

Mécanismes de transfert de charges dans les remblais sur cavités renforcés par géotextiles : approches expérimentales et numériques

Load transfer mechanisms in geotextile-reinforced embankments overlying voids: experimental and numerical approaches

Huckert A., Garcin P.
Egis Géotechnique, Grenoble, France

Villard P., Briançon L.
Laboratoire 3SR, Grenoble, France

Auray G.
Texinov, La Tour-du-Pin, France

RÉSUMÉ : Le dimensionnement des remblais renforcés par géosynthétiques sujets à cavités potentielles reste problématique dans la mesure où il fait appel à des mécanismes encore peu compris ou quantifiés, tels que les transferts de charge au sein de l'ouvrage. Des expérimentations en vraie grandeur ont ainsi été menées sur des remblais granulaires non cohésifs afin de compléter les connaissances actuelles sur le sujet. Les grandeurs mesurées sont ici confrontées aux résultats de simulations numériques obtenus à partir d'un modèle couplant les méthodes finies et discrètes. Ainsi, les mesures expérimentales de déflexion et de déformation du géosynthétique valident le modèle numérique. Ce modèle numérique permet alors d'appréhender avec pertinence les mécanismes de report de charge vers les bords de la cavité.

ABSTRACT : The design of geosynthetic-reinforced embankments prone to sinkholes raises questions linked to the complexity of various mechanisms that remain still not well understood or quantified, like load transfers inside the structure. Hence full-scale experiments were led on non-cohesive granular embankments in order to complete the current knowledge on the subject. Measurements are then confronted to the results of numerical simulations obtained thanks to a numerical model coupling both finite and discrete elements methods. Experimental deflexions and strains of the geosynthetic thus validate the numerical model, which is then used to get a better understanding of the load transfers towards the edges of the cavity.

MOTS-CLÉS: cavités, renforcements géosynthétiques, remblai, simulations numériques, expérimentations en vraie grandeur

KEYWORDS: sinkholes, geosynthetic reinforcement, embankment, numerical simulations, full scale experiment

1 INTRODUCTION

L'aménagement de nouvelles infrastructures de transport routier et ferroviaire est contraint lors de la traversée de régions où les terrains présentent de faibles caractéristiques mécaniques ou sont sujets à la formation de cavités remontant vers la surface. C'est particulièrement le cas des régions karstiques, ou sur les emplacements d'anciennes exploitations minières. Parmi les solutions de renforcement possibles, l'utilisation de géosynthétiques est une technique économique, à la mise en œuvre relativement simple. Cette solution permet de limiter les tassements en surface du remblai à des valeurs acceptables lors de la formation d'une cavité à sa base. Le dimensionnement de tels ouvrages reste néanmoins problématique car leur comportement est régi par des mécanismes complexes combinés tels que : comportement en membrane, effet voûte et transferts de charge au sein du remblai.

Les premiers travaux français effectués sur le sujet font partie intégrante du projet de recherche R.A.F.A.E.L (Renforcement des Assises Ferroviaires et Autoroutières contre les Effondrements Localisés) (Gourc et al. 1999). Ils ont donné lieu à une méthode de dimensionnement largement répandue (Blivet et al. 2001), reformulée et complétée (Villard et al. 2002, Briançon et al. 2006, Villard et al. 2008). Malgré tout, différents mécanismes tels que la répartition des charges sur la nappe géosynthétique, le foisonnement du matériau de remblai ou l'influence d'un renforcement au comportement non linéaire restent peu compris.

Afin de compléter les connaissances sur le sujet, des études expérimentales et numériques sur des remblais granulaires ou des couches de sols traitées à la chaux ont été menées dans le cadre d'un projet de recherche FUI GéoInov. Ce projet, intitulé « Conception de géosynthétiques hautes performances sous

contraintes environnementales » regroupe des industriels, des géotechniciens et des chercheurs dans l'optique d'optimiser le dimensionnement et les propriétés mécaniques des renforts géosynthétiques sur cavités. Il est co-labellisé par les pôles de compétitivité Techtera (Technical Textiles Rhône Alpes) et Fibres dans le cadre du 10^e appel à projets de la DGIS (Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services). Seule une synthèse des principaux résultats se référant aux matériaux de remblais granulaires est présentée ici.

