

Expérience rwandaise dans les ouvrages de soutènement en sol renforcé

Rwandese experience in retaining structures with reinforced soil

Laurent Sakou¹, Johann Bruhier², ARAB Rabah³, Robert Medjo⁴, Peter Assinder⁵

¹ Huesker Synthetic GmbH, Germany; Email: sakou@huesker.de

² Huesker SAS, France; Email: johann.bruhier@huesker.fr

³ Huesker SAS, France; Email: rabah.arab@huesker.fr

⁴ Cameroonian committee of geotechnical engineering (CNGC), Cameroon; Email: medjoekorobert@yahoo.com

⁵ Huesker Synthetic GmbH, Germany; Email: assinder@huesker.com

RESUMÉ - Les géosynthétiques (étymologiquement, matériaux synthétiques utilisés en contact avec les sols) sont des produits apparus dans les années 50. Ils sont utilisés de nos jours dans tous les domaines du Génie Civil. Rares sont les chantiers/projets où leurs propriétés de séparation, de filtration, de drainage, de confinement, de contrôle érosif ou de renforcement ne sont pas mises à profit pour régler les problèmes de venue d'eau, de contamination des sols et nappes phréatiques, de colmatage ou de renforcement. Malgré ces applications nombreuses, courantes et prouvées sur les plans techniques, économiques et environnementales, les géosynthétiques restent des matériaux peu utilisés par les maîtres d'œuvre, les entrepreneurs, les bureaux d'études, les instituts et écoles d'ingénieries en Afrique et plus particulièrement en Afrique Subsaharienne. Des tentatives d'explication peuvent être liées au mot "synthétique" qui porte généralement auprès du public une connotation négative qui a été donnée au mot "plastique", et aussi la non-implémentation jusqu'ici de l'apport des géosynthétiques dans les programmes de formation des ingénieurs en Afrique en général. Les géosynthétiques étant la plupart du temps incorporés à un sol pour former une espèce de « géostructure » nécessitent une connaissance appropriée de leurs modes d'actions, de leurs dimensionnements (ULS, SLS) qui sont intimement liés non seulement aux propriétés géologiques et géotechniques des sols en place et des matériaux de remblayage utilisés, mais aussi aux propriétés du géosynthétique choisi.

Le présent article présente les différentes fonctions que peuvent assurer les géosynthétiques dans le Génie Civil. La fonction de renforcement dans les ouvrages de soutènement est illustrée. Un cas pratique d'ouvrage de soutènement en sol renforcé au Rwanda dans le cadre de la réhabilitation de l'autoroute joignant Ruhengeri à Gisenyi est illustré. Le challenge et les objectifs, la conception et le dimensionnement, les dispositions constructives prises pour les ouvrages de soutènement en sol renforcé dans le projet sont présentés.

Mots clés: Mur de soutènement, sol renforcé, renforcement, dimensionnement

ABSTRACT - Geosynthetics (etymologically, synthetic materials used in contact with soils) are products which started to emerge in the 1950s. Nowadays they are used in many areas of civil engineering and it is rare to see sites/projects where their separation, filtration, drainage, containment, erosion control or reinforcement properties are not used to overcome various problems including water flow, contamination of soil and groundwater, clogging and reinforcement. Regardless of the current and proven geosynthetic applications in technical, economic and environmental plans, geosynthetics remain little used by main contractors, sub-contractors, consultants, engineering institutes and schools in Africa and particularly in Sub-Saharan Africa. Attempts at an explanation to why their usage is not so prevalent in Africa may be linked to the word "synthetic" which usually carries to the public a negative connotation that has been given to the word "plastic", and also the non-implementation to date of the geosynthetics contribution in the engineering education programs in Africa in general. Geosynthetics being usually incorporated into the soil to form a kind of "geostructure" require appropriate knowledge of their modes of actions, their designs analysis (ULS, SLS), which are closely related not only to the geological and geotechnical properties of the soils in place and the backfill materials used, but also to the properties of the selected geosynthetic.

