

Geosintéticos en ingeniería hidráulica y costera: Filtros, revestimientos y estructuras llenas de arena

Geosynthetics in hydraulic and coastal engineering: Filters, revetments and sand filled structures

ADAM BEZUIJEN (*) y KRYSZTIAN W. PILARCZYK (**)

RESUMEN El trabajo trata sobre dos aplicaciones de los geotextiles en ingeniería de costas e hidráulica: Geotextiles en filtros y revestimientos, y geotextiles en estructuras rellenas de arena. Los geotextiles están reemplazando a menudo a los filtros granulares. Sin embargo, tienen propiedades diferentes a estos. Para la aplicación de los geotextiles en revestimientos, se mostrarán las consecuencias de las diferentes propiedades: cómo la permeabilidad se ve influenciada por un geotextil y cuáles pueden ser las consecuencias de las diferencias de peso entre los filtros granulares y de geotextil.

En la otra aplicación, las propiedades filtrantes de los geotextiles son sólo secundarias. En los geotubos y geocontenedores, el geotextil se utiliza como "material de envoltorio" para crear grandes unidades que no serán erosionadas durante la acción del oleaje. Las estructuras con geotubos y geocontenedores sirven como una alternativa para estructuras cimentadas en roca.

La primera de estas estructuras fue más o menos construida por ensayo y error, pero la investigación sobre la forma de las estructuras, la estabilidad bajo la acción del oleaje y la durabilidad del material utilizado ha ofrecido la posibilidad de utilizar herramientas de diseño para estas estructuras. Recientemente, se han investigado también los aspectos morfológicos de estas estructuras. Esto es importante porque regularmente las estructuras con geotubos fallan debido a la insuficiente protección contra los boquetes que se producen y socavan la estructura. Investigaciones recientes en el Canal Delta de Deltares y el Canal de Gran Oleaje en Hannover han conducido a una mejor comprensión sobre qué mecanismos determinan la estabilidad bajo la acción del oleaje. Se muestra también que el grado de relleno es importante y la posición del nivel de agua con respecto al tubo tiene una gran influencia.

ABSTRACT *The paper deals with 2 applications of geotextiles in coastal and hydraulic engineering: Geotextiles in filters and revetments; and geotextiles in sand filled structures. Geotextiles are often replacing granular filters. However, they have different properties than a granular filter. For the application of geotextiles in revetments, the consequences of the different properties will be shown: how permeability is influenced by a geotextile and what can be the consequences of the weight differences between granular and geotextile filters. In the other application, the filter properties of geotextiles are only secondary. In geotextile tubes and containers the geotextile is used as 'wrapping material' to create large units that will not erode during wave attack. The structures with geotextile tubes and containers serve as an alternative for rock based structures. The first of these structures were more or less constructed by trial and error, but research on the shape of the structures, the stability under wave attack and the durability of the used material has given the possibility to use design tools for these structures. Recently also the morphological aspects of these structures have been investigated. This is of importance because regularly structures with geotextile tubes fail due to insufficient toe protection against the scour hole that develops in front of the structure, leading to undermining of the structure. Recent research in the Delta Flume of Deltares and the Large Wave Flume in Hannover has led to better understanding what mechanisms determine the stability under wave attack. It is shown that also the degree of filling is of importance and the position of the water level with respect to the tube has a large influence.*

Palabras clave: Filtros, Geotubos, Geocontenedores, Ingeniería costera.

Keywords: Filters, Geotextile tubes, Geotextile containers, Coastal engineering.

(*) Ghent University, Belgium / Deltares, Delft, The Netherlands. E-mail: adambezuijen@hotmail.com

(**) Coastal Consultant, The Netherlands. E-mail: k.pilarczyk@casema.nl

1. INTRODUCCIÓN

Los geotextiles se utilizan ampliamente en la ingeniería costera e hidráulica. Algunas de las obras hidráulicas más grandes construidas, la barrera contra la marejada ciclónica en la Escalda Oriental y la barrera del proyecto Mose contra las inundaciones en Venecia están cimentadas usando geotextiles.