2 EXPÉRIMENTATION EN VRAIE GRANDEUR

2.1 Principe et présentation des expérimentations

Afin de prendre en considération le caractère évolutif des remontées de fontis en surface (INERIS 2007) nous avons réalisé des expérimentations en vraie grandeur simulant l'ouverture progressive et concentrique d'une cavité circulaire sous un remblai renforcé à sa base par un géosynthétique. Pour ce faire, un dispositif expérimental composé d'une buse, d'une trappe, de chambres à air de grandes dimensions et de billes d'argiles, est implanté sous le remblai renforcé (Figure 1). La vidange progressive des billes d'argile et des chambres à air depuis un regard de visite permet l'ouverture de la cavité à des diamètres croissants. Une fois le dispositif mis en place, la plateforme de travail est nivelée. Le géosynthétique est alors posé et un remblai de grave roulée lavée 20/40 mm est élevé à une hauteur de 1,2 m environ.

La cavité est alors ouverte de manière concentrique en trois étapes : 0,5 m, 1 m puis 2,2 m de diamètre. Seul le diamètre

final de 2,2 m est bien maîtrisé, les diamètres d'ouvertures intermédiaires ne sont pas parfaitement contrôlés.

Après la vidange complète de la cavité un délai de 20 jours a été respecté pour permettre une stabilisation des mécanismes de transferts de charge. Par la suite, la déflexion de surface a été comblée et des essais de chargement réalisés. Ceux-ci ont consisté aux passages répétés d'une pelle mécanique permettant d'appliquer une surcharge de 1t au droit de la cavité. Au total, 10 allers-retours ont été réalisés.



Figure 1. Installation du dispositif expérimental permettant l'ouverture progressive et concentrique d'une cavité circulaire sous le niveau du remblai renforcé.

2.2 Plots expérimentaux et matériaux mis en place

Deux plots expérimentaux ont été réalisés, chacun mettant en œuvre des renforcements géosynthétiques de nature différente : un géosynthétique au comportement linéaire sur le plot GR1 et un géosynthétique de raideur plus faible et au comportement non linéaire sur le plot GR2. Ces renforcements sont volontairement sous-dimensionnés afin que des mesures significatives de tassements de surface, de déformation, ou de déflexion de la nappe géosynthétique, puissent être observées.

Un soin particulier a été apporté à la caractérisation en laboratoire des matériaux utilisés (Tableau 1). Les sols ont été caractérisés par une campagne d'essais à la grande boîte de cisaillement (0,3 m x 0,3 m) selon la norme NF P94-071, et les géosynthétiques ont été testés par des essais de traction selon la norme NF EN ISO 10319.

Tableau 1. Caractéristiques des matériaux sur les plots expérimentaux

Plot	Remblai			Géosynthétique		
	γ (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ_{sol} (°)	Type	$J_{e=3\%}$ (kN/m)	$\delta_{remblai/gy}$ (°)
GR1	15,5	0	36	GSY ₁	2988	23
GR2	15,5	0	36	GSY ₂	Non linéaire	30*

* Valeur estimée

2.3 Instrumentation

Une instrumentation spécifique est mise en place sur les plots expérimentaux. Une campagne de mesures topographiques permet d'évaluer les tassements de surface au cours des différentes étapes expérimentales. Lorsque la cavité est totalement ouverte, ces mesures sont complétées par des mesures manuelles de tassements de surface à la règle graduée.

La déflexion du géosynthétique est évaluée en cours de l'ouverture des cavités par des investigations au radar géologique. Un suivi par fibres optiques des déformations des renforcements géosynthétiques a également été réalisé.

Ces mesures sont complétées par l'installation de capteurs de pression totale sous les nappes géosynthétiques, en bord de cavité, qui permettent d'appréhender les reports de charge au sein du remblai. On note que les résultats de mesure obtenus sont soumis à la précision des différents dispositifs de mesure,

eux-mêmes contraints par les conditions de chantier et la taille relativement importante des particules du remblai granulaire.

3 SIMULATIONS NUMÉRIQUES: COUPLAGE ENTRE ÉLÉMENTS DISCRETS ET ÉLÉMENTS FINIS

Le modèle numérique (Villard et al. 2009) est basé sur un couplage entre les méthodes éléments discrets et éléments finis, qui sont utilisées respectivement pour décrire le comportement du sol granulaire et du renforcement géosynthétique.