This article introduces the different functions of geosynthetics in civil engineering. The function of reinforcement in reinforced soil retaining structures is illustrated. A practical case of a reinforced soil retaining structure in Rwanda as part of the rehabilitation of the highway joining Ruhengeri to Gisenyi is illustrated. The challenges, objectives, conception and design methodologies, together with the construction details for the reinforced soil retaining structure for the project is presented.

Keywords: retaining wall, reinforced soil, reinforcement, design

1. INTRODUCTION: FONCTION DES GEOSYNTHETIQUES

Les géosynthétiques comprennent une variété de matériaux en polymères synthétiques (Polyester PET, Polyvinylalcool PVA, Polyamide PA, Polyéthylène PE, Polypropylène PP) spécialement manufacturés pour être utilisés dans les différents domaines du génie civil (terrassements et fondations, génie environnementale, génie hydraulique, etc...). Ces géosynthétiques sont appelés, en fonction de leurs caractéristiques mécaniques, leurs structures et/ou de leurs modes d'assemblage, à remplir diverses fonctions telles que séparer, filtrer et/ou drainer, confiner, protéger, renforcer. Dans la plupart du temps, ces fonctions peuvent être combinées en fonction du type et des exigences de l'ouvrage. Dans le cadre des ouvrages de soutènement en sol renforcé par les géosynthétiques, la fonction primaire requise à assurer par les géosynthétiques est la fonction de renforcement. Les autres pouvant être classées comme secondaires.

Fonction de renforcement dans les ouvrages de soutènement

Contrairement aux sols, les géosynthétiques/géogrilles disposent d'une résistance en traction élevée. Leurs propriétés de contact et de frottement avec les sols (interaction sol/géosynthétique) permettent à ces matériaux d'assurer à la fois une bonne transmission et une répartition optimale des contraintes/charges avec le milieu environnant. L'insertion des nappes géosynthétiques dans un remblai permet de renforcer globalement l'ouvrage (mur de soutènement, culée de ponts, viaduc, etc.). Les géosynthétiques de renforcement permettent dès lors la construction des remblais à grande hauteur avec des parements presque verticaux. La figure 1 présente une coupe transversale typique d'un ouvrage de soutènement en sol renforcé par des géogrilles.

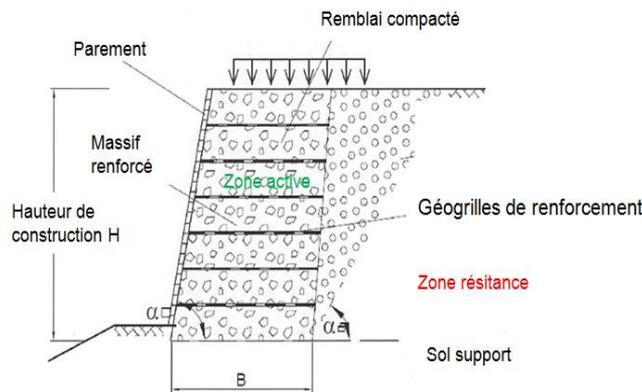


Figure 1. Coupe transversale d'un ouvrage de soutènement en sol renforcé par des géogrilles

2. REMBLAI RENFORCÉ SUR LA ROUTE RUHENGERI-GISENRYI, RWANDA

2.1 Situation générale / Challenge

La route Ruhengeri à Gisenyi dans le nord-ouest du Rwanda est la principale voie de transit des marchandises vers la République démocratique du Congo (RDC). Cette route traverse une région montagneuse. Il est important de mentionner que la route originale a été construite il y a environ 30-40 ans. L'augmentation du volume du trafic des poids lourds et la détérioration générale de l'état de la route existante ont entraîné des ruptures et des déplacements en bordure de chaussée sur une section de la voie principale. Par ailleurs, certaines parties de cette section de la chaussée présentent une largeur de chaussée insuffisante et un manque de structure de sécurité appropriée.

