

Rapport final, 16 avril 2015

Assurance qualité des sondes géothermiques

Aperçu des méthodes de mesure pour le contrôle du remplissage



suisse énergie
Notre engagement : notre futur.

Auteurs

Dr. Maurus Hess, CSD INGENIEURS

Markus Sommerhalder, CSD INGENIEURS

Felix Burger, CSD INGENIEURS

Dr. Vincent Badoux

Traduction française

Daniel Salomé, Alpha Services Sàrl

André Freymond, PAC'Info Sàrl

Cette étude a été réalisée sur mandat de SuisseEnergie. Seuls les auteurs sont responsables de sa teneur.

Adresse

CSD Ingenieure AG, Hessesstrasse 27d, CH-3097 Liebefeld

Tel. +41 31 970 35 35, Fax +41 31 970 35 36, info@csd.ch, www.csd.ch

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Situation initiale et motivation	5
1.3	Objet et limites de l'étude	6
1.4	Procédure et produits	8
2	Principes	9
2.1	Utilisation de la chaleur du sous-sol par des sondes.....	9
2.2	Aperçu des méthodes	9
2.3	Explications de la description des méthodes	10
3	Méthodes thermiques	12
3.1	Méthode TRT court	12
3.2	Méthode p-T-log au repos.....	13
3.3	Méthode Mesure de la chaleur de prise.....	14
3.4	Evaluation et discussion	15
4	Méthodes radioactives	19
4.1	Méthode de mesure d'anomalies de densité gamma-gamma.....	19
4.2	Méthode Gamma-Ray-Log (GR).....	20
4.3	Evaluation et discussion.....	21
5	Méthodes mécaniques	24
5.1	Méthode Digital Borehole Observation 3	24
5.2	Méthode appareil de mesure de remplissage	25
5.3	Méthode Datalogger HDG EWS	26
5.4	Evaluation et discussion.....	27
6	Méthodes magnétiques	30
6.1	Méthode magnétique - CemTrakker	30
6.2	Méthode magnétique-Log (MAL)	31
6.3	Evaluation et discussion.....	32
7	Coup d'oeil à l'étranger	35
7.1	France	35

7.2	Allemagne (Bade-Wurtemberg)	36
8	Résultats essentiels et conclusions	39
8.1	Remarque préalable.....	39
8.2	Application et valeur indicative des méthodes	39
8.3	Conclusions.....	40
	Annexes 1 Liste des partenaires interviewés	42

1 Introduction

1.1 Situation initiale et motivation

La stratégie énergétique 2050 de la Confédération devrait réduire la consommation d'énergie finale et d'électricité, accroître la part des énergies renouvelables et diminuer les émissions de CO₂ liées à l'énergie. La géothermie, qui peut être utilisée pour une installation de pompe à chaleur (PAC), représente une source d'énergie renouvelable disponible localement.

Le présent rapport concerne l'utilisation de la géothermie à faible profondeur au moyen de sondes. Ces dernières années, de plus en plus de chauffages ont été construits avec des installations de PAC et sondes géothermiques. (Voir figure 1)

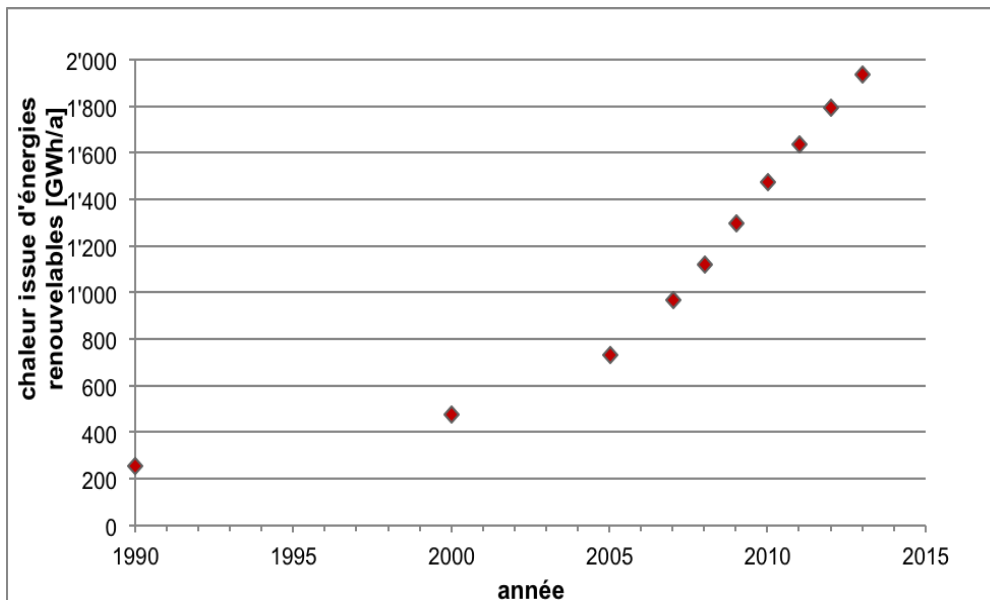


Figure 1: Evolution de l'utilisation de la géothermie au moyen de sondes et de pompes à chaleur sol/eau depuis 1990. (Source: OFEN: Statistiques suisses des énergies renouvelables. Edition 2013. Berne, septembre 2014)

La qualité de la réalisation des sondes géothermiques est entre autres déterminant pour une bonne liaison thermique des sondes au sous-sol et en conséquence pour leurs performances, donc finalement aussi pour l'efficacité de l'ensemble du système sondes géothermiques – pompe à chaleur – cession de chaleur

Quelques méthodes de mesure et de contrôle existent pour l'évaluation de la qualité de la réalisation une fois les travaux de forage et d'installation terminés et celles-ci ne sont pas appliquées de façon uniforme. Les contrôles d'exécution sous la forme d'accompagnements de la réalisation et de la surveillance de l'exécution sont liés à des frais importants et des coûts relativement élevés. Les contrôles de réalisation effectués par Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur GSP ont montré, lors des contrôles de forage par échantillonnage, que:

- sur les contrôles annoncés, 15% des forages présentaient des défauts de remplissage

- sur les contrôles non annoncés, 38% des forages présentaient des défauts de remplissage.

De meilleures possibilités de contrôle plus complètes, de même que leur application régulière entraîneraient donc avec une grande probabilité une qualité supérieure du remplissage et en conséquence de meilleurs transferts de chaleur donc une plus haute efficacité énergétique.

1.2 Problème posé

Le remplissage joue un rôle majeur dans l'évaluation de la qualité d'exécution d'une sonde géothermique. Des méthodes d'évaluation de la qualité du remplissage des sondes géothermiques sont présentées dans le cadre de ce projet. Les méthodes sont décrites selon une trame uniforme et répondent pour l'essentiel aux questions suivantes:

- Quelles méthodes sont-elles actuellement utilisées?
- Comment les méthodes fonctionnent-elles, quelle est l'importance des frais et quelles sont les valeurs mesurées?
- Quelles conclusions peut-on tirer du point de vue de la qualité de remplissage?

La présente étude indique l'état des connaissances actuelles et donne un aperçu des méthodes de mesure aujourd'hui utilisées. Il ne s'agit pas de classer les différentes méthodes.

1.3 Objet et limites de l'étude

Le projet traite des méthodes matures disponibles sur le marché aujourd'hui utilisées (pas de prototypes ou de méthodes non éprouvées).

La figure 2 montre l'ordonnancement et la limite de l'objet de l'étude. La présentation se réfère à la norme SIA 384/6 Sondes géothermiques. L'étanchéité du forage (remplissage) doit remplir les conditions suivantes (voir SIA 384/6 chapitre 4.3.1.1):

- Etanchéité verticale de différentes origines d'eau souterraine et de diaclase
- Liaison thermique des sondes au sous-sol
- Enrobage et protection des sondes géothermiques

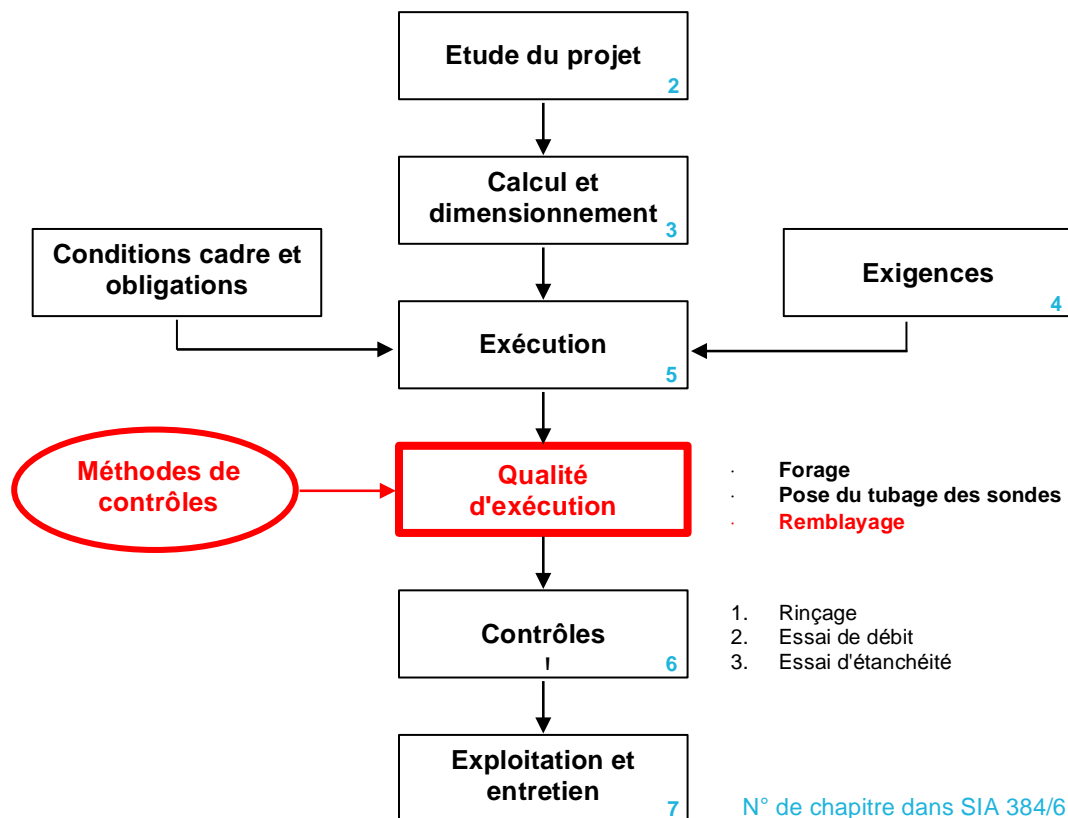


Figure 2: Ordonnancement et définition de l'objet de l'étude.

La qualité d'exécution du remplissage est évaluée du point de vue de l'échange d'énergie entre la terre et les tubes des sondes, c'est à dire le liquide caloporteur. Il s'agit donc de méthodes permettant de prévoir la liaison thermique entre les sondes et le sous-sol.

L'entreprise de forage est responsable de l'exécution correcte du remplissage. D'autres tâches de l'entreprise de forage, comme par exemple le forage proprement dit et la mise en place des tubes des sondes, ne font pas partie de cette étude.