Una aplicación muy común en ingeniería costera e hidráulica, es que un geotextil reemplaza (parcialmente) a un filtro granular. La construcción de filtros granulares, especialmente por debajo del nivel del agua, es bastante costoso porque ha de ser construido con material granular en varias capas de más fino a más grueso para evitar el lavado de los finos. El proyecto Delta Works en el suroeste de los Países Bajos y la barrera del proyecto Mose contra inundaciones en Venecia, muestran el desarrollo de la utilización de geotextiles.

Durante la construcción de la presa de Haringvliet en los años 60 del pasado siglo, no se utilizaron geotextiles. Se construyó un pólder y el filtro de la construcción se realizó en ambiente seco. En los años 70 durante la construcción de la barrera contra la marejada ciclónica en la Escalda Oriental, todavía fueron utilizados filtros granulares, pero éstos fueron aplicados en capas donde los geotextiles eran las capas de separación, véase la Figura 1.

La vida útil de los geotextiles podría ser relativamente corta, porque después de la colocación existe siempre el filtro granular. Al utilizar este método, la construcción del pólder temporalmente podría evitarse. Durante la construcción de la Barrera contra inundaciones Mose, la pasada década, el conocimiento de la durabilidad de los geotextiles había avanzado tanto que hizo que el geotextil estuviera diseñado como parte integral de la estructura del filtro (Figura 2) ahorrando dinero, debido a que los colchones podrían ser más delgados y con un menor número de capas.

Los filtros geosintéticos se utilizan hoy en día a menudo en revestimientos en los que sustituyen también a los filtros granulares. Esta contribución estará de acuerdo con los criterios para estos filtros. Se mostrará que además de los criterios de filtro, otros criterios han de ser tomados en consideración.

1 INTRODUCTION

Geotextiles are widely used in coastal and hydraulic engineering. Some of the largest hydraulic structures ever built, the Eastern Scheldt Storm Surge Barrier and the Moses Flood Barrier in Venice are founded using geotextiles.

A quite common application in coastal and hydraulic engineering is that a geotextile replaces (partly) a granular filter. The construction of granular filters, especially below the water line is rather costly because several layers has to be made with granular material going from fine to coarser to avoid that the fines are washed out. The Deltaworks in the South-Western part of the Netherlands and the Moses flood barrier in Venice show the development of the use of geotextiles.

No geotextiles were used in the 60's of last century, during the construction of the Haringvliet-dam. A polder was made and the filter construction was made in a dry environment. In the 70-ties during the construction of the Eastern Scheldt Storm Surge barrier, still granular filters were used, but these were applied in mattresses where geotextiles were the separation layers, see Figure 1.

The life time of the geotextiles could be relatively short, because after placement there is always the granular filter. By using this method the construction of the temporarily polder could be avoided. During the construction of the Moses Flood Barrier, last decade, the knowledge of the durability of geotextiles has advanced so far that the geotextiles were now designed as an integral part of the filter structure (Figure 2) again saving money, because the mattresses could be made thinner and with fewer layers.

Geosynthetic filters are nowadays often used in revetments where they also replace granular filters. This contribution will deal with criteria for these filters. It will be shown that more than just the filter criteria have to be taken into account.



FIGURA 1. Colchón del filtro de la barrera contra la marejada ciclónica de la Escalda Oriental. 3 capas granulares. / **FIGURE 1.** Filter mattress Eastern Scheldt storm surge barrier. 3 granular layers.