2.2 Objectifs et Solution retenue

Le financement a été obtenu de la commission européenne avec comme principal objectif l'amélioration de la qualité de la voie principale tout en respectant sa stabilité et sa sécurité à long terme. La réhabilitation de cette section implique entre autre l'élargissement de la chaussée existante d'environ 1 m, la création supplémentaire d'une « épaulement » d'environ 2 m et la construction d'une barrière de sécurité appropriée. Ces objectifs ont conduit à la comparaison de différentes solutions au bout desquelles la solution de remblai de sol renforcé par des géogrilles avec un parement raidi végétalisable a été retenue. Cette solution de remblai de sol renforcé par des géogrilles a été retenue pour les raisons suivantes:

- La possibilité de réemploi des matériaux du site,
- la souplesse et la rapidité de la mise en œuvre, la main d'œuvre locale
- l'adaptation du système avec les phases de construction,

- le respect du temps de construction,
- le faible coût de cette solution par rapport aux solutions traditionnelles,
- le respect des mitoyens et de l’environnement.

En bref, cette étude comparative a montré que la solution de remblai de sol renforcé par des géogrilles était plus appropriée, plus économique, plus écologique et durable dans un contexte de développement durable. Les travaux de réhabilitation de la voie Ruhengeri-Gisenyi ont débuté en juillet 2007 et ont été achevés en mars 2010. La section incluant le remblai de sol renforcé a été construite en 2009.

3. CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT

La conception et le dimensionnement ont été réalisés conformément aux normes et guides européens. Les calculs géotechniques ont été effectués conformément à la norme allemande DIN 1054 (*Vérification de la sécurité des travaux de terrassement et des fondations*), le guide allemand EBGeo (*Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements*), et l’Eurocode EC7 à travers les facteurs de sécurité partiels. L’analyse de l’ouvrage consiste à vérifier d’une part sa stabilité interne, externe et mixte (États limites ultimes ELU), et d’autre part les déformations / distorsions, déplacements et tassements du remblai renforcé en service normal (États limites de services ELS). Les calculs ont été réalisés avec le logiciel de conception GGU Stability (*Slope stability analysis and analysis of soil nailing and reinforced earth walls to DIN 4084 and EC 7*).

3.1 Eléments généraux de conception

Les données du projet fixées contractuellement par le maître d’œuvre recouvrent le site d’implantation et la catégorie de l’ouvrage (ouvrage permanent). Les autres données nécessaires à la justification de l’ouvrage de soutènement étaient les suivantes:

- Données géométriques:
Parement incliné de 20 degrés par rapport à la verticale
Hauteur maximal du remblai de sol renforcé H= 8 m.
- Données géotechniques:
Le sol de fondation et le matériau du remblai présentent les valeurs caractéristiques (angle de frottement ϕ_k , cohésion c_k , poids volumique γ_k) suivantes :

Soil	ϕ_k [°]	c_k [kN/m ²]	γ_k [kN/m ³]	Designation
	28.00	5.00	19.00	fill
	36.00	100.00	24.00	silty sand
- Surcharge et/ou charges concentrées:
Une charge uniformément répartie de 20 kN/m² a été retenue pour tenir compte de la circulation routière.
Une charge piétonne uniformément répartie de 5 kN/m² a été retenue sur les accotements.
- Actions sismiques:
Aucune action sismique n’a été considérée dans le dimensionnement.

3.2 Justification, Choix des géogrilles et Résultats

La justification de la stabilité interne, externe et mixte du remblai renforcé par géogrilles consiste à vérifier le choix des géogrilles en type, nombre, longueur et espacement vertical à l’intérieur du remblai, de façon à assurer l’équilibre pour toutes les lignes de ruptures potentielles. Cette justification consiste à vérifier que, pour chaque combinaison d’actions, les résistances de calcul des éléments constitutifs et celles mobilisées par les phénomènes mis en jeu (interaction sol/géogrille, cisaillement du sol) génèrent un degré d’utilisation inférieur à 1,0. Le degré d’utilisation μ (Équation 1) est défini tel que ce degré d’utilisation μ multiplié par la somme des valeurs de calculs de résistances de dimensionnement (R_d) corresponde exactement à la somme des valeurs de calculs d’actions de dimensionnement (F_d).

$$\mu * \sum R_d - \sum F_d = 0 \quad \text{Équation 1 (Ziegler, 2005)}$$

Le choix de la géogrille s’effectue en fonction de la résistance en traction de dimensionnement à long terme du géogrille, du coefficient d’interaction, du polymère constitutif qui doit être compatible en termes de durabilité avec le matériau de remblai, et le cas échéant, avec les matériaux constitutifs du parement. Les différents coefficients partiels de réduction utilisés dans ce projet sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Facteurs partiels de réduction appliqués sur le géogrille utilisé dans le projet