Le remblai granulaire est simulé par un ensemble de 15000 clusters d'élancement 1.5 (constitués de deux sphères enchevêtrées) qui interagissent entre eux en leurs points de contact. Les particules du milieu granulaire sont mises en place à une porosité donnée par une procédure d'expansion qui garantit un contrôle très précis de leur agencement (Salot et al. 2009) et de leurs propriétés mécaniques. Les paramètres du modèle influant sur le comportement du matériau granulaire sont les raideurs normales et tangentielles de la loi de contact, l'angle de frottement microscopique, l'agencement et la forme des particules. Les paramètres micro mécaniques sont déterminés sur la base d'essais triaxiaux numériques de sorte que soient restituées les propriétés mécaniques de la grave roulée utilisée pour les expérimentations (notamment l'angle de frottement interne). L'utilisation d'éléments discrets permet de prendre en considération des mécanismes complexes tels que les grands déplacements, les rotations, le foisonnement et les transferts de charge.

Les éléments finis utilisés pour décrire le comportement du géosynthétique sont des éléments triangles à 3 nœuds de faible épaisseur (3200 éléments) qui permettent de décrire la nature fibreuse et les directions de renforcement de la nappe (Villard et Giraud 1998), tout en reproduisant son comportement en membrane et en tension. De fait, aucun effort de flexion ou de compression n'est considéré dans les fibres. L'interaction entre les éléments de sol et de la nappe est gérée par des lois de contact similaires à celles utilisées entre les particules de sol et permettent de restituer parfaitement le comportement d'interface.

Au final, le modèle numérique illustré en Figure 2 tient compte des caractéristiques géométriques et mécaniques des expérimentations en vraie grandeur. Il comprend un matelas granulaire à la base duquel est interposée une nappe géosynthétique. Des sphères de petit diamètre positionnées sous la nappe géosynthétique simulent l'action d'un sol support élastique. C'est le contrôle de la position des sphères support au niveau de la cavité qui permet de simuler son ouverture progressive. Pour des raisons de symétrie un quart du problème est considéré.

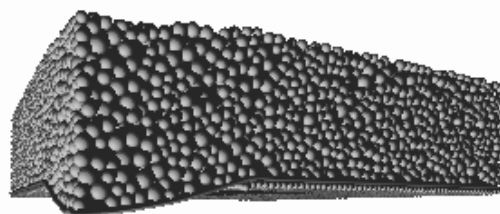


Figure 2. Aperçu du modèle numérique.

On notera enfin que ce modèle permet une large exploitation des données : les déplacements, les forces de contact et les contraintes au sein du matelas granulaire ; les tensions, les déformations et les déplacements du renfort géosynthétique, ainsi que les forces d'interaction entre le sol et le géosynthétique, et ce à chaque étape d'ouverture de la cavité. La Figure 3 permet de mettre en évidence les mécanismes de transfert de charge et notamment les rotations des contraintes principales au bord de la cavité.

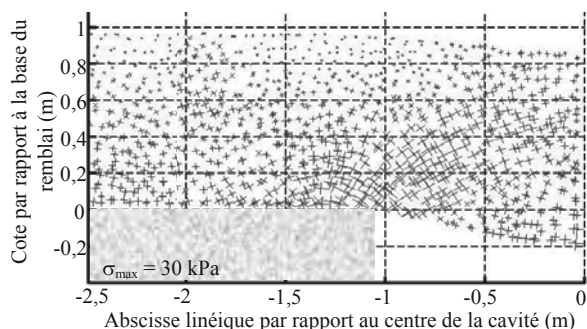


Figure 3. Aperçu en coupe des contraintes principales au sein d'un remblai de 1 m de haut renforcé par un géosynthétique de raideur 3000 kN/m, sur une cavité de 1,1 m de rayon.