En dehors de ses possibilités, de l'expérience et de l'équipement de l'entreprise de forage, la qualité de l'exécution est aussi déterminée par les conditions cadre géologiques locales, de même que par les éventuelles dispositions à respecter. C'est ainsi que des dispositions relatives aux sondes géothermiques pour la protection des eaux souterraines peuvent influencer l'échange de chaleur entre le sous-sol et la sonde, par exemple en raison des caractéristiques du matériau de remplissage.

La présente étude n'a pas pour objet la conception d'installations à sondes géothermiques, ni le calcul et la conception ou encore la vérification du dimensionnement.

1.4 Procédure et produits

Les indications sur les différentes méthodes de mesure ont été obtenues directement auprès des fabricants ou des concepteurs. Les descriptions obtenues sont présentées aux chapitres 3 à 6. Tous les fabricants d'instruments de mesure connus selon nos connaissances actuelles ont été interrogés. Les méthodes mentionnées correspondent au retour des questionnaires dans le délai imparti.

Les expériences pratiques avec les méthodes de mesure ont fait l'objet d'une enquête téléphonique par interview de différents groupes d'acteurs. Les personnes interviewées sont mentionnées en annexe. Les réponses aux interviews constituent la base de l'évaluation et de la discussion des chapitres 3 à 6, de même que du chapitre 7.

L'appréciation critique et les conclusions du groupe d'auteurs figurent dans le dernier chapitre du rapport.

Les résultats des clarifications établies sont décrits dans le présent rapport. Le rapport est complété par une notice résumant sous forme de tableau les résultats essentiels de l'enquête.

2 Principes

2.1 Utilisation de la chaleur du sous-sol par des sondes

La sonde géothermique fait fonction d'échangeur de chaleur avec le sous-sol. Elle permet le prélevement de la chaleur provenant du sol (dans le cas du chauffage) et l'apport de chaleur dans le sol (pour le refroidissement des bâtiments). Le nombre et la profondeur nécessaires des sondes géothermiques pour des besoins en énergie déterminés sont fonction des caractéristiques thermiques du sous-sol, de la disposition des sondes, de la température de l'agent caloporteur, de la géométrie des forages, de même que d'autres paramètres.

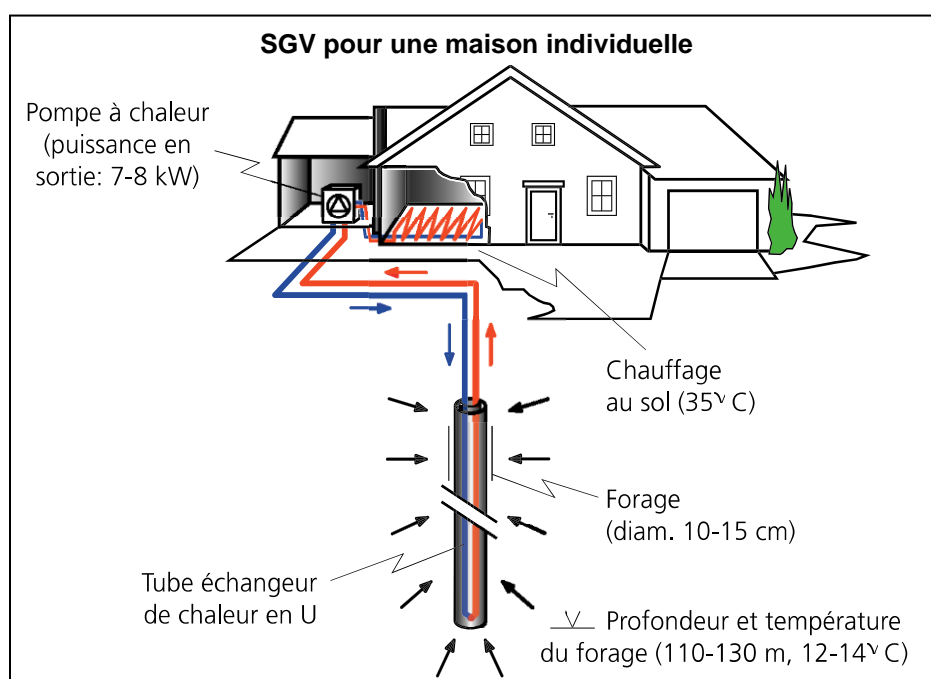


Figure 3: Illustration du système d'approvisionnement en chaleur d'une maison familiale par sonde géothermique et pompe à chaleur. (Source: www.geothermie.ch).

Du point de vue de la liaison thermique entre la sonde et le sous-sol, un remplissage optimal est constitué par un matériau conduisant bien la chaleur, qui enveloppe intégralement le tubage de la sonde sur la totalité de la longueur du forage, réparti et compacté de façon homogène dans le forage (sans inclusions d'air) et qui assure un contact complet avec les parois du forage. Et ceci, même après de nombreuses années d'exploitation, c'est-à-dire de nombreux cycles et variations de température.

2.2 Aperçu des méthodes

Dans le cadre de cette étude, les méthodes thermiques, radioactives, mécaniques et magnétiques sont différenciées. Le tableau 1 ci-dessous donne un aperçu des méthodes de mesure pour la vérification du remplissage des sondes géothermiques.

Méthodes thermiques	
Test de réponse thermique court, TRT court	Détermination des inhomogénéités après chauffage et mesure du comportement thermique
Diagraphie pression température à l'état non perturbé (p-T-log)	Mesure du profil de température de la sonde et sa correspondance avec les gradients géothermiques
Deep Drifter	Mesure de la courbe de température et de la trajectoire d'une sonde géothermique
Méthodes radioactives	
Anomalies de densité gamma-gamma	Détermination de la densité en fonction de la profondeur dans le forage remblayé, par une source radioactive artificielle
Gamma-Ray-Log	Matériau de remplissage enrichi en élément γ -actif ; mesure du rayonnement radioactif.
Méthodes mécaniques	
Digital Borehole Observation 3, DBO-3	Système de surveillance digital du processus d'injection (pression, profondeur, quantité injectée)
Appareil de mesure de remplissage, HMG-K, HMG-S	Mesure du volume, de la pression et de la densité du remplissage pendant l'injection
Datalogger HDG de sondes géothermiques	Système de surveillance digital de l'injection (pression, profondeur et quantité injectée)
Méthodes magnétiques	
CemTrakker	Matériau de remplissage enrichi en particules magnétiques; mesure de la susceptibilité magnétique pendant l'injection et dans le profil de forage.
Magnetic-Log (MAL)	Matériau de remplissage enrichi en particules magnétiques, par ex. magnétite; mesure de la susceptibilité dans le profil du forage

Tableau 1: Méthodes de mesure pour la vérification de la qualité du remplissage des sondes géothermiques.

2.3 Explications de la description des méthodes

Les méthodes de mesure pour la vérification de la qualité de l'exécution du remplissage sont décrites selon une trame uniforme dans les chapitres 3 à 6. Rappelons ici que les limites entre méthodes et appareils sont souvent floues et que certains instruments de mesure peuvent être utilisés pour différentes méthodes, ou que plusieurs appareils satisfont aux exigences d'une méthode. Mais des raisons historiques et du droit des brevets ont conduit à ce que certains appareils soient affectés directement à une méthode.

Aperçu	
• Désignation	Nom de la méthode y compris les abréviations usuelles, les fabricants
• Photo	Photo des instruments de mesure ou de la réalisation de la mesure
• Brève description	Brève description de la méthode / du principe de mesure
• Fournisseur d'appareils de mesure	Nom des fournisseurs des instruments, des fabricants
Champ d'application	

• Conditions géologiques	Champ d'application selon les conditions géologiques
• Long. sondes géothermiques	Champ d'application pour la longueur du forage, diamètre min.
• Diamètre du tube de la sonde	Champ d'application en fonction des diamètres des tubes de sondes, profondeur max.
• Prérequis spéc.	Prérequis spécifiques ou conditions pour que la méthode puisse être utilisée
Diffusion	
• Géographique	En service et aussi utilisée en Allemagne, Autriche et France
• Maturité sur le marché	La méthode est utilisée depuis l'année XY
• Propriété intellectuelle	Méthode brevetée avec d'éventuelles restrictions d'application et diffusion
Frais	
• Coûts	Coûts de réalisation de la mesure, y compris tous les préparatifs, la réalisation de la mesure et le rapport. Une situation uniforme a été prise en hypothèse de manière à ce que les coûts indiqués soient comparables: 1 sonde géothermique verticale d'une longueur de 100 m et d'un diamètre du tube de 40 mm Libre accès au trou de forage et absence d'obstacle à la réalisation des mesures
• Frais de matériel	Nombre et types des instruments de mesure (capteurs, sondes, logger,..) et le cas échéant installations et équipements
• Frais de personnel	Personnel nécessaire à la mise en place des installations, la réalisation et l'interprétation des résultats des mesures, y compris les qualifications spécialisées
Réalisation	
• Procédure, déroulement	Brève description de la préparation et de la réalisation des mesures
• Durée	Temps nécessaire à la préparation et la réalisation des mesures jusqu'à et y compris le démontage des équipements
• Encombrement	Espace nécessaire vers le forage pour la réalisation des mesures
• Moment	Pendant la mise en place du remplissage, après celui-ci , ...
Résultat	
• Grandeurs de mesure de la liaison thermique	Paramètres mesurés (pression, volume..). Valeurs individuelles de mesure et/ou courbes servant de base à l'évaluation de la liaison thermique entre les sondes géothermiques et le sous-sol
• Autres grandeurs de mesure	Autres paramètres mesurés par la méthode, utilisés pour l'évaluation d'autres exigences de la qualité du remplissage

Tableau 2: Trame de description des méthodes de mesure pour la vérification de la qualité du remplissage de sondes géothermiques.

3 Méthodes thermiques

3.1 Méthode TRT court

Aperçu	
• Désignation	Test de réponse thermique court, TRT-C
• Brève description	Vérification de la fonctionnalité du remplissage annulaire d'une sonde géothermique
• Prestataire	Par ex.: André Voutta Grundwasserhydraulik (Deutschland), www.avoutta.de

Champ d'application	
• Conditions géologiques	Pas de restrictions
• Long. sondes géothermiques	Pas de restrictions tant que le câble du capteur de température peut être guidé dans la sonde géothermique
• Diamètre des sondes géothermiques	Pas de restrictions
• Prérequis spécifiques	La tête de la sonde doit être atteignable verticalement, pas de tronçon de raccordement horizontal. Raccordement en courant fort nécessaire, 400 V / 16 A (il existe également une variante à entraînement à gaz)

Diffusion	
• Géographique	Pas de restrictions
• Maturité	Méthode mature
• Droits de propriété intellectuelle	Aucun

Frais	
• Coûts	Env. 2'000 à 4'000 € par sonde sans déplacement
• Frais de matériel	1 capteur de température miniaturisé à haute résolution, câblé et avec indicateur de profondeur, appareil TRT-C
• Frais de personnel	1 collaborateur qualifié

Réalisation	
• Procédure, déroulement	I. profil de température au repos; II 2 profils de chauffage en deux heures ; III. jusqu'à 5 profils de refroidissement dans les 4 heures après la fin de la phase de chauffage
• Durée	6-7 heures
• Encombrement	Place pour le treuil géophysique et l'appareil TRT-C
• Moment	N'importe quel moment après la prise du matériau de remplissage dans l'espace annulaire

Résultat	
• Profils de température	Variation des réactions de température en fonction du temps et de la profondeur. L'interprétation demande de l'expérience .

