducibilità termica del riempimento, o un aumento della resistenza del foro, con una corrispondente riduzione della potenza della sonda. Di conseguenza, viene ulteriormente favorito il congelamento, che porta ad una maggiore degradazione della struttura. Secondo Kriesi, R. (2017) alcuni sistemi funzionano anche nella zona di gelo e secondo la SIA 384/6 ad una temperatura di  $-3^{\circ}\text{C}$  è ammesso un liquido di sonda minimo. Con l'aumentare della concentrazione di sonde geotermiche aumenta il rischio di sottoraffreddamento, soprattutto perché, spesso, nel dimensionamento non vengono prese in considerazione le sonde circostanti (Ebert e Dörner, 2017). La resistenza al gelo del materiale di riempimento dovrebbe essere, pertanto, resa obbligatoria. In alternativa, è possibile prendere in considerazione il funzionamento con acqua, e progettare la pompa di calore in modo che si spenga con temperatura a  $0^{\circ}\text{C}$  oppure in caso di gelo.

Le **miscele standard** ottengono generalmente i risultati peggiori in tutte le prove. Si riportano qui gli esiti: solidità insufficiente, nessuna resistenza al gelo, permeabilità all'acqua generalmente più elevata, minore conducibilità termica, tasso elevato di sedimentazione, volume instabile, repentina degradazione (cfr. ad esempio Niederbrucker, R. & Steinbacher, N., 2007). In teoria con l'utilizzo delle miscele migliori di materiali, alcuni requisiti possono essere certamente soddisfatti. Rispetto alle miscele pronte all'uso, tuttavia, la verificabilità è problematica, in quanto vi è un ampio margine per la produzione delle malte. Nella scelta dei materiali e nella miscelazione è necessaria una notevole esperienza (ad es. tipologie adeguate sia per minerali argillosi che per il cemento). Come dimostrano già le diverse procedure di mescolatura delle miscele pronte all'uso, si può presumere che le differenze di qualità siano ancora più evidenti con le miscele standard. Ci sono certamente alcuni addetti ai riempimenti che, con i prodotti adatti, sono in grado di preparare una buona sospensione. Tuttavia, data la verificabilità e gli ottimi risultati nei test, è preferibile utilizzare miscele pronte all'uso di buona qualità, essendo anche minore la suscettibilità agli errori durante la produzione (vedere anche il paragrafo precedente).

Generalmente le proprietà delle malte vengono misurate in maniere diverse, in quanto non esistono **metodi di prova standardizzati e uniformi**. Spesso vengono testate internamente dai produttori nei propri laboratori, per cui non viene fornita la comparabilità perché le attrezzature di laboratorio ed i metodi di prova risultano essere diversi. Ad esempio, è importante determinare in quale lasso di tempo viene eseguito il test, e se quest'ultimo avviene in un ambiente umido o secco, o se viene misurato in un sistema aperto o chiuso. Di conseguenza variano le misurazioni delle diverse caratteristiche. Ad esempio, in un sistema chiuso la sedimentazione e lo sviluppo della microstruttura sono diversi da un sistema aperto in cui l'acqua può fuoriuscire. Inoltre, una malta può essere descritta dal produttore come capace di garantire una buona stabilità strutturale e conducibilità termica (ad esempio testata con un basso valore di acqua/solidi), ma che poi risulta essere difficilmente iniettabile in fori profondi. Per ovviare a questo problema il prodotto verrà miscelato sul sito di perforazione in modo tale che risulti più fluido e quindi più iniettabile, ma in questo modo non conserverà le proprietà indicate. Le seguenti due cose sono simili per il tasso di sedimentazione: quando viene definito il valore, subito dopo il riempimento o solamente dopo l'indurimento, e se si tratta di un sistema aperto o chiuso. Soprattutto le malte con un elevato valore di acqua/solidi tendono a sedimentare lentamente, ancor più se fuoriesce umidità dal substrato durante la fase di indurimento. Per quanto riguarda la resistenza al gelo, i problemi riguardanti i vari metodi di prova sono stati descritti nel capitolo 2. I punti appena elencati dimostrano quanto sarebbe importante stabilire procedure di prova adeguate e standardizzate, e che le malte venissero conseguentemente testate secondo tali procedure in modo periodico ed autonomo. I produttori o fornitori svizzeri, si sono resi disponibili a testare i prodotti e se necessario ad adattare le loro malte. In questo caso sarebbe opportuno che il governo federale istituisse una prima serie di test in modo tale da poterne dimostrare l'importanza, e che questi avvengano in maniera trasparente.