4 CONFRONTATION ENTRE RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX, ANALYTIQUES ET NUMÉRIQUES

4.1 Outils d'analyse analytique

La méthode analytique utilisée à titre de comparaison avec les résultats expérimentaux et numériques a été établie par Villard et Briançon (2008) pour les remblais granulaires non cohésifs. Le problème est considéré en deux dimensions (déformations planes). Le géosynthétique est renforcé dans la direction longitudinale (le sens du trafic) et son comportement en tension est décrit par une loi linéaire élastique : $T = J \cdot \varepsilon$, où T , J et ε sont respectivement la tension, la raideur et la déformation de la nappe. Le comportement d'interface entre le renforcement et le sol est régi par une loi de frottement élastique-plastique de Coulomb. La non linéarité du comportement du géosynthétique peut être grossièrement approchée en utilisant une raideur sécante calculée dans la section de nappe la plus sollicitée.

La distribution des contraintes sur le géosynthétique au droit de la cavité et en zone d'ancrage est supposée uniforme. Trois mécanismes sont pris en compte pour le dimensionnement : la mobilisation du frottement en zone d'ancrage, l'effet membrane au droit de la cavité, et le changement d'orientation de la nappe sur le bord de la cavité.

4.2 Flèche du renforcement géosynthétique

Les Figures 4 et 5 illustrent les déplacements verticaux des géosynthétiques sur les plots GR1 et GR2 après ouverture de la cavité à 2,2 m de diamètre. Ces données sont estimées numériquement ou analytiquement, ou calculées à partir des mesures expérimentales de positionnement du géosynthétique au radar géologique. On note que les mesures expérimentales au radar géologique ont donné lieu à une interprétation minutieuse des données dont la précision est toutefois estimée à ± 2 cm. À partir de la déformée de la nappe géosynthétique et des déflexions de surfaces on peut estimer le coefficient de foisonnement du sol à environ 1.03 sur les deux plots.

En règle générale (Figures 4 et 5) pour une cavité de 2,2 m de diamètre, les ordres de grandeur des flèches des géosynthétiques sont assez semblables que l'on considère les résultats expérimentaux, numériques ou analytiques. Les résultats obtenus sont une flèche numérique de 20,3 cm pour une flèche analytique de 21,7 cm et une mesure expérimentale de 20 cm environ sur le plot GR1. Sur le plot GR2, l'estimation numérique de la flèche est de 38,2 cm pour un calcul analytique de 30,9 cm et une mesure expérimentale de 35 cm environ.

On constate (Figures 4 et 5) que les courbes expérimentales sont légèrement décalées par rapport aux courbes numériques et analytiques. Les mesures expérimentales ayant été effectuées en conditions de chantier, les profils de mesure peuvent être légèrement désaxés, ce qui expliquerait les différences entre flèches numériques, analytiques et expérimentales observées sur les plots GR1 et GR2.

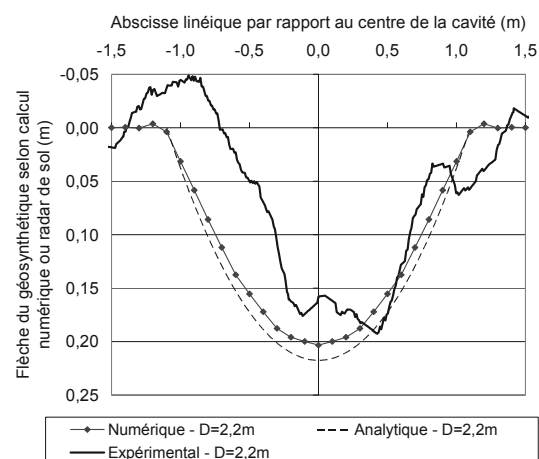


Figure 4. Plot GR1 – Déplacements verticaux du géosynthétique après ouverture de la cavité.

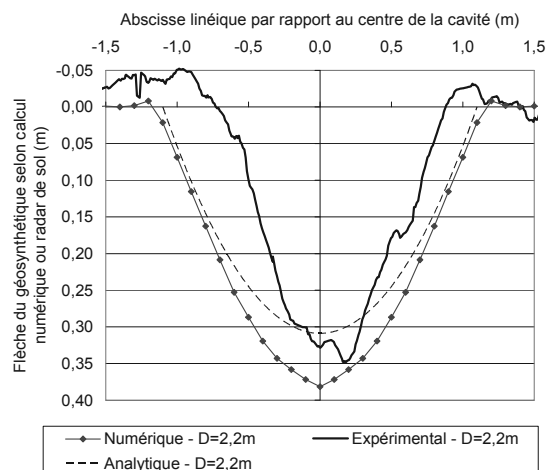


Figure 5. Plot GR2 – Déplacements verticaux du géosynthétique après ouverture de la cavité.