Précision de mesure	
• Données de calibrage	Un calibrage très précis est nécessaire (absolument 0.1°K), pour pouvoir analyser des mesures comparatives ou répétées
• Autres données	Précision de mesure: 0.01°K; résolution 1 cm

3.2 Méthode p-T-log au repos

Aperçu

- Désignation Nimo-T
- Brève description Mesure et analyse du profil de température et de pression dans la sonde géothermique au repos
- Prestataire Geowatt (www.geowatt.ch)



Champ d'application

- Conditions géologiques Pas de restrictions, convient en particulier pour l'identification de flux d'eau souterraine
- Long. sondes géothermiques Jusqu'à 500 m (appareil 40 bar), jusqu'à 1000 m (appareil 80 bar)
- Diamètre des sondes géothermiques Pour des sondes géothermiques duplex: min. 40 mm
- Prérequis spécifiques Prestations d'ingénieur pour l'analyse du log de température. L'appareil de logging de la température doit être disponible. Le logiciel "Nimo-T" crée un fichier .csv.

Diffusion

- Géographique Pas de restrictions
- Maturité Plusieurs années
- Droits de propriété intellectuelle Geowatt

Frais

- Coûts env. 1'000 CHF – 2'000 CHF
- Frais matériel 1 instrument de mesure avec logger de pression et température, logiciel
- Frais personnel 1 spécialiste

Réalisation

- Procédure, déroulement Mesure du profil de température de la sonde géothermique à l'état de repos. L'analyse des profils peut fournir des indications sur les fissures possibles dans le remplissage, la présence de flux d'eau souterraine, de même que la géométrie des sondes.
- Durée Mesure : 1 heure, analyse immédiate (sans rapport)
- Encombrement Accès à la sonde géothermique
- Moment Nimo-T doit être introduit verticalement, donc avant le montage des éléments en "y" et lignes de raccordement. Sinon, à n'importe quel moment, même en l'absence de sonde dans le forage ouvert. Il est recommandé de procéder à l'évaluation du remplissage une journée après l'essai de pression et de débit.

Résultat

- Grandeurs mesurées Temps, pression et profils de température
- Autres grandeurs Verticalité de la sonde, géométrie de la sonde

Précision de mesure

- Données de calibrage Variation de température en moyenne 0.2%, variation de pression en moyenne 1.04%
- Autres données -

3.3 Méthode Mesure de la chaleur de prise

Aperçu

- Désignation DeepDrifter[®]250 (photo) und DeepDrifter[®]500
- Brève description La sonde de mesure enregistre la courbe de température et la courbe de la position de la sonde dans les trois dimensions. Si l'on mesure la température une première fois après la mise en place de la sonde et une seconde fois lorsque le remplissage est intégralement durci, on peut évaluer la qualité du remplissage sur la base des courbes de température et de la différence de température.
- Prestataire EBERHARD & Partner AG (www.eberhard-partner.ch)



Champ d'application

- Conditions géologiques Pas de restrictions
- Long. sondes géothermiques Jusqu'à 250 m avec PE 32, jusqu'à 485 m avec PE 40
- Diamètre tube sonde Pas d'indication
- Prérequis spécifiques Surface horizontale plane sur laquelle l'instrument de mesure et le trépied peuvent être parfaitement ancrés (les tranchées de liaison ne devraient pas être creusées), libre accès.

Diffusion

- Géographique Nord-Ouest de la Suisse (cantons AG, BL, BS, LU, SO, ZH, ZG)
- Maturité Le DeepDrifter[®] est utilisé depuis 2011.
- Droits de propriété intellectuelle Marque protégée

Frais

- Coûts CHF 2070.00
- Frais matériel Système DeepDrifter[®], y compris rouleau de câble, trépied, sonde de mesure et raccordement électrique (doit être disponible sur place) .
- Frais personnel Temps de déplacement; montage et démontage respectivement 0.5 h (2 mesures = 2 h); durée mesure: 1h/100m (2h)
Pré-éclaircissements: 1h; présentation des données, analyse et rédaction du rapport: 6 h

Réalisation

- Procédure, déroulement La part de ciment du remplissage atteint sa température maximale pendant la prise après environ 24 heures. Puis la courbe de température diminue jusqu'à la prise complète du remplissage progressivement au cours des quatre semaines qui suivent. A la suite de la réalisation de plusieurs champs de sondes géothermiques importants à Bâle, non seulement les valeurs de mesures spatiales, mais également les données de température ont été analysées. Le contexte géologique est identique pour les trois sondes géothermiques, c'est-à-dire que l'évolution de la température est

	déterminée à partir du processus de prise du ciment ajouté. Sur la base de la courbe de température diminuant constamment pendant la période d'observation (pas d'anomalies positives ou négatives de la température), on peut conclure à un remplissage uniforme et en conséquence à une transmission efficace de la chaleur entre le sous-sol et la sonde.
• Durée	Préparatifs: 1h; réalisation des mesures jusqu'à et avec le démontage des équipements de mesure: temps de déplacement, installation et démontage resp. 0.5 h; durée des mesures: 1h/100m; Changement (plusieurs sondes): 0.5 h/changement
• Encombrement	2 m autour du forage (cercle d'un rayon de 2 m = 12.5 m ²)
• Moment	Première mesure: 24 h après le remplissage; seconde mesure: env. 4 semaines plus tard
Résultat	
• Grandeurs mesurées	Température, longueur câble
• Autres grandeurs	Rotation magnétique, Pitch and Roll -> courbe spatiale de la sonde
Précision de mesure	
• Données calibrage	La température est calibrée à intervalles réguliers avec un capteur de température WTW. Pour la vérification de la courbe spatiale, le prestataire possède un forage de calibrage qui a été mesuré par une tierce entreprise avant la dépose de la sonde.
• Autres données	-

3.4 Evaluation et discussion

Traditionnellement on utilise les méthodes thermiques comme outil de planification, par ex. au moyen du Test de Réponse Thermique (TRT). Dans le TRT, on mesure pour l'essentiel la conductivité thermique effective des couches géologiques sur la profondeur d'une sonde géothermique. Cette méthode est considérée comme l'outil de planification idéal, étant donné que la conductivité thermique du sous-sol peut être mesurée sur un forage-test et que celle-ci peut alors être incorporée comme paramètre dans le dimensionnement du champ de sondes géothermiques. La précision de dimensionnement est ainsi massivement accrue.

Techniquement dans le cas du TRT, on apporte dans le sous-sol, par l'intermédiaire de la sonde géothermique, une quantité de chaleur définie pendant plusieurs jours et ensuite on mesure sa "réponse" (refroidissement). On mesure ainsi les conditions thermiques non perturbées sur toute la profondeur du forage et on inclut en conséquence les caractéristiques du remplissage (de même que celles du fluide et du matériau de la sonde).

Le test dit eTRT (enhanced Thermal Response Test, Geowatt) est une forme élargie du TRT qui mesure les caractéristiques thermiques non seulement intégralement sur la longueur de la sonde, mais également en fonction de la profondeur. Il existe entre les deux diverses formes mixtes de différents fournisseurs qui mesurent les caractéristiques techniques pour une plage de profondeur définie.

L'utilisation de TRT pour le dimensionnement de champs de sondes est encore aujourd'hui le domaine d'application le plus fréquent. Ils conviennent moins comme pur outil de contrôle, étant

donné qu'ils sont relativement coûteux et qu'ils donnent des indications sur les caractéristiques thermiques globales des sondes et que des conclusions directes sur la qualité du remplissage ne sont ainsi pas possibles.

Les trois méthodes décrites dans ce chapitre sont comparativement moins compliquées et en conséquence, moins coûteuses et plus efficaces pour l'évaluation du remplissage. Dans ce cadre, nous différencions trois méthodes différentes par le but de la mesure: le TRT court mesure la courbe de refroidissement après le réchauffement du forage, le p-T log au repos mesure le profil de température après le remplissage et finalement la mesure de la chaleur de prise grâce à la mesure comparative du profil de température 24 heures après le remplissage (température maximale) et env. quatre semaines plus tard. Les limites entre les méthodes et instruments correspondants sont toutefois floues. C'est ainsi que le Deep Drifter et le Nimo-T peuvent aussi être fondamentalement utilisés pour un TRT court. De même, le Nimo-T pourrait mesurer la chaleur de prise par une mesure comparative. Des raisons historiques et de propriété intellectuelle ont conduit à ce que certains appareils soient aussi directement liés à une méthode.

On attend de tous les appareils de mesure thermique qu'ils indiquent les insuffisances marquantes de la qualité du remplissage par une anomalie du profil de température pendant le refroidissement. Le fait que l'on puisse conclure et dans quelle mesure, sur la base d'une anomalie –et par conséquent d'une absence d'anomalie- à des lacunes ou à l'intégrité du remplissage dépend en grande partie de la saturation hydraulique dans les couches géologiques correspondantes. La conductivité thermique de l'eau est supérieure à celle du matériau de remplissage, même dans le cas de matériaux thermiquement améliorés.

Possibilités d'application

Les méthodes thermiques décrites ici sont mises en œuvre après l'achèvement des opérations de forage et de remplissage. Il est recommandé, selon le fournisseur, d'attendre plusieurs jours avant le début des mesures, de manière à ce que la sonde géothermique, le remplissage et les roches environnantes atteignent un équilibre thermique. A ce moment, le remplissage de la sonde ne peut plus être adapté à des coûts supportables.

Les longueurs, diamètres et géométries des sondes n'ont pas d'influence sur la faisabilité des méthodes. La décision d'application d'une méthode est, en règle générale, prise selon des critères économiques (coûts – utilité).

Dans le cas d'une bonne organisation, le déroulement des travaux n'est pratiquement pas touché pendant la mesure, étant donné que les équipements de mesure sollicitent relativement peu de place comparativement aux équipements de forage. Cependant le moment de la mesure est important pour le déroulement général des travaux, étant donné que les sondes ne peuvent être jusque là ni raccordées au système de distribution, ni enfouies. Les méthodes/appareils ci-dessus mentionnés se différencient par le moment de la mesure et par conséquent par sa durée. Alors que Nimo-T selon les indications des utilisateurs peut être réalisé une journée après l'achèvement des travaux de forage et qu'une mesure unique est suffisante, le Deep Drifter nécessite une seconde mesure après env. quatre semaines. Pendant ce temps, la sonde géothermique doit rester accessible verticalement. Dans le cas du TRT court, une seule mesure suffit également après le temps de prise du remplissage qui, selon le matériau, s'élève de quelques jours à environ

une semaine. Il faut en conséquence prendre en considération le fait que chaque mesure correspond à un enregistrement à un instant t . Les caractéristiques thermiques résultantes sont finalement fonction d'autres facteurs, comme par exemple le dimensionnement de l'ensemble de l'installation ou le nombre d'heures de service par an.