	R _{B,k0} [kN/m]	A ₁						A ₂			A ₃	A ₄			A ₅	γ _M		
		1 an	2 ans	5 ans	10 ans	60 ans	120 ans	grain fin D ₉₀ ≤ 2 mm	grain mix D ₉₀ ≤ 32mm	grain gros D ₉₀ ≤ 63 mm		Acide (2 ≤ pH < 4)	Neutre (4 ≤ pH ≤ 9)	Alcalin (9 < pH ≤ 10)		CC 1	CC 2	CC 3
Fortrac 55 T	55	1,39	1,41	1,43	1,45	1,50	1,52	1,09	1,11	1,14	1,0	1,15	1,03	1,10	1,0	1,4	1,3	1,2

- A₁: Facteur de réduction lié à la déformation par fluage en fonction de la durée de charge
- A₂: Facteur de réduction lié aux dommages causés lors de l'installation, le transport et le compactage
- A₃: Facteur de réduction lié aux traitements (coutures, assemblage, jointures)
- A₄: Facteur de réduction lié aux impacts environnementaux (résistance aux intempéries, produits chimiques, micro-organismes, animaux)
- A₅: Facteur de réduction lié à l'impact de l'action dynamique
- γ_M: Coefficient partiel de sécurité pour la résistance structurelle des éléments de renforcement flexibles conformément à la norme DIN 1054
- R_{B,k0}: Valeur caractéristique de la résistance en traction "à court terme" du géogrille conformément à la norme EN ISO 10319

Les facteurs de réductions sont définis par des essais normalisés et validés par des avis techniques. La résistance en traction de dimensionnement à long terme R_{B,d} (EBGEO 2010) est définie l'équation suivante:

$$R_{B,d} = \frac{R_{B,k_0}}{A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times A_5 \times \gamma_M} \left[\frac{kN}{m} \right]$$

On obtient donc pour la géogrille ayant une résistance en traction à court terme de 55 kN/m une résistance en traction de dimensionnement à long terme de 22 kN/m.

La Figure 2 présente la surface de rupture la plus défavorable selon la méthode de Bishop, le degré d'utilisation maximale obtenu sur plus de 3000 cercles de rupture potentielle examinés est de 0,96 (< 1,0). La Figure 3 présente la surface de rupture la plus défavorable selon la méthode des blocs glissants, le degré d'utilisation maximale obtenu sur plus de 2000 lignes de rupture potentielle examinées est de 0,95 (< 1,0).

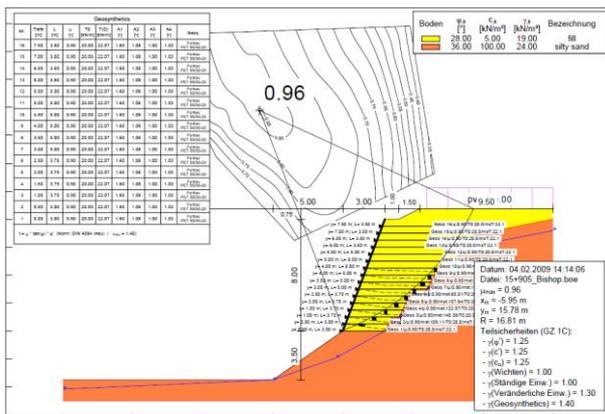


Figure 2. Examen des cercles de rupture potentielle selon la méthode de Bishop (GGU-Stability)

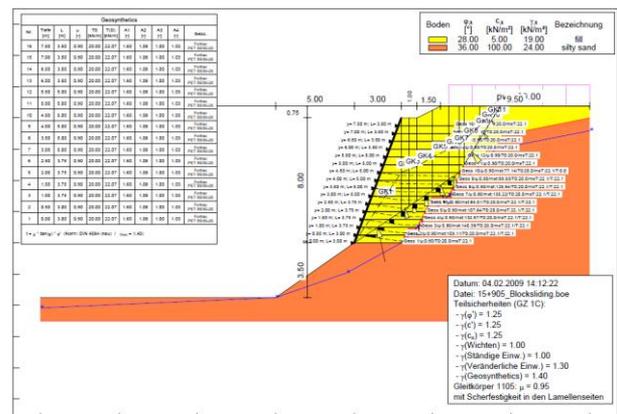


Figure 3. Examen des cercles de rupture potentielle selon la méthode de Bishop (GGU-Stability)