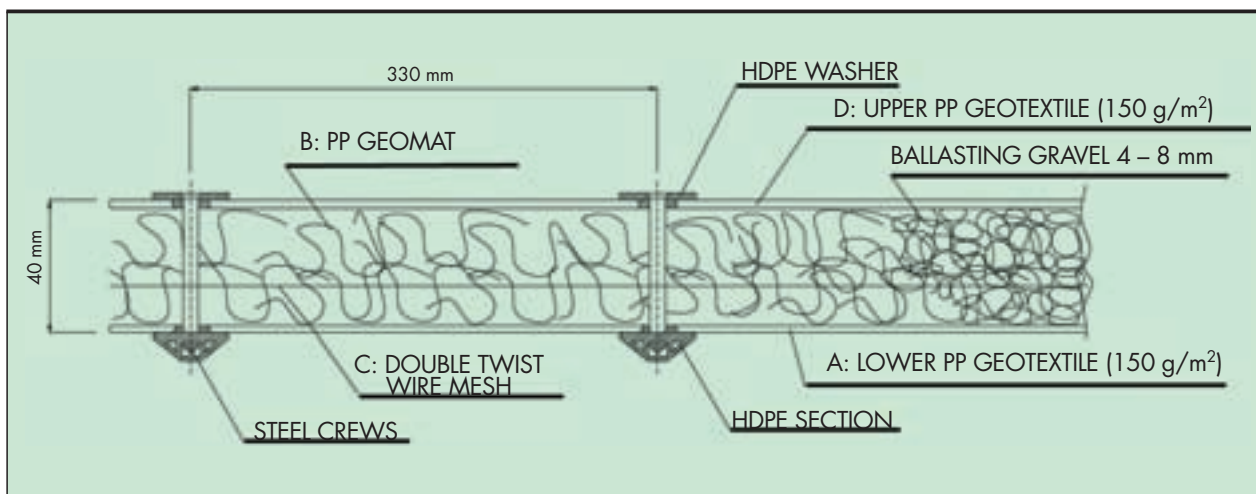


FIGURA 2. Colchón de filtro Mose, Venecia. 1 capa granular. / FIGURE 2. Filter mattress Mose, Venice. 1 granular layer.

Los tubos y contenedores rellenos de arena son aplicaciones bastante diferentes. La idea de utilizar bolsas rellenas de arena para prevenir la erosión de la arena es bastante antigua, pero debido a la escasa resistencia de las bolsas tradicionales, hechas de yute, sólo podían emplearse bolsas de reducidas dimensiones. El desarrollo de los geotextiles ha posibilitado el empleo de bolsas más grandes. Esto permite el desarrollo de nuevas estructuras resistentes a la erosión. La primera aplicación de grandes bolsas llenas de arena de gran tamaño es de hace más de 50 años. Sin embargo, todavía es un “buen mercado”. En este estudio se discutirán las razones.

En este trabajo se abordará primero la aplicación de los geotextiles como filtro; se discutirán las reglas para el filtro, la permeabilidad y la importancia del peso de las distintas capas para alcanzar la estabilidad en caso de revestimientos. La segunda parte (secciones 5 y 6) se ocupará de los geotextiles rellenos de arena, sus aplicaciones, los aspectos de diseño, posibilidades y limitaciones.

Otras aplicaciones de geosintéticos y geosistemas se pueden encontrar en Pilarczyk (2000), Fowler *et al.* (2002), Heerten *et al.* (2010), Lawson (2010) y Homsey *et al.* (2002).

2. CRITERIOS DE FILTRO

2.1. DIFERENTES CRITERIOS

Un filtro evita que los materiales finos sean lavados. Los filtros pueden ser geoméricamente estables o hidráulicamente estables. El primer criterio se cumple cuando los finos en el filtro no pueden pasar a través de los poros del material de mayor tamaño. Este filtro es estable para todos los gradientes, porque es imposible que los finos del subsuelo sean transportados atravesando las piedras más grandes de la capa de filtro. La única manera en la que puede ocurrir el fallo es cuando la capa más gruesa del filtro se vuelva inestable. En un filtro hidráulicamente estable, es posible que los finos sean transportados a través de los poros del material más grueso, pero un cierto gradiente hidráulico es necesario para ello. Si se puede demostrar que no se alcanzará tal gradiente, entonces el filtro es también estable. En la ingeniería costera el gradiente hidráulico máximo posible normalmente puede alcanzar valores muy altos, por lo que hay poco que ganar mediante el uso de un filtro hidráulicamente estable (Grauw *et al.*, 1983). Por tanto, este documento aborda sólo filtros geoméricamente estables.