Aussi bien le Deep Drifter que le Nimo-T peuvent, par comparaison entre les longueurs des sondes et la différence de pression, donner des indications sur la verticalité des sondes géothermiques.

Des protocoles de forage complets, des enregistrements de profils géologiques et la réduction au minimum des influences extérieures pendant la mesure (vibrations, orages...) constituent pour toutes les méthodes et appareils des conditions préalables impératives de la faisabilité. Du point de vue technique, les mesures peuvent, en règle générale, être réalisées sans problèmes, toutefois pas par l'équipe de forage proprement dite mais uniquement par des spécialistes formés à cet effet.

Interprétation des résultats des mesures

Dans la plupart des méthodes thermiques, le temps nécessaire à l'évaluation et à l'interprétation est relativement important. Avec Nimo-T, on peut, selon les indications des utilisateurs, éventuellement avoir déjà sur le chantier une indication des caractéristiques thermiques.

Les résultats des mesures (pression et température) peuvent d'autant mieux être interprétés que l'on connaît plus d'informations supplémentaires sur le forage et le remplissage (profil géologique, protocole de forage, de compactage, de pression et de débit).

Les méthodes thermiques peuvent, pour l'essentiel, fournir la garantie que le remplissage a en principe été effectué. Cependant des conclusions sur la qualité de la liaison thermique entre les sondes et le sous-sol sont l'objet d'interprétations, étant donné qu'aucune relation simple n'existe entre le remplissage et les valeurs mesurées.

Autres remarques et expériences

Il faut observer qu'entre les opérations de forage et de remplissage d'une part et la mesure de l'autre, plusieurs jours à semaines peuvent fréquemment se passer. Dans tous les cas, au moment de la mesure, aucune modification à un coût supportable ne peut plus être entreprise sur le forage mesuré. Le cas échéant, on peut, pour les champs de sondes, tirer des conclusions sur le concept de forage des autres forages restants.

Des sondes géothermiques ont déjà été endommagées ou des capteurs ou câbles coincés par des mesures, rendant les sondes concernées inutilisables. Au cours de ces dernières années, les méthodes de mesure ont continué à se développer. Ainsi il existe depuis des capteurs sans câbles (par ex. Nimo-T). Il y a cependant, dans le cas des capteurs sans câbles, le risque qu'ils ne puissent plus être évacués si le retour de la sonde géothermique est écrasé.

Comme dans le cas du forage et du remplissage, des erreurs peuvent aussi survenir lors de la mesure ou de leur évaluation et interprétation. Les conséquences en sont dans certains cas importantes. Conformément aux indications d'acteurs les plus divers, les erreurs relatives au forage de sondes géothermiques sont généralement dues à une pression temporelle trop

importante. En particulier sur les grands chantiers, l'échéancier est généralement trop court pour des méthodes de mesure demandant beaucoup de temps.

L'utilisation de câbles de sondes de température (fibre de verre) comme autre méthode thermique a été mentionnée à différentes reprises au cours des interviews. Ces câbles sont déroulés dans le forage avec des sondes géothermiques et fournissent en continu un signal de mesure. Ils permettent en conséquence une mesure de température à long terme et plus précise.

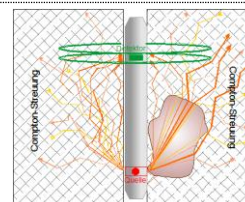
En résumé, on peut constater que, selon l'appareil, les caractéristiques thermiques du sous-sol (conductivité) peuvent être mesurées dans la zone de la sonde géothermique plus ou moins rapidement. On peut en déterminer d'autres caractéristiques d'intégrité telles que la résistance du forage. Etant donné que le remplissage proprement dit n'est qu'un des nombreux acteurs influents, des conclusions directes sur la qualité ne sont pas possibles. Les méthodes thermiques conviennent en conséquence comme outil de planification, cependant seulement de façon limitée pour le contrôle du remplissage.

Aussi bien le Test de Réponse Thermique que les méthodes p-T-log au repos sont, en règle générale, connus des acteurs du marché de la géothermie suisse et sont également appliqués par des spécialistes. Les expériences effectuées du point de vue coûts et résultats en relation avec la mesure des caractéristiques thermiques du sous-sol sont généralement positives. En revanche on a moins d'expérience sur le contrôle du remplissage par ces méthodes.


4 Méthodes radioactives

4.1 Méthode de mesure d'anomalies de densité gamma-gamma

Aperçu	
• Désignation	Mesure d'anomalies de densité gamma-gamma
• Brève description	La mesure d'anomalies de densité gamma-gamma est une méthode de mesure géophysique adaptée pour les sondes géothermiques, qui contrôle l'homogénéité de la densité du remplissage de l'espace annulaire. Les anomalies de densité du matériau de remplissage de l'espace annulaire sont détectées par la rétrodiffusion enregistrée sur le détecteur des photons gamma émis par une source.
• Prestataire	Par ex.: André Voutta Grundwasserhydraulik (D); www.avoutta.de
Champ d'application	
• Conditions géologiques	Toutes, pas de restrictions.
• Long. sondes géothermiques	Déterminée par l'accessibilité de la sonde géothermique avec la sonde de mesure
• Diamètre des sondes	> 20 mm
• Prérequis spécifiques	Respect de la réglementation nationale sur la protection contre les rayonnements
Diffusion	
• Géographique	Allemagne, en principe pas de restrictions
• Maturité	Mature
• Droits de propriété intellectuelle	Aucun
Frais	
• Coûts	env. 6€/m plus frais d'interprétation et de déplacement
• Frais matériel	1 sonde d'anomalies de densité Gamma-Gamma + l'équipement géophysique de forages
• Frais personnel	1 technicien de mesure disposant de la formation voulue dans la protection contre les rayonnements
Réalisation	
• Procédure, déroulement	Profil d'anomalies de densité Gamma-Gamma
• Durée de la mesure	1.5 h pour 100 m de sonde géothermique
• Encombrement	Treuil géophysique et compteur de mesure
• Moment	Possible à tout moment une fois le remplissage terminé
Résultat	
• Anomalie de densité	Contrôle du matériau: profil d'homogénéité de la densité du remplissage.
Précision de mesure	
• Générale	Saisie qualitative de l'homogénéité de la densité dans l'espace annulaire
• Autres données	Combiné avec TRT-C accroît la pertinence de l'interprétation



4.2 Méthode Gamma-Ray-Log (GR)

Aperçu	
• Désignation	Gamma-Ray-Log (GR), modification Gamma-Ray-Log segmentée (SGL) = mesure dans différentes directions et en conséquence preuve d'une étanchéité périphérique homogène.
• Brève description	Sonde de mesure standard de forages
• Prestataire	Réalisation de mesures sous forme miniaturisées (20 mm) ou articulées pour la mesure de forages de Storkow GmbH (www.blm-storkow.de)
	
Champ d'application	
• Conditions géologiques	Pas de roches fortement gamma-actives à proximité (par ex.: arkose)
• Long. sondes géothermiques	Illimitée, jusqu'à maximum 200 m pour des diamètres inférieurs à 35 mm
• Diamètre tube de la sonde	24 mm
• Prérequis spécifiques	Argile ou coulis de ciment-argile gamma-activés (par exemple par adjonction de sable de zircon)
Diffusion	
• Géographique	En service dans le monde entier
• Maturité	Depuis env. 1945, pour l'attestation de l'étanchéité de l'espace annulaire de prises d'eau, depuis env. 30 ans pour les points de mesure d'eaux souterraines, et dans les sondes géothermiques depuis 2005.
• Droits de propriété intellectuelle	Aucun
Frais	
• Coûts	Env. 1000 € plus déplacement
• Frais Matériel	Véhicule de mesure avec treuil
• Frais Personnel	1 spécialiste pour les mesures, évaluation par un géophysicien
Réalisation	
• Procédure, déroulement	Approche de la sonde jusqu'à la profondeur finale, la mesure intervient à env. 4 m/minute en montant
• Durée	Env. 45 minutes
• Encombrement	Une petite camionnette doit être disposée près de l'appareil de forage
• Moment	Mesure au fur et à mesure lors du compactage, mais également possible ultérieurement, possibilité de répétition même après des années
Résultat	
• Grandeurs de mesure	Rayonnements gamma naturel (API)
• Autres grandeurs	La profondeur de mesure est enregistrée
Précision de mesure	
• Données de calibrage	Calibrage dans les standards gamma sur API
• Autres données	Problème: seule la preuve du marquage gamma-actif du matériau utilisé intervient. En conséquence, bien que des lacunes de remplissage

trouvées sur la base de l'absence de signal soient identifiées, aucune indication ne peut être fournie sur la qualité du matériau de remplissage (par ex. consistance, dilution par l'eau ou balayage du forage, ou bien accumulation de matériau étranger).

Aucune preuve de l'efficacité hydraulique de l'étanchéité de l'espace annulaire. L'évaluation de la mesure ne doit si possible être effectuée que par un géophysicien expérimenté dans les forages.

4.3 Evaluation et discussion

Pour l'essentiel, on peut différencier les méthodes radioactives en deux catégories: Gamma-Ray-Log, qui mesure le rayonnement γ naturel dans le forage et Gamma-Gamma-Log dans lequel le forage est parcouru par une source de rayonnement radioactive et la rétrodiffusion mesurée. Pour détecter les vides, on utilise la caractéristique que le signal γ est proportionnel à la densité de l'environnement.

Ces méthodes sont déjà utilisées depuis un certain temps pour l'analyse des couches traversées et des cavités dans l'exploration du sous-sol. La méthode est alors appliquée dans des forages ouverts non remblayés. Pour utiliser ces méthodes pour la mesure du remplissage (par ex. son profil de densité), le logging-Sensor doit lui-même passer par le tube de la sonde. Une autre différence de principe par rapport à l'exploration du sous-sol réside dans le fait que le remplissage ne possède pas de radioactivité naturelle et doit en conséquence être dopé gamma-activement.

D'une façon générale, il faut mentionner qu'en particulier en Suisse pratiquement aucune expérience n'a encore été faite pour le contrôle du remplissage de sondes géothermiques au moyen de ces méthodes. La plupart des acteurs qui ont été interrogés dans le cadre de cette étude n'ont soit pas d'expérience avec ces méthodes, ou, à la rigueur, uniquement sur la base de travaux sur des forages ouverts en relation avec des explorations de sous-sols.

Le test dynamique aux gaz est un procédé particulier offert par Storkow GmbH qui mesure les trajectoires ascensionnelles de gaz et peut de ce fait évaluer la qualité des étanchéités de l'espace annulaire (par ex. Packer). Etant donné que cette méthode n'est pas directement en relation avec le remplissage et la liaison thermique, elle n'est pas évoquée plus en avant dans cette étude.

Aussi bien la méthode Gamma-Ray-Log (avec dopage radioactif) que la méthode Gamma-Gamma-log sont évaluées et discutées plus précisément ci-dessous.