Nel capitolo 6, e occasionalmente negli altri paragrafi, viene descritta la situazione concreta dei siti di perforazione, e da cui risultano esserci equipe di perforazione che procedono al riempimento in maniera accurata. Tuttavia, spesso sono ignari dell'importanza della tipologia di cemento necessaria, della densità corretta o di un riempimento privo di spazi vuoti. Più volte si è osservato che la miscelazione non viene eseguita secondo le indicazioni e la densità viene regolata ad occhio. Di conseguenza, imprese diverse procedono in maniere differenti. Spesse volte non si ottiene un'iniezione omogenea, il che avviene soprattutto con i miscelatori continui, per esempio se i sacchi di materiale non vengono aggiunti continuamente, o se l'apporto idrico non è costante. Analogamente, il riempimento non avviene sempre dal basso verso l'alto, non garantendo così un riempimento completo. Soprattutto nei fori profondi, viene utilizzato spesso un secondo tubo di iniezione più corto, con il quale viene riempito il foro dall'alto. Per la miscelazione viene usato occasionalmente anche il fango o l'acqua di perforazione. Di conseguenza, il riempimento non può soddisfare in modo completo e per tutta la lunghezza del foro alcuni dei suoi requisiti (resistenza costante, accoppiamento, tenuta, flusso di calore). A lungo termine vi è quindi il rischio che il riempimento si degradi più rapidamente, ad esempio in caso di cicli di gelo e disgelo. La buona preparazione di ogni dipendente è molto importante, eventualmente sarebbe importante che il fornitore produca un certificato adeguato, allo stesso modo una buona manutenzione è fondamentale. Questo vale anche per i capisquadra delle aziende di perforazione, che scelgono i materiali necessari e gli standard di qualità da utilizzare. L'utilizzo di una bilancia sul sito dovrebbe essere un fattore considerato indispensabile. La densità, soprattutto coi miscelatori continui, deve essere misurata all'inizio e alla fine del processo, e il rapporto di miscelazione di acqua/solidi deve essere impostato secondo le indicazioni del produttore. Deve essere garantito un approvvigionamento d'acqua costante. Prima di iniziare il riempimento, dovrebbe sempre esserci abbastanza massa grezza sul sito di perforazione. L'APP, i fornitori e i geologi dovrebbero curare la sensibilizzazione generale sull'importanza del riempimento. Il tipo di cemento, la densità, il rapporto acqua/solidi ed eventuali problemi dovrebbero essere sempre registrati. Vedere fuoriuscire la malta dal foro di perforazione alla fine del riempimento non è prova sufficiente affinché questo soddisfi i requisiti a lungo termine o del fatto che il foro sia totalmente riempito. I capi squadra che hanno esperienza consolidata in tutte le tecniche di miscelazione riferiscono di preferire i miscelatori colloidali perché meno soggetti a problemi tecnici (ad es. intasamento), consentono d'iniettare rapidamente la sospensione e sono slegati dal sistema di rifornimento idrico del cantiere (spesso poco affidabile). Con l'utilizzo di questi miscelatori si ottiene un'omogeneità elevata ed una migliore decomposizione dei singoli componenti della malta. Inoltre, risultano meno soggetti ad errori nell'ottenimento della densità ottimale, poiché per ogni procedura di miscelazione viene sempre aggiunto (in parte automaticamente) lo stesso numero di sacchi di materiale e la stessa quantità d'acqua. Si consiglia quindi di utilizzare preferibilmente i miscelatori colloidali nonostante i costi maggiori.