The sand filled tubes and containers are quite different applications. The idea to use sand filled bags to prevent erosion of sand is rather old, but due to the limited strength of the traditional bags, made from jute, only bags of limited dimensions could be used. The development of geotextiles makes much larger bags possible. This allows for the development of new erosive resistant structures. The first application of large sand filled bags is already more than 50 years ago. Yet it is still a ‘nice market’. In this contribution reasons for that will be discussed.

This paper will first deal with the application of geotextiles as a filter; will discuss the filter rules, the permeability and the importance of weight of the various layers to reach stability in case of revetments. The second part (Sections 5 and 6) will deal with sand filled geotextiles, the applications, design aspects, possibilities and limitations.

*Other applications of geosynthetics and geosystems can be found in Pilarczyk (2000), Fowler *et al.* (2002), Heerten *et al.* (2010), Lawson (2010) and Homsey *et al.* (2002).*

2. FILTER CRITERIA

2.1. DIFFERENT CRITERIA

*A filter prevents that fine material is washed out. Filters can be geometrically stable or hydraulically stable. The first criterion is fulfilled when the fines in the filter cannot pass through the pores of the larger material. Such a filter is stable for all gradients, because it is impossible that the fines of the subsoil are transported through the larger stones of the filter layer. The only way that failure can occur is when the coarse layer of the filter becomes unstable. In a hydraulically stable filter, it is possible that the fines are transported through the pores of the coarser material but a certain hydraulic gradient is necessary for such a transport. If it can be proven that such a gradient will not be reached, then the filter is also stable. In coastal engineering the maximum possible hydraulic gradient can normally reach quite high values, so that there is little to gain by using a hydraulically stable filter (Grauw *et al.*, 1983). Therefore this paper deals with geometrically stable filters only.*

2.2. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

En un filtro granular, la capa gruesa, la capa de filtro, se aplicará durante la construcción. Normalmente en ésta el tamaño del material tiene una distribución bastante uniforme. Lo mismo es válido para el tamaño de la abertura del geotextil tejido. El subsuelo es normalmente material natural y por consiguiente las partículas pueden ser de todos los tamaños. Es importante que el subsuelo sea estable internamente. En cuanto a los filtros hidráulicos, esto no es un criterio absoluto. Es posible que algunos finos migren desde el subsuelo y que esta migración cree un filtro natural. Cerca de la capa de filtro, la permeabilidad será entonces un poco mayor porque los finos serán extraídos. Sin embargo, es posible que los finos sean recogidos en el límite entre el subsuelo y el filtro, creando un borde impermeable.

Este mecanismo se denomina "obtención". Es difícil decir qué ocurrirá de antemano y por lo tanto se recomienda realizar algunos ensayos de gradiente hidráulico (ASTM D 5101) a los gradientes esperados (estático o cíclico) con el filtro de geotextil diseñado cuando el subsuelo no es internamente estable o reemplazar (parcialmente) el subsuelo por un material más uniforme.

Sobre si un subsuelo es estable internamente o no, se puede consultar Kenney y Lau (1985).

2.3. CRITERIOS DE FILTRO

Para que un filtro geosintético actúe bien, tiene que cumplir diferentes criterios. Un criterio para el subsuelo, ya ha sido antes mencionado. Más aún, el tamaño de la apertura del filtro tiene que limitarse para impedir el transporte del subsuelo. Tiene que haber suficientes aberturas para prevenir el "bloqueo" y además la permeabilidad debe ser lo suficientemente alta, de modo que los geotextiles contribuyan solo de forma limitada a la resistencia al flujo. La literatura presenta un buen número de criterios de filtro (Heibaum, 2004 Heibaum *et al.* 2006), que en su mayoría están de acuerdo en subsuelos bastante uniformes, pero difieren cuando los subsuelos son menos uniformes (tienen un valor mayor para el coeficiente de uniformidad, d_{60}/d_{10}).