Possibilités d'application

Les deux méthodes présentées ici sont fondamentalement applicables dans n'importe quelle géologie. Toutefois il peut exister également de grandes différences d'activité gamma dans les roches environnantes naturelles. Par exemple l'argile et les argilites possèdent un rayonnement gamma relativement élevé, alors que les grès ou calcaires ne présentent peu à pas d'activité gamma. Ceci doit être pris en considération pour ces méthodes. Des informations géologiques sur la roche environnante ont finalement une énorme importance et une influence directe sur la faisabilité de la mesure.

En définitive, la possibilité d'utiliser aussi les méthodes radioactives correspondantes pour les sondes géothermiques (profondeur importante, faible diamètre) dépend des dimensions des capteurs à mettre en place. La plage d'utilisation peut être limitée, en particulier par le diamètre relativement faible des sondes en double U. D'autre part on doit garantir qu'aucune dilution du signal γ n'intervient par l'influence de la roche environnante. En raison de diamètres plus importants, ces méthodes pourraient plutôt entrer en question pour la mesure dans des sondes coaxiales plutôt que dans des sondes duplex. Par comparaison aux travaux de forage, les mesures nécessitent relativement peu de temps et d'espace. Toutefois elles ne peuvent être effectuées que par des entreprises spécialisées avec l'intervention d'experts sur place.

Interprétation des résultats de mesure

L'intégrité et en conséquence la qualité du remplissage peut théoriquement être directement mesurée avec les méthodes radioactives en raison de la relation directe entre le signal gamma et la densité locale.

En dehors de l'incertitude déjà mentionnée ci-dessus de l'activité gamma dans la roche environnante, il faut d'autre part veiller dans l'interprétation au fait que la géométrie du forage et de la sonde est inconnue: non seulement les forages ne sont jamais parfaitement verticaux, mais les sondes géothermiques présentent aussi dans le forage une orientation plutôt aléatoire. Elles s'enroulent dans le forage autour de leur axe (spiralité) et chaque tuyau présente un écartement très variable par rapport aux autres et par rapport à l'axe du forage et en conséquence également par rapport à la paroi de celui-ci. Ceci a pour conséquence une variation constante de l'écartement entre la sonde de mesure et le centre du forage et de ce fait une variation constante du signal γ qui, dans certaines circonstances, ne peut être différenciée de lacunes effectives dans le remplissage. Ce fait peut être contré en utilisant des écarteurs pour les sondes duplex.

Même si les incertitudes ci-dessus mentionnées peuvent être exclues, il est difficile de tirer une conclusion directe de la liaison thermique effective entre la sonde géothermique et le sous-sol (dans le sens de la résistance thermique réciproque) étant donné que la liaison thermique dépend de plusieurs facteurs, comme par exemple la saturation en eau ou les caractéristiques thermiques de la roche environnante naturelle.

Autres remarques et expériences

Les méthodes radioactives sont utilisées de façon standard en Suisse dans les forages ouverts, par ex. pour les explorations de sous-sols. Par contre, les expériences correspondantes pour des systèmes de sondes géothermiques sont actuellement encore très limitées. Des mesures avec des méthodes radioactives ne peuvent être effectuées et interprétées que par des physiciens expérimentés dans les forages.

Mais en résumé on peut constater que les méthodes radioactives sont, du point de vue du procédé, intéressantes, parce que par comparaison au forage, elles nécessitent peu de place et de temps et dans la pratique peuvent être effectuées à tout moment après le remplissage. Elles peuvent en principe directement mesurer l'intégralité du remplissage si les incertitudes ci-dessus

mentionnées telles que la radioactivité de la roche environnante et la spirauté de la sonde sont exclues.

Il faut également noter pour ces méthodes qu'au moment de la mesure, le remplissage des sondes géothermiques ne peut plus être adapté à des frais supportables. Ces méthodes doivent être considérées comme des outils de contrôle et, dans le cas idéal, complétées par d'autres. Le cas échéant, dans le cas de champs de sondes géothermiques, des conclusions peuvent être tirées pour le concept de forage des autres forages.

5 Méthodes mécaniques

5.1 Méthode Digital Borehole Observation 3

Aperçu	
• Désignation	Digital Borehole Observation 3
• Brève description	Appareillage de mesure pour la surveillance digitale du processus d'étanchéité dans le forage.
• Prestataire	Dietrich, DBO-3 ou Sotronix (developpeur de Software, Industrieelektronik) www.dietrich-erdwaerme.de
Champ d'application	
• Conditions géologiques	Pas de restrictions
• Long. sondes géothermiques	Pas limitée, fonction de la sonde de pression utilisée et de sa résolution.
• Diamètre sondes	Jusqu'à aujourd'hui aucune restriction pour les diamètres actuellement utilisés
• Prérequis spécifiques	Appareil de forage adapté. Le capteur de pression est logé dans une lance d'injection.
Diffusion	
• Géographique	Allemagne, en principe pas de restrictions
• Maturité	Utilisation continue depuis 2011
• Droits de propriété intellectuelle	Deutsches Patent- und Markenamt modèle d'utilisation Nr. 20 2011 107 616.8
Frais	
• Coûts	Env. 18'000 € (prix d'achat de l'appareil)
• Frais matériel	Mise en place de l'appareillage sur l'appareil de forage, lance d'injection, datalogger.
• Frais personnel	Pas d'indication
Réalisation	
• Procédure, déroulement	L'appareillage utilisé par Dietrich permet une détermination continue du potentiel de pression, des niveaux du coulis et de l'eau dans le forage, de la profondeur des horizons de pertes, des quantités d'injection possibles, de la preuve de l'injection complète du forage.
• Durée	Pendant le compactage du remplissage
• Encombrement	Pas de place supplémentaire nécessaire étant donné que l'appareillage est monté sur l'appareil de forage
• Moment	Pendant la mise en place du remplissage
Résultat	
• Grandeurs de mesure	Pression, débit
• Autres grandeurs	En option, peut évoluer en enregistreur de données de forage
Précision de mesure	
• Données calibrage	0 – 26 bar < ± 0.5%
• Autres données	

5.2 Méthode appareil de mesure de remplissage

Aperçu

- Désignation Appareil de mesure de remplissage, HMG-K ou HMG-S
- Photo



HMG-S et HMG-K. Impression du protocole de mesure. Appareil de mesure HMG-K en service.

- Brève description Le HMG-S mesure le débit et la pression d'injection du coulis en continu.
- Prestataire Geowatt AG (Développement et location d'appareils www.geowatt.ch)

Champ d'application

- Conditions géologiques Toutes, pas de restrictions
- Long. sondes géothermiques Pas de restrictions
- Diamètre sondes Pas de restrictions
- Prérequis spécifiques Aucune

Diffusion

- Géographique Suisse, pas de restrictions
- Maturité En service depuis 2011
- Droits de propriété intellectuelle Brevet

Frais

- Coûts Env. 200 CHF par sonde + forfait initial suivant que l'appareil est enlevé et ramené et si des instructions sont encore nécessaires.
- Frais matériel 1 appareil de mesure (location) avec 2 connexions, évaluation par Geowatt
- Frais personnel 1 aide de forage sur le chantier pour l'installation et le nettoyage.

Réalisation

- Procédure, déroulement L'appareil est relié entre la pompe d'injection et la sonde par le tuyau d'injection. Pendant l'injection, les données instantanées sont affichées en continu sur l'appareil. Les données mémorisées sont automatiquement envoyées à Geowatt. Après le remplissage, l'appareil doit immédiatement être lavé à l'eau, ce qui intervient dans la même opération que le nettoyage des tuyaux d'injection.
- Durée Pendant le remplissage par injection, dépendamment de la pompe d'injection
- Encombrement Faible (voir photo)
- Moment Pendant la mise en place du remplissage

Résultat

- Grandeurs de mesure Flux du coulis, pression d'injection, densité du coulis, heure/date, en continu.
- Autres grandeurs La profondeur d'éventuelles fractures de même que le calibre du forage et l'intégrité du remplissage peuvent être déterminés à partir des données de mesure.

Précision de mesure

- Données de calibrage Les paramètres mesurés (débit, pression, densité) sont précis à env. 5%.
 - Autres données
-

5.3 Méthode Datalogger HDG EWS

Aperçu

- Désignation Datenlogger HDG EWS DT Memo
 - Photo -
 - Brève description Dans ce système, la quantité du coulis est mesurée par un débitmètre (MID) magnéto-inductif. Celui-ci est relié au datalogger qui saisit et mémorise aussi bien le débit actuel que la quantité totale de coulis. Un capteur de pression est monté sur la sonde géothermique purgée d'air et entièrement remplie d'eau, au moyen duquel la pression interne de la sonde est captée et transmise au datalogger. Grâce à une mesure de référence du premier remplissage, cette augmentation de pression est utilisée lors du remplissage suivant et d'autres facteurs le sont également pour le calcul de la profondeur du coulis et son indication sur le display.
 - Prestataire HDG Umwelttechnik GmbH (www.hdg-gmbh.com)
-

Champ d'application

- Conditions géologiques Pas de restrictions
 - Long. sondes géothermiques Pas de restrictions
 - Diamètre tubes sondes Tous
 - Prérequis spécifiques Aucune
-

Diffusion

- Géographique Allemagne, Autriche, Suisse, pas de restrictions
 - Maturité Oui
 - Droits de propriété intellectuelle Aucun
-

Frais

- Coûts Env. 18'500 € (prix d'achat de l'appareil)
 - Frais matériel Débitmètre magnéto-inductif (MID), datalogger, capteur de pression
 - Frais personnell 1 responsable appareil pour l'installation et l'interprétation
-

Réalisation

- Procédure, déroulement Voir ci-dessus
 - Durée Pendant l'injection du matériau de remplissage
 - Encombrement Minimum (coffret de mesure de même que débitmètre, max. 1 m²)
 - Moment Pendant la mise en place du remplissage
-

Resultat

- Grandeurs de mesure de la liaison thermique Pression, débit, quantité totale du coulis
 - Autres grandeurs -Profondeur
- Réalisation et documentation du contrôle d'étanchéité et de fonction selon SIA 384/6
-

- Le système de mesure comporte d'autre part les cycles de contrôle selon SSIGE E4, DVGW 400-2 pour le contrôle des conduites de raccordement horizontales et la réception finale après le processus de contraction.
- Son homologation et sa précision rendent le système utilisable pour des conduites de gaz jusqu'à PN5 .

Précision de mesure

- Données de calibrage 1 x vérification annuelle par le fabricant avec certificat d'usine
 - Autres données Satisfait les exigences DVGW/SVGW/ÖVGW et SIA, conforme CE
-

5.4 Evaluation et discussion

Sont désignés comme méthodes mécaniques les procédés qui mesurent et enregistrent les paramètres physiques tels que la pression d'injection, le débit et la densité du coulis pendant le remplissage. Elles sont aussi fréquemment intitulées méthodes volumétriques. Respectivement un appareil (groupe d'appareils) de trois fournisseurs ont été décrits dans le cadre de cette étude: le DBO-3 de HMG-S/K, de même que le Datalogger EWS (de sondes géothermiques). Il existe encore de nombreuses autres méthodes ou appareils, qui, dans leur principe, ne se différencient généralement que peu. Un exemple en est l'enregistreur p-V de Küchler Technik.