**In generale**, si può affermare che la maggior parte delle squadre di perforazione riempiono il foro al meglio delle loro conoscenze e convinzioni, ma che comunque non sia data abbastanza importanza alla qualità del riempimento. Ciò può dipendere dall'inconsapevolezza su quali siano le possibili conseguenze o al fatto che il riempimento non sia visibile e che quindi risulti difficile da controllare a posteriori. Anche i produttori / fornitori non sono a conoscenza di tutti i requisiti. Uno degli intervistati ha risposto che la resistenza al gelo non è rilevante, in quanto il riempimento è al di sotto della linea di gelo invernale del terreno. Nei colloqui con i perforatori, sembra che molti ignorino le conseguenze di un riempimento incompleto o di una miscelazione errata. Ad es. è stato detto che per la miscelazione viene utilizzata l'acqua di perforazione, in quanto ciò consente di risparmiare materiale e di ridurre la quantità di fango da smaltire. Anche i progettisti e i geologi, e ancor più i committenti, spesso non sono consapevoli dell'importanza del tipo di cemento, di una sospensione correttamente miscelata e di un riempimento privo di spazi vuoti. Ciò è dimostrato dal fatto che la scelta del tipo di malta viene solitamente demandata alla società di perforazione, che tende ad utilizzarne una economica, il che è comprensibile data l'attuale pressione sui prezzi. Anche in questo caso è evidente l'importanza della sensibilizzazione generale.

## 8.4 Materiali da riempimento migliorati

Il capitolo 5.4 tratta il rapporto tra costi e benefici dei materiali da costruzione migliorati. In generale, i materiali di riempimento migliorati mostrano una qualità e una stabilità a lungo termine significativamente migliore. Di solito sono resistenti al gelo e al solfato e hanno una maggiore conducibilità termica. Sebbene influiscano di qualche punto percentuale sull'aumento del prezzo

per metro perforato, i costi della malta migliorata sono quasi totalmente compensati dalla conseguente diminuzione dei metri necessari di perforazione. Al fine di poter utilizzare una malta di alta qualità che soddisfi tutti i requisiti e con un costo aggiuntivo minimo, si dovrebbe effettivamente prendere in considerazione se questa non debba diventare una buona pratica generale.

## 8.5 Conclusione: il variare della qualità della malta utilizzata in Svizzera

Il seguente diagramma (Fig.20) mostra quali delle malte utilizzate in Svizzera siano più adatte a determinate esigenze. Si noti che non esistono dati completi su tutte le proprietà delle malte raccolte in autonomo e con metodi di prova adeguati. Le informazioni vanno pertanto intese come tendenze. Inoltre, si deve notare che alcune proprietà si comportano in modo contrario. A seconda delle esigenze applicative e del rapporto qualità/prezzo, è opportuno utilizzare malte diverse. Il suddetto si divide in: miscele speciali pronte all'uso, standard, economiche e la classica miscela standard o autoprodotta. Quanto più grande è rappresentato il font nella figura, tanto più frequentemente viene utilizzato il tipo di malta in Svizzera. La barra grigia mostra il range delle densità delle malte misurate nei siti di perforazione (per le miscele autoprodotte è stato registrato un solo valore, di conseguenza in questo caso la variazione non è nota!) I diversi valori di acqua/solidi hanno un'influenza corrispondente sulle proprietà, che sono denominate a destra nelle frecce. Le diverse proprietà delle classi delle malte sono indicate nella freccia superiore.

Separazioni nette sono difficili da formulare perché ogni materiale da costruzione presenta proprietà diverse. Ad esempio, il BTD-Füller 350 ha un valore di acqua/solidi molto alto, che secondo vari studi è dannoso per la resistenza al gelo ma che, a sua volta, si è dimostrato molto resistente ai solfati, facile da iniettare ed economico. La classificazione deve essere vista schematicamente ed in particolare deve essere considerata a seconda delle esigenze e dei requisiti operativi. Secondo i questionari, il committente considera in maniera negativa le miscele autoprodotte, soprattutto per quanto riguarda la resistenza al gelo e la verificabilità in termini di qualità. Sulla base dei fatti sopra descritti, i materiali da costruzione e le densità all'interno della zona verde dovrebbero, in effetti, essere raccomandati per garantire una qualità migliore e la longevità del riempimento. Come mostrato sopra, i costi aggiuntivi per i materiali da costruzione migliorati sono bassi se confrontati con i risparmi sui metri della sonda e l'ottenimento di una qualità superiore.