2.4. USO DE UN FILTRO EN UN REVESTIMIENTO

Una capa de material granular que actúa como filtro puede tener más funciones además de la función de filtro. En un revestimiento, el peso de una capa granular se utiliza a menudo para prevenir la inestabilidad de la pendiente, ver Bezuijen y Köhler, 1996. Durante el retroceso de la ola la presión de agua frente al revestimiento será menor que la presión de los poros dentro de la pendiente del revestimiento, resultando un gradiente hacia el exterior que pondrá en peligro la estabilidad de las laderas a menos que el peso de la capas de filtro y la capa de armadura sea suficiente para mantener la pendiente estable. Mediante la sustitución de las capas de filtro granulares por un geotextil, que tiene la misma función de filtro, la función de filtro está asegurada, pero el peso de la combinación de la capa de filtro y la capa de armadura disminuye. Por lo tanto, es necesario controlar de nuevo si la pendiente de la estructura es suficientemente estable frente a la acción del oleaje o no.

2.2. GRAIN SIZE DISTRIBUTION

In a granular filter, the coarse layer, the filter layer, will be applied during construction. Normally this layer has a rather uniform grain size distribution. The same is valid for the opening size of woven geotextiles. The subsoil is normally natural material and therefore this can be in all gradations. Important is that the subsoil is internally stable. As for hydraulic filters, this is not an absolute criterion. It is possible that some fines migrate from the subsoil and that this migration creates a natural filter. Close to the filter layer, the permeability will then be a bit higher because fines will be washed out. However, it is also possible that the fines are collected at the boundary between the subsoil and the filter, creating an impermeable boundary.

This mechanism is called 'blinding'. It is difficult to say what will happen beforehand and therefore it is advised to perform some gradient ratio tests (ASTM D 5101) at the expected gradients (static or cyclic) with the designed geotextile filter when the subsoil is not internally stable or (partly) replace the subsoil by more uniform material

Whether or not subsoil is internally stable is given by Kenney and Lau (1985).

2.3. FILTER CRITERIA

*For a geosynthetic filter to act well, it has to fulfil different criteria. A criterion for the subsoil was already mentioned above. Furthermore, the opening size of the filter has to be limited to prevent subsoil transport, There have to be enough openings to prevent 'blocking' and also the permeability has to be high enough, so that the geotextile attributes only limited to the flow resistance. Literature presents quite a number of filter criteria (Heibaum, 2004, Heibaum *et al.* 2006), which mostly agree for rather uniform subsoil, but differ when it comes to subsoils with are less uniform (have a larger value for the coefficient of uniformity, d_{60}/d_{10}).*

2.4. USE OF A FILTER IN A REVETMENT

A layer of granular material that acts as a filter can have more functions than just a filter function. In a revetment, the weight of a granular layer is often used to prevent instability of the slope, see Bezuijen & Köhler, 1996. During run-down of a wave the water pressure in front of the revetment will be lower than the pore pressure inside the slope of the revetment, resulting in an outward directed gradient that will jeopardize the slope stability unless the weight of the filter layers and armour layer is sufficient to keep the slope stable. By replacing the granular filter layers with a geotextile, that has the same filter function, the filter function is assured, but the weight of the combination of filter layers and armour layer has decreased. Therefore, it is necessary to control again whether or not the slope of the structure is sufficiently stable against the design wave attack.

3. PERMEABILITY OF THE GEOTEXTILE PERPENDICULAR TO THE PLANE

3.1. PERMEABILITY REDUCTION DUE TO GRANULAR MATERIAL

As mentioned, a geotextile filter, as a granular filter, has to be able to block the fine granular material, but must allow for sufficient water flow through the geotextile. The water flow through a geotextile as a function of the hydraulic head is measured in the index test: EN ISO 11058. However, the actual permeability normal to the plane of a geotextile in sand or granular material is much lower than measured in