Les méthodes mécaniques présentent des avantages de principe par rapport aux autres méthodes. D'une part elles peuvent être appliquées après une première instruction par l'entreprise de forage elle-même, ce qui maintient globalement les coûts à un niveau bas. D'autre part, les méthodes mécaniques peuvent encore fournir des informations pendant le déroulement du forage, de manière à ce qu'il soit possible de réagir à temps à des problèmes d'origine géologique. Pour cette raison, les méthodes mécaniques sont considérées comme le moyen essentiel d'assurance de la qualité lors du remplissage de sondes géothermiques.

Les méthodes mécaniques de vérification du remplissage sont, il est vrai, ici et là, incluses dans l'appel d'offres, mais aussi fréquemment non réalisées pour des raisons financières. En conséquence les limites d'utilisation ne sont fréquemment pas dues à la technique mais de nature financière. Ce fait est regretté par tous les acteurs interviewés.

Possibilités d'utilisation

Les méthodes mécaniques peuvent être utilisées pour tous les diamètres de sondes et profondeurs de forage. L'adhésion (adhérence ou "collage") doit être prise en considération lors du choix de la technique de pompage du fabricant de la pompe, de même que lors du choix de la viscosité du coulis. Des informations géologiques préalables sont d'une grande utilité pour pouvoir évaluer correctement les paramètres préalablement aux travaux de forage et de remplissage. Ces facteurs constituent également les conditions préalables essentielles du bon fonctionnement des méthodes mécaniques.

Les méthodes mécaniques nécessitent peu de place et peu de temps par rapport au forage en lui-même. Pour une réalisation optimale, la mesure doit être planifiée dans le déroulement ordinaire des travaux, ce qui n'est souvent pas, ou encore insuffisamment, effectué, car les entreprises de forage n'assurent en règle générale aucune activité de coordination. Mais justement, dans le cas des méthodes mécaniques, le besoin d'organisation de l'entreprise de forage est supérieur par

rapport aux autres méthodes, étant donné qu'elle est mise en oeuvre pendant le processus de remplissage. Une fois la première instruction effectuée par le fournisseur, il faut compter, en règle générale, quelques heures supplémentaires pour une personne de l'équipe de forage.

En terme d'encombrement, une mention spéciale de l'appareil DBO-3 doit être faite, étant donné qu'il est monté sur l'appareil de forage et en conséquence ne nécessite pas de place ou de temps d'installation supplémentaire.

Interprétation des résultats des mesures

Les méthodes mécaniques fonctionnent techniquement bien. Les paramètres mesurés tels que la pression, la densité et le volume en fonction du temps sont, en règle générale, clairement définis et peuvent être enregistrés numériquement. La marge d'interprétation est en conséquence inférieure à celle des autres méthodes.

Vous pouvez immédiatement fournir la garantie que le remplissage est effectué et mesurer le volume total qui a été injecté dans le trou de forage. On reconnaît l'éventuelle perte de coulis par une comparaison avec le volume de coulis nécessaire originellement attendu. Les raisons de la perte de coulis font toutefois à nouveau partie de l'évaluation et de l'interprétation. La même chose est également valable pour l'évaluation de la liaison thermique. Actuellement il n'existe pas encore en Suisse de standards ou de normes en ce qui concerne la réalisation et l'évaluation des méthodes accompagnant le forage.

Une méthode apparentée au concept est à priori utilisée par toute entreprise de forage travaillant soigneusement: le volume escompté de coulis pour le forage correspondant est calculé avant le début du forage. Il en résulte, sur la base des indications du fabricant du matériau, le poids à sec nécessaire de matériau de remplissage. Si celui-ci s'écarte fortement de la quantité effectivement utilisée, on a affaire à une perte significative de coulis et le chef foreur est tenu de réagir de façon correspondante. Ceci nécessite une réalisation consciencieuse et un protocole précis, qui au minimum contient les informations suivantes: produit (fabricant du matériau), poids spécifique (mesuré sur un échantillon), quantité théoriquement nécessaire et totale utilisée et la question si et quand le coulis atteint le niveau supérieur du terrain.

Autres remarques et expériences avec la méthode

Pratiquement toutes les entreprises planifiant ou réalisant des travaux de géothermie en Suisse disposent d'expériences avec les équipements et appareils des méthodes mécaniques. La plupart des entreprises de forage utilisent des appareils très semblables.

Les partenaires interviewés utilisant la méthode HMG possèdent le plus d'expérience. La mesure proprement dite a, en règle générale, été évaluée positivement, toutefois avec le bémol que l'on ne pouvait pas avoir de conclusions sur la qualité du sous-sol ou la liaison thermique de la sonde.


Les méthodes mécaniques sont relativement bien acceptées par le personnel de chantier, étant donné qu'elles fonctionnent intuitivement et sont relativement faciles à comprendre. C'est d'autre part la seule des quatre catégories de méthodes qui permette une vérification du remplissage pendant le processus d'injection. Le remplissage peut encore être activement influencé si des problèmes sont effectivement identifiés, par exemple par une modification de la viscosité du coulis en ajoutant de la bentonite, l'utilisation de matériaux spéciaux tels que des pellets d'argile

thixotropiques ou également la mise en place de moyens auxiliaires tels que des manchons géotextiles ou des Packer SGV. Dans tous les cas, des forages d'essai avec mesure directe du remplissage selon les méthodes présentées ici sont recommandés dans les régions compliquées du point de vue de la technique de forage.

6 Méthodes magnétiques

6.1 Méthode magnétique - CemTrakker

Aperçu

- | | | |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Désignation • Brève description | <p>CemTrakker</p> <p>Le CemTrakker est un instrument de mesure précis pour la détection de matériaux ferromagnétiques et électriquement conducteurs. Un instrument de mesure de débit (MID) magnéto-inductif est d'autre part nécessaire.</p> <p>Exigences: protocole du processus d'injection proprement dit selon LQS Bade-Wurtemberg; protocole du matériau injecté durci.</p> |  |
| <ul style="list-style-type: none"> • Prestataire | <p>Santherr-Geothermietechnik
www.santherr-geothermietechnik.com</p> | |

Champ d'application

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Conditions géologiques • Long. sondes géothermiques • Diamètre tubes sondes • Prérequis spécifiques | <p>toutes</p> <p>Jusqu'à 250 m, peut être augmentée à 400 m à la demande du client</p> <p>Ø ext. 25 mm et plus</p> <p>Un dopage magnétique du matériau de remplissage est nécessaire, par ex.: liant de remplissage Schenk EWM-Plus ou Schwenk H-hs plus</p> |
|--|--|

Diffusion

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Géographique • Maturité • Droits de propriété intellectuelle | <p>Allemagne, Autriche, Suisse et France</p> <p>Nouvelle</p> <p>Le liant de remplissage peut être breveté</p> |
|--|---|

Frais

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Coûts • Frais matériel et matériel • Frais personnel | <p>CemTrakker env. 18'500.00 € (prix d'achat de l'appareil), MID env. 2'700.00 €</p> <p>Matériau de remplissage spécial (liant Schwenk), CemTrakker (instrument de mesure) et MID</p> <p>1 chef de forage, 1 spécialiste pour l'interprétation</p> |
|--|--|


Réalisation

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Procédure, déroulement • Durée • Encombrement • Moment | <p>Remplissage nécessaire avec du ciment marqué</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mesure avec l'instrument de mesure spécial et MID pendant la mise en place du remplissage, il est alors possible de contrôler à tout moment le niveau de remplissage du forage, le débit et le volume total du remplissage en retirant la sonde de mesure. 2. Mesure de contrôle après le remplissage ou également avant la prise horizontale. <p>Pour 1. tant que l'injection est en cours
Pour 2. env. 30 - 60 minutes selon longueur de la sonde</p> <p>1-2 m²</p> <p>Pendant la mise en place du remplissage. Mesure de contrôle ensuite ou</p> |
|---|--|

Pendant le remplissage. Mesure de contrôle après le remplissage ou aussi avant le raccordement horizontal. Mesures de contrôle ultérieures à tout moment possible.

Résultat	
• Grandeurs de mesure	Détection des matériaux ferro-magnétiques et électriquement conducteurs, par exemple du ciment marqué
• Autres grandeurs de mesure	Indication de la profondeur en m, du débit en l/min, du volume total du remplissage en m ³
Précision de mesure	
• Données de calibrage	Indication de profondeur 1-2 m
• Autres données	

6.2 Méthode magnétique-Log (MAL)

Aperçu	
• Désignation	Magnétique-Log (MAL)
• Brève description	Sonde de mesure avec treuil et enregistreur (total env. 15 kg)
• Prestataire	Société Sensys GmbH pour la sonde de mesure miniature avec treuil de câble à entraînement manuel à partir de DN 50; depuis environ 50 ans la méthode de mesure standard de Bohrlochgeophysik Bohrlochmessung-Storkow GmbH.
	
Champ d'application	
• Conditions géologiques	Pas de présence de roches ferro-magnétiques
• Long. sondes géothermiques	Env. 300 m, profondeurs plus importantes possibles sans problème
• Diamètre tube de sonde géothermique	16 mm
• Prérequis spécifiques	Argile ou coulis argile-ciment marqués magnétiquement (par ex. "liant de remplissage EWM plus" de la société Schwenk)
Diffusion	
• Géographique	Utilisée en Allemagne
• Maturité	Depuis 1990 dans les prises d'eau et points de mesure d'eaux souterraines, aussi depuis 2014 dans les sondes géothermiques
• Droits de propriété intellectuelle	Aucun
Frais	
• Coûts	Env.500 € + déplacement
• Frais matériel	Équipement miniature portable
• Frais personnel	1 spécialiste pour la mesure, évaluation par un géophysicien
Réalisation	
• Procédure, déroulement	Introduction de la sonde jusqu'à la profondeur finale, puis la mesure se fait en remontant, environ 6m/minute
• Durée	Env. 30 minutes
• Encombrement	1 – 2 m ² de surface au sol

- Moment Mesure de la montée pendant l'injection, mais également mesure ultérieure possible. Possibilité de répétition même après des années

Résultat

- Grandeurs de mesure Susceptibilité magnétique
- Autres grandeurs La profondeur de mesure est aussi enregistrée

Précision de mesure

- Données de calibrage En usine
 - Autres données Seule la preuve du marquage magnétique du matériau utilisé intervient. En conséquence les lacunes de remplissage sont détectées sur la base de l'absence de signal. Cependant aucune indication n'est fournie sur la qualité du matériau de remplissage (par ex. consistance, dilution par de l'eau et balayage du forage ou accumulation de matériaux étrangers). Aucune preuve de l'efficacité hydraulique de l'étanchéité de l'espace annulaire n'est possible. L'évaluation de la mesure est possible uniquement par un géophysicien expérimenté dans les forages.
-

6.3 Evaluation et discussion

Les méthodes magnétiques fonctionnent pour l'essentiel comme suit: le matériau de remplissage est dopé magnétiquement, c'est-à-dire que des minéraux magnétiques sont mélangés, lesquels sont alors mesurés au moyen d'un capteur. Il en résulte en conséquence de nombreuses analogies avec la méthode Gamma-Ray-log utilisant du matériau de remplissage radio-activement dopé. Dans ce cas, on utilise le signal de la susceptibilité magnétique comme proportionnel à la densité de l'environnement, ce qui permet également de détecter les vides.