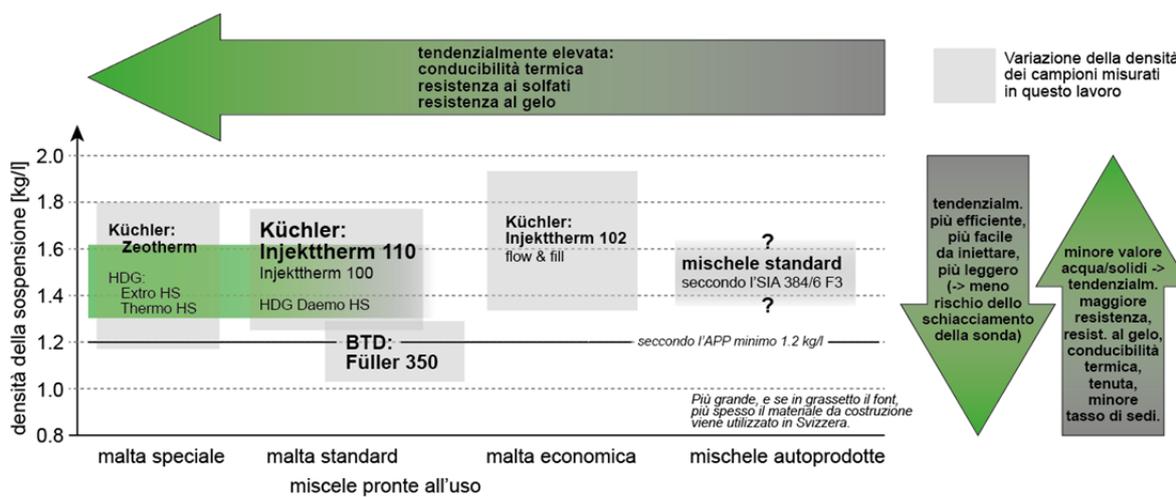


Fig. 20 Qualità dei materiali da costruzione utilizzati per il riempimento

Un buon materiale di riempimento deve garantire un'elevata impermeabilità per la protezione delle acque sotterranee, essere stabile nel tempo e consentire un buon accoppiamento del flusso termico alla roccia. Se non soddisfa questi requisiti, non si possono escludere danni. Questi

possono essere, ad esempio, un collegamento coi livelli delle acque sotterranee o una perdita di prestazioni.

## 8.6 Raccomandazioni di miglioramento conclusive

Già in fase di progettazione si dovrebbe considerare quale malta sia necessario utilizzare. Occorre tenere in considerazione la qualità, la durata e la conduttività termica. A seconda dei casi, i costi aggiuntivi per l'acquisto di una malta migliore sono trascurabili. È necessario elaborare un corretto dimensionamento considerando le sonde circostanti, i parametri del sottosuolo o l'esclusione del funzionamento del riscaldamento in caso di gelo.

Per quanto riguarda la qualità delle malte, queste dovrebbero essere testate con metodi standardizzati, comparabili ed adeguati. Solo in questo modo è possibile confrontarle, cosa che attualmente non è possibile a causa di valori e rapporti sui test mancanti, o del fatto che alcune misurazioni vengono effettuate nei laboratori degli stessi produttori. Per fare ciò sono necessari ulteriori sforzi da parte di un ente che sia indipendente, come potrebbe essere la stessa Confederazione Elvetica. Anche i requisiti dovrebbero essere esaminati nuovamente ed eventualmente implementati. Sarebbe opportuno che nella guida all'implementazione dell'UFAM (2009) venissero integrati i requisiti dei valori di acqua/solidi che determinano la qualità finale.

La qualità del rinterro potrebbe essere migliorata attraverso un'ampia sensibilizzazione dei committenti, dei progettisti, dei geologi e delle aziende di perforazione. Ciò riguarda la corretta miscelazione e successiva iniezione, nonché tecniche migliori di miscelazione e attrezzature più funzionali. La densità della malta deve essere controllata, specialmente per i miscelatori continui, con l'ausilio di una bilancia. Nei cantieri vengono monitorate sistematicamente e con attenzione diverse cose ma, essendo il riempimento totalmente interrato e non visibile, questo non viene sufficientemente monitorato. Sarebbe quindi da tenere in considerazione un controllo maggiore soprattutto per verificare che la miscela venga realmente iniettata dal basso verso l'alto, che si presenti omogenea e che venga realizzata secondo le istruzioni del produttore.

Le autorità cantonali dovrebbero prendere in considerazione l'utilizzo di malte speciali che garantiscano determinati requisiti (come resistenza al gelo e ai solfati o elevata tenuta del sistema) soprattutto nelle aree critiche, ad es. in quelle con diverse sonde ravvicinate o con un flusso di acque sotterranee importante.