En comparant les résultats analytiques et numériques sur le plot GR1, on constate que la méthode analytique utilisée permet une bonne estimation des valeurs de déflexions de la nappe. Les différences constatées avec les résultats numériques peuvent s'expliquer par une mauvaise prise en compte des mécanismes de reports de charge dans la méthode analytique (hypothèse d'une charge uniformément répartie) qui peuvent être plus complexes dans la réalité. Sur le plot GR2 les écarts entre les résultats analytiques et numériques sont plus prononcés. Une explication est que la méthode analytique suppose un comportement linéaire du géosynthétique (ou l'utilisation d'un module sécant approchant) alors que le modèle numérique tient compte de manière très réaliste du comportement non linéaire.

4.3 Déformation du renforcement géosynthétique

Une comparaison des mesures expérimentales de déformation de la nappe géosynthétique par fibre optique avec les résultats de déformation des simulations numériques et des calculs analytiques est présentée sur la Figure 6. On constate pour le plot GR1 (Figure 6) que les mesures expérimentales effectuées sur une cavité de 2,2 m de diamètre sont bien corrélées aux prédictions numériques. Les résultats du calcul analytique se corrélaient également assez bien aux résultats expérimentaux en zone d'ancrage. En revanche, au droit de la cavité, les déformations analytiques sont supérieures aux valeurs numériques et expérimentales, ce qui reste logique puisque la flèche analytique est plus importante sur le plot GR1 (Figure 4).

Au final, on retient les valeurs de déformations suivantes au droit de la cavité de 2,2 m de diamètre : 1,02 % pour les résultats numériques, 1,07 % sur les mesures expérimentales, et 1,4 % par la méthode analytique. Là encore on peut attribuer les différences observées par une prise en compte des reports de charge analytiques différant de la réalité.

Sur le plot GR2 (Figure 6), les valeurs expérimentales des déformations n'ont pu être correctement enregistrées en raison des forts déplacements observés lors de l'ouverture de la cavité à un diamètre de 2,2 m. Les valeurs de déformation à retenir sont, pour une cavité de 2,2 m de diamètre : 3,06 % pour les résultats numériques, et 3,23 % par la méthode analytique. Ces valeurs sont plus élevées que sur le plot GR1, la raideur du renforcement géosynthétique du plot GR2 étant plus faible.

Enfin, les différences de comportement en zone d'ancrage constatées sur le plot GR2 entre les méthodes numériques et analytiques peuvent s'expliquer de deux manières différentes : la prise en compte du caractère non linéaire du renforcement dans la méthode analytique par des modules sécants identiques dans chaque section de la nappe (d'où des raideurs surestimées dans les zones d'ancrages) ; ou une mauvaise approximation analytique des mécanismes de transfert de charge (répartition réelle des contraintes non uniforme, ou mal évaluée). Les différences entre mécanismes de transfert de charge peuvent encore s'expliquer par la non considération du caractère progressif de la formation de la cavité par la méthode analytique, alors que la simulation numérique en tient compte.

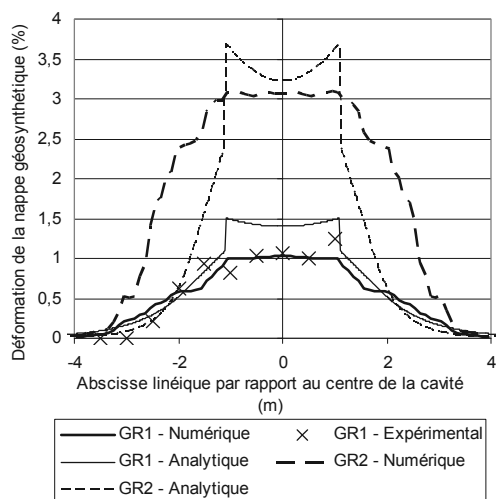


Figure 6. Plot GR1 – Déformations des géosynthétiques pour une cavité de 2,2 m de diamètre.