3. PERMEABILIDAD DEL GEOTEXTIL PERPENDICULAR AL PLANO

3.1. REDUCCIÓN DE PERMEABILIDAD DEBIDO AL MATERIAL GRANULAR

Como se ha mencionado, un filtro de geotextil, como un filtro granular, tiene que ser capaz de bloquear el material granular fino, pero debe permitir el suficiente flujo de agua a través del geotextil. El flujo de agua a través de un geotextil como una función de la carga hidráulica es medido en el ensayo tipo: EN ISO 11058. Sin embargo, la permeabilidad real en la normal al plano de un geotextil en arena o material granular es mucho menor que la medida en el ensayo tipo de la norma EN ISO. Bezuijen y Köhler (1996) han medido que un geotextil rodeado por dos capas de material granular tiene una capacidad de flujo normal al plano (permitividad, ver más información en esta sección) 5 veces menor que la permeabilidad del geotextil solo. Su explicación es que las aberturas del tejido geotextil utilizado fueron parcialmente bloqueadas por el material granular, Figura 3.

Esta disminución de la permeabilidad supuso la diferencia entre un geotextil que era suficiente permeable para no influir en la estabilidad de la estructura (como se asumía en los cálculos de diseño original), o un geotextil con tal disminución de permeabilidad en el borde del filtro que supuso una significativa disminución de la estabilidad (como se apreció en el campo).

Los Ensayos de permeabilidad de Van Beek y Schenkeveld (2011) mostraron que la permeabilidad de un geotextil no tejido ($O_{90} = 90 \mu\text{m}$), cubierto por un lado con arena de finura media ($d_{50} = 135 \mu\text{m}$, $d_{60}/d_{10} = 1,6$) y por el otro con una placa de acero inoxidable con una relación de aberturas de 35%, resultó en una permitividad del sistema geotextil placa que está estrechamente relacionada con la permeabilidad de la arena. Una menor permeabilidad de la arena (conseguido por densificación de la arena a una menor porosidad) dio lugar a una permitividad inferior, Figura 4.

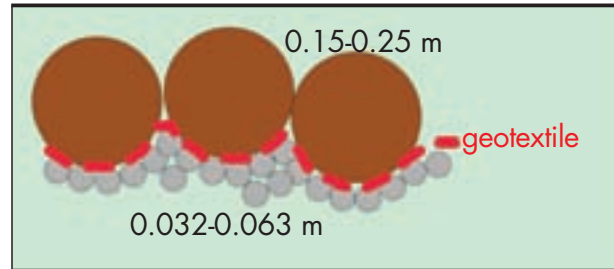


FIGURA 3. Bloqueo parcial de las aberturas del geotextil por partículas más grandes y más pequeñas. / FIGURE 3. Partly blocking of geotextile openings by larger and smaller grains.

the EN ISO index test. Bezuijen & Köhler (1996) have measured that a geotextile surrounded by two layers of granular material has a flow capacity normal to the plane (permittivity see further this section), that is 5 times lower than the permeability of the geotextile alone. Their explanation is that the geotextile openings of the woven used where partly blocked by the granular material, see Figure 3.

This decrease in permeability made the difference between a geotextile that was sufficient permeable not to influence the stability of the structure (as was assumed in the original design calculations), or a geotextile that resulted in such a decrease in permeability on the filter boundary that there was a significant decrease the stability (as was found in the field).

Permeability tests by van Beek and Schenkeveld (2011) showed that the permeability of a non-woven geotextile ($O_{90}=90 \mu\text{m}$) that was covered on one side with medium fine sand ($d_{50}=135 \mu\text{m}$, $d_{60}/d_{10}=1.6$) and on the other side with a stainless steel plate that has an openings ratio of 35% resulted in a permittivity of the geotextile plate system that is closely related to the permeability of the sand. A lower permeability of the sand (achieved by densification of the sand to a lower porosity) resulted in a lower permittivity, Figure 4.