Occorre tuttavia notare che se si dovessero osservare tutte le raccomandazioni, soddisfare requisiti più severi ed implementare il numero di test, si incorrerà in un aumento inevitabilmente dei costi. In modo tale che questo non diventi ancora più incidente nel settore delle sonde geotermiche, è necessario agire con buon senso. Tuttavia, le norme esistenti dovrebbero essere rispettate. Molte delle raccomandazioni sopra descritte non sono costose, come dimostrano molti progetti realizzati che hanno mantenuto gli stessi costi seguendo la corretta procedura.

Ogni guasto o danno verificato danneggia il settore delle sonde geotermiche ed è da prevenire. Molti dei principali casi di danni noti finora, come ad es. nel Baden-Württemberg, sono dovuti ad un riempimento insufficiente. Ciò dimostra l'importanza di un'iniezione accurata e realizzata con buoni materiali da costruzione.

## 9 Osservazioni finale

Si sottolinea espressamente ancora una volta che, nonostante tutte le criticità evidenziate nella relazione, sul mercato sono disponibili buoni materiali di riempimento e che sono molte le squadre di perforazione ben addestrate, con molta esperienza e che eseguono il riempimento in conformità ai regolamenti ed alle raccomandazioni.

Alcune delle critiche menzionate possono essere dovute alla mancanza di esperienza in questo settore e forse, anche, da una comunicazione poco efficiente tra le autorità, i dipartimenti specializzati che definiscono i requisiti, i pianificatori, le aziende di perforazione, i produttori ed i fornitori di malta. Tenendo in considerazione ciò, questo lavoro può essere visto come una base di discussione tra le varie parti interessate, in modo tale che in futuro la sonda geotermica, incluso il riempimento, possa essere ottimizzata ulteriormente in termini di qualità, longevità, sicurezza, efficienza energetica ed economicità.

## 10 Bibliografia

- Anbergen, H., 2015. Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechseleinflusses auf Hinterfüllbaustoffe für Erdwärmesonden. Dissertation, TU Darmstadt, 196 Seiten.
- Arbeitskreis „Geothermie“ der Fachsektion Hydrogeologie und Ingenieurgeologie, 2015. Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung – EA Geothermie“. Herausgeber Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e.V., Seiten 163-197.
- Bund/Länderarbeitsgruppe der Staatlichen geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer, Ad-hoc Arbeitsgemeinschaft Hydrogeologie, 2015. Empfehlung für die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Systems Erdwärmesonde, 64 Seiten.
- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2009. Vollzugshilfe „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund“, 51 Seiten.
- Ebert, A. und Dörner, E., 2017. Bericht «EWS-Umfrage» Ergebnisse zu einer Umfrage zum Vorgehen bei der Dimensionierung von Erdwärmesonden bei Beachtung von Nachbarsonden. Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 55 Seiten.
- Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz FWS, 2013. Reglement für Gütesiegel für Erdwärmesonden – Bohrfirmen, 14 Seiten.
- Herrmann, V.J., 2008. Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 192 Seiten.
- Hess, M., Sommerhalder, M., Burger, F., Badoux, V., 2015. Qualitätssicherung Erdwärmesonden, Übersicht Messmethoden zur Prüfung der Hinterfüllung. Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 38 Seiten.
- Kriesi, R., 2017. Bericht «Analyse von Erdwärmesondenanlagen» Abschätzung des Anteils unterkühlter Erdwärmesonden von Anlagen, die vor Einführung der SIA 384/6 erstellt wurden. Energie Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, 42 Seiten.
- Niederbrucker, R. & Steinbacher, N., 2007. Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden. Technischer Endbericht, Land Oberösterreich, 61 Seiten.
- Rohner, E. und Rybach, L., 2001. Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung. Bundesamt für Energiewirtschaft, 30 Seiten.
- SIA-Norm 384/6, 2010. Erdwärmesonden. 76 Seiten.
- Taylor, H. F. W., 1992. Cement Chemistry, third edition: London, Thomas Telford, 475 Seiten.
- Touzin, M., 2017. Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Temperaturverteilung im Tiefenbereich von oberflächennahen Erdwärmesonden in der Nordwestschweiz. Masterarbeit, Universität Basel. 198 Seiten.
- Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech, 2016. Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWS-Tech, Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technologie. 368 Seiten.