Il n'existe en Suisse encore pratiquement pas d'expériences avec les méthodes magnétiques pour le contrôle du remplissage des sondes géothermiques. La plupart des acteurs qui ont été interrogés dans le cadre de cette étude n'ont soit aucune expérience avec ces méthodes, soit éventuellement uniquement sur la base de travaux sur un forage ouvert en relation avec des études de sous-sols.

Possibilités d'utilisation

Les méthodes magnétiques faisant appel aux appareils présentés sont fondamentalement utilisables dans n'importe quelles conditions géologiques. Toutefois la roche environnante ne doit pas être ferromagnétique, car sinon le signal provenant du remplissage dopé se superposerait. Ici aussi toutes les informations sur la roche environnante sont d'une énorme importance dès le stade de la planification et ont une influence directe sur la faisabilité des mesures. Le matériau de remplissage (le matériau sec) doit préalablement être magnétiquement dopé avant la mise en œuvre. Ceci signifie qu'avant le début du forage, on doit savoir que cette méthode sera appliquée. La longueur de la sonde ne joue aucun rôle déterminant.

Les mesures nécessitent relativement peu de temps et de place par rapport aux opérations de forage. Toutefois elles ne peuvent être effectuées que par des entreprises spécialisées avec l'intervention d'un expert sur place.

Interprétation des résultats des mesures

L'intégrité et en conséquence la qualité du remplissage peuvent théoriquement être directement mesurées par ces méthodes sur la base de la relation directe entre la susceptibilité magnétique et la densité locale.

De façon analogue aux méthodes radioactives, il faut également, pour les méthodes magnétiques, en dehors de l'incertitude déjà ci-dessus mentionnée de la susceptibilité magnétique dans la roche environnante, veiller, lors de l'interprétation, au fait que la géométrie de la sonde géothermique et du forage est inconnue: non seulement le forage n'est jamais parfaitement vertical, mais la sonde en elle-même possède une orientation relativement aléatoire dans le forage. Elle s'enroule dans le forage autour de son propre axe (spiralité) et chaque tuyau présente un écartement très variable par rapport aux autres et aussi par rapport à l'axe du forage et en conséquence par rapport à la paroi de celui-ci. Ceci a pour conséquence une variation constante de l'écartement entre la sonde de mesure et le centre du forage et conséquence une modification constante du signal magnétique, qui, dans certaines circonstances, ne peut se différencier de lacunes effectives du remplissage. On peut dans une certaine mesure s'opposer à cette circonstance en utilisant des entretoises (écarteurs des tuyaux des sondes géothermiques) dans le cas des sondes duplex.

Le CemTrakker représente une combinaison importante, étant donné qu'avec cet appareil il est possible d'une part de mesurer le débit et le volume du coulis de façon analogue aux méthodes mécaniques pendant le remplissage et de l'autre, de mesurer le remplissage durci effectivement pris dans le forage existant au moyen d'un enregistrement magnétique. Aucune référence n'est connue en Suisse sur cet appareil.

Même si les incertitudes ci-dessus mentionnées peuvent être exclues, une conclusion directe sur la prise thermiquement effective de la sonde géothermique avec le sous-sol (dans le sens d'une résistance thermique réciproque) reste difficile à établir étant donné que la liaison thermique dépend d'autres facteurs, comme par exemple la saturation hydraulique ou les caractéristiques thermiques de la roche environnante naturelle.

Autres remarques et expériences

Les expériences avec les méthodes magnétiques dans les systèmes de sondes géothermiques sont actuellement encore limitées en Suisse. Les mesures ne peuvent être effectuées et interprétées que par des physiciens expérimentés dans les forages.

Mais, en résumé, on peut constater que les méthodes magnétiques sont du point de vue du procédé attrayantes parce qu'elles nécessitent, par comparaison au forage, relativement peu de place et de temps et peuvent être mises en œuvre pratiquement à tout moment après le remplissage. D'autre part les incertitudes ci-dessus mentionnées telles que la susceptibilité magnétique de la roche environnante et la spiralité de la sonde étant exclues, elles peuvent en principe mesurer directement l'intégrité du remplissage. Il a en particulier été évoqué lors d'une interview un projet à Lausanne dans lequel apparemment la qualité du remplissage a de cette façon pu être indiquée pour une sonde d'une profondeur de 500 m. Il est apparu à cette occasion que la qualité du remplissage augmentait avec la profondeur. Il n'est pas possible avec le niveau

actuel des informations de répondre à la question de savoir si ceci est dû à des conditions géologiques locales ou éventuellement à une caractéristique des sondes géothermiques profondes.

Pour cette méthode également, il n'est plus possible d'adapter le remplissage de la sonde au moment de la mesure à un coût supportable. Ces méthodes doivent donc être considérées comme un outil de contrôle, dans le cas idéal, complétées par d'autres méthodes. Le cas échéant, on peut, pour les champs de sondes géothermiques, en tirer des conclusions pour le concept des forages ultérieurs.

7 Coup d'oeil à l'étranger

7.1 France

Méthodes connues et actuellement utilisées

Seules des méthodes mécaniques sont notoirement utilisées. Quelques entreprises de forage fiables y font appel pour l'assurance-qualité. Des roches principalement cristallines sont présentes dans le nord et le nord-ouest de la France. Dans ces conditions géologiques, les sondes géothermiques ne sont fréquemment pas employées en France.

Un contrôle administratif de la quantité commandée de matériau de remplissage et son utilisation effective constituerait, du point de vue des autorités, fondamentalement la méthode à recommander. Mais la faisabilité de cette méthode devrait être éclaircie dans le cadre d'un projet de recherche.

Prescriptions et directives

Il n'existe actuellement pas de directives concrètes de vérification du remplissage. Mais, à ce sujet, dans le cadre de projets de recherche, on travaille sur une nouvelle norme: "NF-X10-950 (en projet d'homologation pour 2016 – Le coulis géothermique de scellement des sondes géothermiques", de même qu'à l'idée d'une procédure de normalisation au niveau européen (uniquement projet).

Les normes suivantes existent dans le domaine de la géothermie:

- NF X10-999 (*in 2014 (révisée et autorisée)*) - Forage d'eau et de géothermie - Réalisation, suivi et abandon d'ouvrage de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages
- NF-X10-970 (*in 2011 (révisée et autorisée)*) - Forage d'eau et de géothermie - Sonde géothermique verticale (échangeur géothermique vertical en U avec liquide caloporteur en circuit fermé) - Réalisation, mise en oeuvre, entretien, abandon
- NF-X10-960 (2013) - Forage d'eau et de géothermie - Sonde géothermique verticale - Partie 2 : boucle de sonde en polyéthylène 100 (PE 100)

Des audits des entreprises de forage sont en partie effectués par les autorités locales. Le contrôle visuel du chantier, la vérification du management de la qualité et le contrôle des équipements en font partie.

D'autre part la procédure "Qualiforage" est officiellement recommandée pour les entreprises de forage (<http://www.geothermie-perspectives.fr/article/qualiforage>).

Autres remarques générales

Il existe la présomption que les entreprises de forage n'ont pas de pression à effectuer intégralement le remplissage tant qu'aucune méthode de vérification n'existe. D'autre part il ne peut être exclu que des différences apparaissent entre la planification et l'exécution et par conséquent le déroulement effectif du forage.

7.2 Allemagne (Bade-Wurtemberg)

Méthodes connues et actuellement utilisées

Toutes les méthodes mentionnées dans cette étude sont connues et aussi utilisées dans le Bade-Württemberg.

Les méthodes mécaniques sont le plus fréquemment utilisées, mais globalement plutôt rarement étant donné que c'est généralement à la demande du maître d'ouvrage ou d'un planificateur spécialisé. A l'intérieur des méthodes mécaniques, le DBO-3 est la plus largement répandue étant donné qu'elle est agréée par les LQS EWS (directive d'assurance-qualité du Bade-Wurtemberg) et peut aussi être relativement simplement utilisée par le contremaître chargé de l'appareil.

Les méthodes thermiques sont en premier lieu utilisées pour des buts de planification (TRT pour la conception de champs de sondes). On y fait rarement appel comme moyen d'assurance-qualité. Finalement elles ne peuvent dans ce but (mesure de la qualité du remplissage) que fournir des indices et, en règle générale, les résultats des mesures ne peuvent être interprétés clairement.

Par contre les méthodes magnétiques et radioactives sont rarement utilisées et, jusqu'à présent, plutôt seulement pour des buts de recherche. D'une façon générale, elles offrent une grande marge d'interprétation. Seule la méthode magnétique CemTrakker QS-Methode est autorisée dans le Bade-Wurtemberg (LQS EWS) comme moyen de mesure du remplissage, mais est en partie toujours en phase de test dans les bureaux de planification.

La qualité et par conséquent l'intégralité du remplissage peuvent être plus ou moins attestées par les diverses méthodes. Par contre la liaison thermique effective ne peut être encore qu'insuffisamment vérifiée avec les méthodes actuelles.

Prescriptions et directives

Les directives VDE et VDI sont fondamentalement applicables en Allemagne.

Une autorisation de droit d'eau est nécessaire dans le cas de profondeurs de forages <100 m. Différentes lois de gestion de l'eau sont applicables. D'autre part une confirmation selon la loi fédérale sur les mines de l'Office de la géologie, des matières premières et des mines est nécessaire pour les profondeurs de forages >100 m. En règle générale, l'autorisation prévoit que l'entreprise de forage doit présenter un certificat DVGW ou équivalent. Le DVGW effectue – comme le Bundesverband Wärmepumpe – des audits et contrôles réguliers des chantiers.

D'autre part, sont édictées dans les dispositions en règle générale, entre autres, des obligations ou recommandations dans le cas de forages de sondes géothermiques:

- La profondeur du forage est limitée à env. 160 m à 170 m.
- Un ou une géologue doit être présent en permanence sur le chantier pour la surveillance géologique.
- Des mélanges finis sous la forme de mélanges colloïdaux et non pas des mélanges de chantier doivent être fondamentalement utilisés pour le remplissage.
- La conception de champs de sondes géothermiques doit être effectuée selon un logiciel agréé.

Le contrôle est assuré par les autorités par des audits non annoncés lors desquels un fonctionnaire est présent du début à la fin du forage géothermique y compris pendant le remplissage.

Il faut compléter, au sujet de la surveillance géologique, que dans la pratique un expert n'est effectivement sur place que lorsque les conditions de sous-sol hydrauliques et géologiques sont complexes. Mais dans ce cas, l'expert doit accompagner les travaux d'injection complets si aucun système d'injection automatique n'est installé sur l'appareil de forage ou si celui-ci n'est pas opérationnel. L'accompagnement des travaux de remplissage signifie concrètement que la densité est mesurée au départ, pendant et à la fin du processus d'injection et que des échantillons de référence du matériau injecté sont pris. Le matériau livré ne doit pas spécialement être vérifié, étant donné que depuis novembre 2011 (introduction de la LQS) ne sont en majorité plus utilisés que des mélanges finis contrôlés en usine. Les mélanges réalisés sur le chantier nécessitent une attestation de leur caractère inoffensif du fabricant.