4. PROCÉDÉ DE CONSTRUCTION

Il est rappelé que la Norme européenne NF EN 14475 (Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Remblais renforcés-) établit de manière générale les principes généraux pour la réalisation de ce type de travaux. Le procédé de construction est un processus répétitif (Figure 4).

La première phase de construction comprend l'excavation de la pente existante jusqu'au niveau requis (Figure 5 & 6). Un géotextile non-tissé a été installé le long de la coupe pour assurer la séparation et la filtration (Figure 7). Le support du remblai a été soigneusement compacté afin d'obtenir une plate-forme uniforme. L'uniformité et l'angle désiré du parement sont réalisés à l'aide d'un coffrage provisoire fixé et maintenu en place par des tiges métalliques (Figure 8). Un géotextile anti-érosif est placé en face avant du géogrille pour maintenir la terre végétale (Figure 8). Le géogrilles avec la longueur requise d'après les calculs de stabilité est mis en œuvre avec une longueur suffisante en avant du coffrage provisoire pour assurer un retour de nappe/ancrage d'au moins 1,50 m (Figure 9). La couche de matériau de remblai est ensuite apportée jusqu'à la hauteur spécifiée et compactée à une densité Proctor d'au moins 98% de l'OPN.

La couche de remblai étant complète, le coffrage provisoire est enlevé et replacé au dessus pour la couche suivante. Le même procédé est répété jusqu'à ce que la hauteur maximale de la structure soit atteinte.