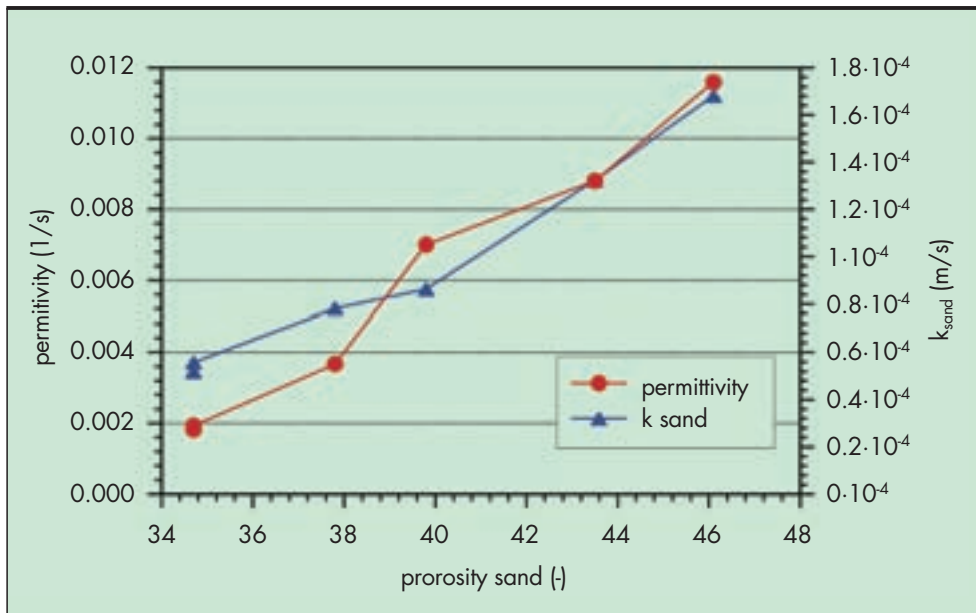


FIGURA 4. Permitividad del geotextil apoyado en una placa de acero inoxidable con abertura de 35%, influido por la permeabilidad de la arena en la parte superior. Resultados de permitividad medidos (puntos) en comparación con la permeabilidad medida de la arena (triángulos). / FIGURE 4. Permittivity of geotextile supported by stainless steel plate with 35% openings, influenced by the permeability of the sand on top, results of measured permittivity (dots) compared with the measured permeability of the sand (triangles).

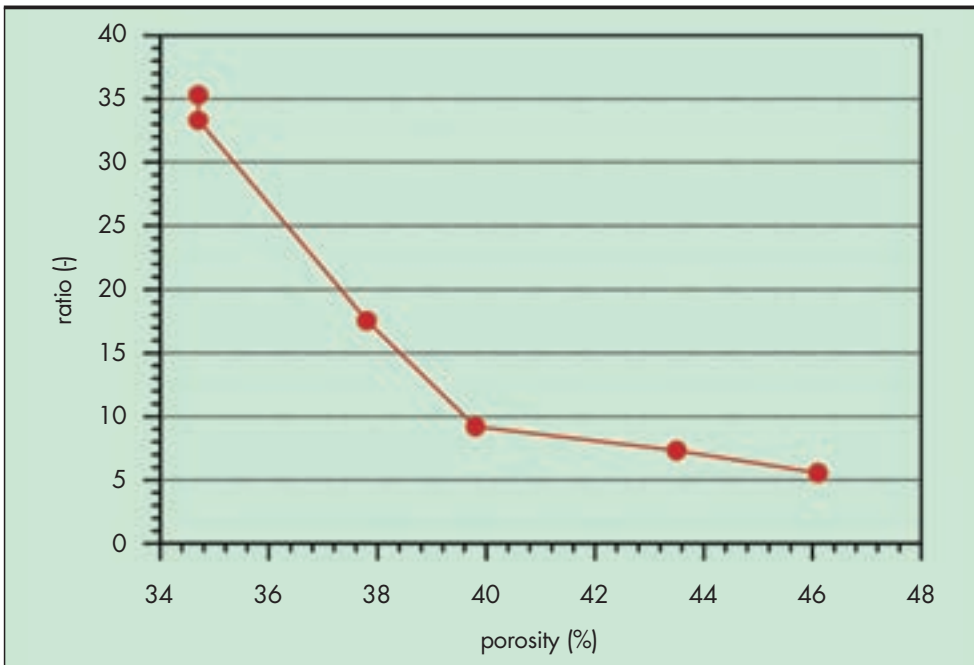


FIGURA 5. Relación de permitividad del geotextil sin arena (como en el ensayo tipo) y la permeabilidad del mismo geotextil medido con arena en un lado, $d_{50} = 135$ mm, como una función de la porosidad de la arena. / **FIGURE 5.** Ratio permittivity geotextile measured without sand (as in an index test) and permeability of the same geotextile measured with on one side sand, $d_{50} = 135$ mm, as a function of the porosity of the sand.