D'autre part il existe actuellement une directive contenant des instructions de travail et des tableaux de correspondance: la directive pour l'assurance-qualité du Bade-Wurtemberg (LQS) de 2011. Une nouvelle édition de la LQS est prévue pour mai 2015. Elle prévoira vraisemblablement que l'on ne pourra plus travailler qu'avec une surveillance automatisée de l'injection.

Autres remarques générales

Un projet de recherche actuellement en cours peut être résumé comme suit:

Le Ministère de l'environnement, du climat et de l'énergie du Bade-Wurtemberg a réalisé un projet de recherche sur le thème de la qualité du remplissage et de sa mesure. A cette occasion, des sondes géothermiques ont été installées à une profondeur de 35 m et remblayées de façon conforme selon les règles en vigueur. Des lacunes artificielles (défauts définis) d'une longueur d'environ 1 m ont sciemment été incorporées dans le remplissage. En plus des défauts définis, d'autres, apparus spontanément pendant le processus de remplissage, ont été escomptés. Puis le remplissage complet des sondes géothermiques de différents fournisseurs a été vérifié (sans connaissances des points de défauts) avec différentes méthodes, avec pour but d'identifier et de représenter les défauts éventuellement existants. A la fin, les sondes géothermiques ont été entièrement sorties et les lacunes artificielles de même que spontanées, enregistrées en fonction de la profondeur. Le résultat du projet de recherche a été inquiétant pour deux sortes de raisons. D'une part il a été constaté que de nombreux défauts spontanés sont apparus dans le remplissage et que, sur la totalité de la profondeur, environ 20% des sondes n'étaient pas enveloppées par le matériau de remplissage et en conséquence pas reliées thermiquement au sous-sol. D'autre part on a dû constater qu'aucun des instruments de mesure utilisés n'a pu indiquer les défauts de façon fiable, ni ceux artificiels, ni ceux apparaissant spontanément. Aucune corrélation entre les défauts effectivement existants et les résultats de mesures n'a pu être constatée. Il a en conséquence été conclu que les méthodes actuellement en vigueur ne sont pas en mesure d'indiquer la qualité du remplissage des sondes géothermiques.

D'autres études, en collaboration avec des fabricants de matériaux et des techniciens de mesure, sont prévues ou en cours.

8 Résultats essentiels et conclusions

8.1 Remarque préalable

Le présent rapport concerne les méthodes de mesure, au moyen desquelles la liaison thermique au sous-sol peut être évaluée en se basant sur la qualité du remplissage des sondes géothermiques.

Les résultats sont présentés en résumé dans ce chapitre et des conclusions en sont tirées.

8.2 Application et valeur indicative des méthodes

Les travaux effectués et les résultats des interviews montrent que:

Les méthodes thermiques:

- sont appliquées une fois les travaux de remplissage terminés
- mesurent la température en fonction de la profondeur (T-log) et/ou en fonction du temps (courbe de refroidissement), qui est une fonction du système global sonde, remplissage et sous-sol
- permettent de tirer des conclusions sur la présence d'un remplissage
- fournissent avant tout, en relation avec les forages d'essai, des informations importantes pour le dimensionnement des champs de sondes géothermiques.

Les méthodes mécaniques:

- sont utilisées pendant le processus d'injection
- mesurent la quantité, le débit du coulis, de même que la pression d'injection, indiquent les problèmes de remplissage, ce qui permet de réagir activement par une modification du matériau (viscosité, composition) ou au moyen d'adjuvants d'étanchéité.

Les méthodes radioactives:

- sont généralement utilisées après la fin de l'opération d'injection
- permettent de fournir des indications sur l'intégrité du remplissage
- le matériau de remplissage doit, dans la plupart des procédés, être préalablement enrichi pour obtenir un signal de mesure satisfaisant.

Les méthodes magnétiques:

- sont appliquées pendant et après la fin des travaux de remplissage
- identifient les lacunes
- le matériau de remplissage doit préalablement être enrichi.

L'intégrité du remplissage peut être évaluée de façon fiable avec les méthodes actuellement utilisées. A ce sujet, il faut observer que le remplissage constitue une partie du système de forage et que l'intégrité du remplissage ne constitue qu'une partie de la totalité de la résistance du forage. La résistance du forage dépend de la conductivité thermique de la roche, de celle du remplissage, de celle du matériau des sondes, des conditions de circulation du liquide caloporteur, de l'arrangement des tubes de sondes dans le forage et des transitions thermiques sur la totalité des surfaces limites (donc également entre le remplissage et les tubes des sondes).

Il n'existe actuellement pas de méthode pouvant directement mettre en évidence des lacunes à l'intérieur du remplissage existant de sondes géothermiques.

La répercussion d'un remplissage insuffisant dépend du fait que les lacunes sont remplies d'air ou d'eau. Dans le cas de la présence d'eau, la liaison thermique peut même être meilleure. Un remplissage avec de mauvaises caractéristiques thermiques est pire que l'absence de remplissage dans un sol saturé d'eau.

On ne dispose jusqu'à présent encore en Suisse que de peu d'expériences avec des méthodes magnétiques et radioactives en relation avec le contrôle du remplissage. Les expériences pratiques des planificateurs, maîtres d'ouvrages et entreprises de forage se limitent pour l'essentiel aux méthodes thermiques comme moyens de planification et aux méthodes mécaniques pour l'observation et le contrôle de l'injection.

8.3 Conclusions

Nous tirons les conclusions suivantes à partir des travaux effectués:

Informations

Des informations sur la géologie sont fondamentalement importantes. Aussi bien pour la préparation et la réalisation des opérations de forage et de remplissage que pour la réalisation, l'analyse et l'interprétation des méthodes de contrôle.

Etant donné qu'en règle générale seuls sont effectués des forages d'essai pour les champs de sondes géothermiques, il faut examiner si les informations relatives aux profils de forage existants ne pourraient pas être rendues publiques.

Organisation et assurance qualité

Les mesures d'assurance-qualité devraient être prescrites et honorées comme une prestation partielle en relation avec les travaux de forage.

Les méthodes ne nécessitent en règle générale pas de temps et d'encombrement important, mais devraient néanmoins être planifiées en temps utile dans le déroulement du forage et du chantier. Le responsable de l'appareil doit avoir la fonction de chef de chantier sur le poste de forage.

La réalisation des mesures doit être planifiée en temps utile pendant le déroulement du forage et du chantier. Les mesures doivent être simples à mettre en œuvre et ne pas nécessiter notablement de frais supplémentaires et par conséquent de temps et d'argent pour l'entreprise de forage. Les tâches, compétences et responsabilités entre tous les participants doivent être clairement définies pour l'ensemble du projet.

Des audits non annoncés devraient être effectués en plus grand nombre.

Concept de forage optimisé

Par comparaison à des sondes isolées, il existe, dans le cas de champs de sondes géothermiques, un risque élevé de dimensionnement insuffisant. Un sous-dimensionnement peut en particulier entraîner des conséquences très négatives. En conséquence la qualité du remplissage acquiert une grande importance. En s'appuyant sur les connaissances de la présente étude et en se basant sur l'expérience de dimensionnement des champs de sondes géothermiques, nous proposons la procédure suivante pour leur réalisation:

- a. Concept par un géologue / un planificateur spécialisé
- b. Forage de test accompagné par le géologue et suivi de l'injection par une méthode mécanique, y compris un datalogging
- c. Méthode thermique pour la mesure des caractéristiques thermiques du sous-sol comme base du dimensionnement de l'ensemble de l'installation
- d. Dimensionnement sur la base des caractéristiques thermiques mesurées du sous-sol et planification de l'ensemble de l'installation, le cas échéant avec un concept de forage adapté sur la base des connaissances acquises dans le processus d'injection du forage de test
- e. Forage et réalisation de l'ensemble de l'installation
- f. Si l'installation de sondes géothermiques ne fonctionne pas comme escompté et s'écarte des données d'exploitation attendues, ou même si des dommages surviennent, d'autres méthodes telles que celles radioactives ou magnétiques (dans le cas d'un dopage) peuvent être utilisées pour en déterminer les causes.

Questions en suspens

La responsabilité des dommages ou des installations ne fonctionnant pas de façon efficace n'est pas éclaircie.

Dans quelle mesure les résultats des méthodes d'essai sont-ils juridiquement valables?

Il existe, avec la norme SIA 384/6, une norme de réalisation et d'aménagement des forages. Mais les méthodes de mesure et de contrôle, de même que l'ensemble du domaine des raccordements horizontaux ne sont que faiblement pris en considération.

Annexes 1 Liste des partenaires interviewés

Organisation **Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg**
Nom, prénom Bruno Lorinser
Fonction Ref. 64 Erneuerbare Energien
Rue N° Kernerplatz 9
NPA, lieu 70182 Stuttgart
Adresse internet <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/geothermie>

Organisation **Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)**
Nom, prénom Monnot Pascal
Fonction Commission de normalisation
Rue N° 3 Av. Claude-Guillemin, BP 36009
NPA, lieu 45060 Orléans Cedex 2
Adresse internet www.brgm.fr

Organisation **Services Industriels de Lausanne**
Nom, prénom Barone Francesco
Fonction Ingénieur en énergétique
Rue N° Place Chauderon 23
NPA, lieu 1002 Lausanne
Adresse internet www.lausanne.ch/de/thematiques/services-industriels.html

Organisation **Heinz Burkhardt GmbH & Co. KG**
Nom, prénom Sonnenfroh Florian
Fonction Dipl. Geologe
Rue N° Tulpenstr. 15
NPA, lieu 75389 Neuweiler
Adresse internet www.burkhardt-erdwärme.de

Organisation **Progeo GmbH**
Nom, prénom Hansjakob Schächli
Fonction Inhaber
Rue N°. Hofbergstrasse 29
NPA, lieu 9500 Wil
Adresse internet www.progeo.ch

Organisation **e-therm ag**
Nom, prénom Markus Graf
Fonction Leiter Technik
Rue N°. Postgässli 23
NPA, Lieu 3661 Uetendorf
Adresse internet www.e-therm.ch/de

Organisation **Augsburger Forages SA**
Nom, prénom Marco Neva
Fonction Leiter Administration
Rue N°. Route d'Yvonand 2
NPA, Lieu 1522 Lucens
Adresse internet www.af-sa.ch

Organisation **Amt der Hochbauten Stadt Zürich**
Nom, prénom Dr. Wagner Roland
Fonction Projektleiter Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik
Rue N°. Lindenhofstrasse 21
NPA, Lieu 8021 Zürich
Adresse internet www.stadt-zuerich.ch/hbd

Organisation **Energie 360° Erdwärme AG**
Nom, prénom Ralph Weber
Fonction Geschäftsführer
Rue N°. Bionstrasse 4
NPA, Lieu 9015 St. Gallen
Adresse internet www.energie360.ch bzw. www.erdwaerme-ag.ch