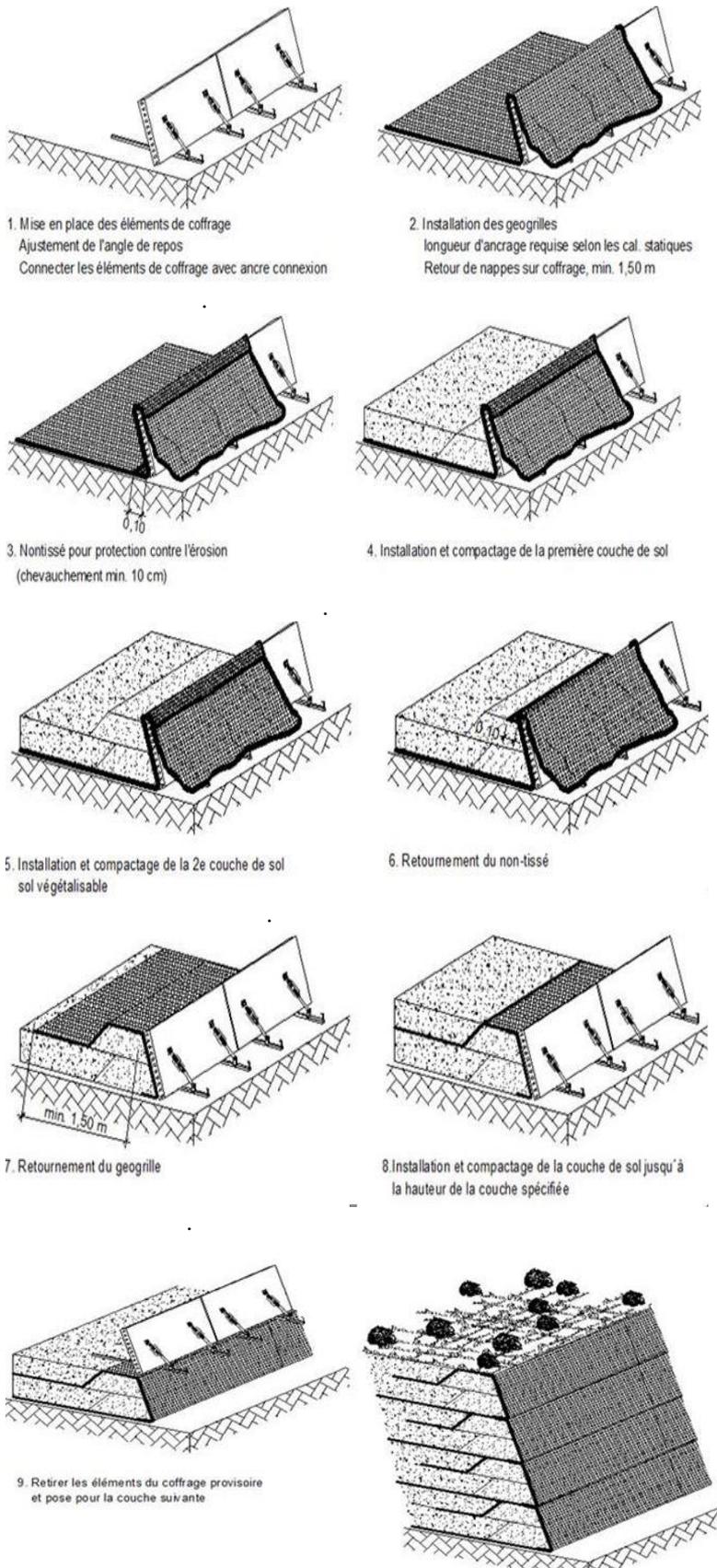


Figure 4. Procédé général de construction d'un ouvrage de soutènement en sol renforcé par géogrilles



Figure 5. Vue du site et début des travaux de terrassement



Figure 6. Excavation de la pente existante



Figure 7. Installation du Géotextile de séparation



Figure 8. Installation d'un coffrage provisoire, du géogridle et du géotextile anti-Erosion



Figure 9. Ancreage du géogridle par retournement



Figure 10. Vue de l'ouvrage avant le démarrage des travaux



Figure 11. Vue globale de l'ouvrage en cours de construction



Figure 12. Vue de l'ouvrage achevé

5. CONCLUSION

L'expérience Rwandaise avec le remblai renforcé par nappes de géogrilles dans le cadre de la réhabilitation de la voie principale Ruhengeri-Gisenyi a montré que cette solution, lorsqu'elle est retenue par les maîtres d'œuvres présente des avantages très significatifs tant sur le plan économique, écologique et qu'environnemental avec une parfaite intégration paysagère. Les solutions traditionnelles sont souvent coûteuses et peu adaptées dans des contextes géotechniques et géologiques difficiles. Les recherches continues des solutions techniques en accordance avec les principes du développement durable étant de plus en plus exhortées par les états rendent ces types de structures particulièrement intéressants. Face à l'urgence de la crise écologique et sociale qui se manifeste désormais de manière mondialisée, le développement durable est une réponse de tous les acteurs (états, marché, société civile) pour reconsidérer la croissance économique dans chaque pays afin de prendre en compte les aspects environnementaux et sociaux du développement. Le choix d'une telle solution au détriment des ouvrages traditionnelles (par exemple murs poids en béton armé, murs poids en maçonnerie) présente d'énormes avantages au regard du développement durable. Grâce à la réduction importante du volume et du poids des matériaux transportés, ces types de structures permettent en général de réduire les émissions de gaz à effet de serre de manière significative. Ils permettent le réemploi des matériaux du site ou à proximité du site tout en réduisant le temps de construction et les coûts de chantier.

BIBLIOGRAPHIE

- DIN 1054 (2005) Baugrund; Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau
 DIN EN 1997-1 (2004) Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules
 EBGEO (2010) Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements, *German Geotechnical Society (DGGT), Ernst & Sohn, Essen-Berlin*.
 NF EN 14475 (2007) Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Remblais renforcés. *Indice de classement: P 94-326*
 NF EN ISO 10319 (2008) Géosynthétiques - Essai de traction en bande large
 M Geok E 2005 (2005) Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus, *Regulations for the application of geosynthetics in earthworks of road building, FGSV - Köln, 2005*
 Ziegler M. (2005) Geotechnische Nachweise nach DIN 1054: Einführung mit Beispielen, *Ernst & Sohn*