5 CONCLUSION

Des expérimentations en vraie grandeur permettant de reproduire l'ouverture concentrique d'un fontis sous un remblai renforcé à sa base par un géosynthétique ont été menées. L'instrumentation mise en place a pu être testée en conditions de chantier. Si les capteurs de pression totale ou la mesure de fibre optique n'ont pas pleinement joué leur rôle, respectivement pour des soucis d'implantation ou de capacité de mesure, les relevés topographiques et mesures de tassement ont été performants. Après un calage topographique minutieux, le radar géologique donne lui aussi des résultats très satisfaisants.

Les mesures ont été confrontées aux résultats des simulations numériques effectuées selon un modèle couplant éléments finis et éléments discrets, avec une correspondance relativement bonne. Après ouverture de la cavité et équilibre des plots, les valeurs expérimentales et numériques de déflexion et de déformation de la nappe géosynthétique sont relativement bien corrélées, ce qui montre l'intérêt du modèle numérique pour ce type d'application.

Les résultats numériques et expérimentaux ont été analysés avec la méthode analytique de dimensionnement la plus récente (Villard et Briançon, 2008). Il en ressort que si les résultats analytiques sont comparables aux données expérimentales et numériques, cette méthode peut néanmoins être optimisée. En effet l'hypothèse analytique des transferts de charge du remblai sur le géosynthétique semble perfectible. De même des développements complémentaires pour une meilleure prise en considération d'un comportement non linéaire du géosynthétique semblent nécessaires. Des travaux numériques sont engagés dans ce sens afin de préciser les mécanismes de report de charge au sein du remblai.

6 REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier les pôles de compétitivité Techtera et Fibres, les enseignants-chercheurs Fayçal Rejiba et Albane Saintenoy des universités Paris 6 et Paris 11 pour les mesures et l'analyse des données du radar géologique, la société de terrassement Carrey TP pour le prêt du terrain, l'IUT1 de Grenoble pour le prêt du matériel topographique, ainsi que la société Texinov, pilote du projet GéoInov, pour la conception et la caractérisation des géosynthétiques testés.

7 RÉFÉRENCES

- Blivet J.C., Khay M., Gourc J.P., Giraud H. 2001. Design considerations of geosynthetic for reinforced embankments subjected to localized subsidence. Proceedings of the Geosynthetics'2001 Conference, February 12-14, 2001, Portland, Oregon, USA, 741-754.
- Briançon L., Villard P. 2006. Dimensionnement des renforcements géosynthétiques de plates-formes sur cavités. *Revue Française de Géotechnique*, n° 117, 4^e trimestre 2006, pp 51-62.
- Briançon L., Villard P. 2008. Design of geosynthetic reinforcements of platforms subjected to localised sinkholes. *Geotextiles and Geomembranes*, Volume 26, 5: 416-428.
- Gourc J.P., Villard P., Giraud H., Blivet J.C., Khay M., Imbert B., Morbois A., Delmas P. 1999. Sinkholes beneath a reinforced earthfill – A large scale motorway and railway experiment. In proceedings of Geosynthetics' 99, Boston, Massachusetts, USA, 28-30 April 1999, 2: 833-846.
- INERIS 2007. Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : Surveillance – traitement. Guide technique / Rapport d'étude INERIS-DRS-07-86042-02484A.
- Salot C., Gotteland Ph., Villard P. 2009. Influence of relative density on granular materials behavior: DEM simulations of triaxial tests. *Granular Matter* Vol. 11, N° 4, pp. 221-236.
- Villard P., Giraud H. 1998. Three-Dimensional modelling of the behaviour of geotextile sheets as membrane. *Textile Research Journal*, Vol. 68, N° 11, November 1998, pp. 797-806
- Villard P., Gourc J.P., Blivet J.C. 2002. Prévention des risques d'effondrement de surface liés à la présence de cavités souterraines: une solution de renforcement par géosynthétique des remblais routiers et ferroviaires. *Revue Française de Géotechnique*, 99: 23-34.
- Villard P., Briançon L. 2008. Design of geosynthetic reinforcements of platforms subjected to localized sinkholes. *Canadian Geotechnical Journal*, volume 45, 2: 196-209.
- Villard P., Chevalier B., Le Hello B., Combe G. 2009. Coupling between finite and discrete element methods for the modeling of earth structures reinforced by geosynthetic. *Computers and Geotechnics* (2009), doi:10.1016/j.compgeo.2008.11.005