Además, la permitividad del geotextil con arena es en este caso 5,5 a 35 (!) veces menor que la permeabilidad medida en el ensayo tipo sin suelo Figura 5.

Estos hallazgos hacen que la permeabilidad de un geotextil sea un parámetro arbitrario. El ensayo de la norma EN ISO 11058 se puede utilizar para comparar diferentes geotextiles, pero ni siquiera se puede asegurar que el geotextil que mostró la permeabilidad más alta en el ensayo tipo también la ofrezca en el suelo. Parece que hay una interacción suelo-estructura bastante complicada, lo que resultó en este caso en una resistencia al flujo en el borde entre el geotextil y la arena que es equivalente a unos pocos centímetros de arena. El efecto está un poco acentuado debido a que la placa de acero inoxidable tenía un porcentaje de aberturas de sólo 35%, pero aún es destacable que el aplicar un geotextil permeable con un espesor de aproximadamente 0,1 cm conlleva una resistencia al flujo adicional equivalente a un espesor adicional entre 1 y más de 2,5 cm de arena (que es menos permeable que el geotextil), dependiendo de la porosidad. Cuando sea crucial, la permeabilidad real de un geotextil en la construcción de un filtro se puede determinar mejor en el ensayo de gradiente hidráulico (ASTM D 5101). En este ensayo es posible investigar si existe o no una gran caída de presión sobre el geotextil a un flujo determinado. Esta caída de presión es importante para considerar si el geotextil es suficientemente permeable o no.

3.2. PERMEABILIDAD FRENTE A PERMITIVIDAD

El término familiar de permeabilidad se ha utilizado hasta ahora en este trabajo. Sin embargo, la última sección mostró que éste no es el parámetro más útil para determinar cómo es de permeable un geotextil. De acuerdo con Darcy, la permeabilidad (k) presenta la relación entre la velocidad de filtrado (v) y el gradiente hidráulico (i):

$$v = k \cdot i \quad (1)$$

Sin embargo, el gradiente hidráulico no es realmente de interés. Lo que interesa es si hay o no una caída en la carga

Furthermore, the permittivity of the geotextile with sand is in this case 5.5 to 35 (!) times lower than the permeability measured in an index test without soil, see Figure 5.

These findings make the permeability of a geotextile a rather arbitrary parameter. The EN ISO 11058 test can be used to compare different geotextiles, but it is even not sure that the geotextile that resulted in the highest permeability in the index test also gives the highest permeability when placed in soil. There seems to be quite a complicated soil structure interaction, which resulted in this case in a flow resistance at the boundary between the geotextile and the sand that is equal to a few centimetres of sand. The effect is a bit exaggerated because the stainless steel plate had an openings percentage of only 35%, but still it is remarkable that applying a permeable geotextile with a thickness of approximately 0.1 cm leads to an extra flow resistance comparable from 1 to more than 2.5 centimetres of sand (that is less permeable than the geotextile), depending on the porosity. When critical, the actual permeability of a geotextile in a filter construction can best be determined in a gradient ratio test (ASTM D 5101). In such a test it is possible to investigate whether or not there is a large pressure drop over the geotextile at a certain flow. This pressure drop is of importance to judge whether or not the geotextile is well or not sufficient permeable.

3.2. PERMEABILITY VERSUS PERMITTIVITY

The familiar term permeability is used in the part above. However, the last section showed that this is not the most useful parameter to determine how permeable a geotextile is. According to Darcy, the permeability (k) presents the ratio between the filter velocity (v) and the hydraulic gradient (i):

$$v = k \cdot i \quad (1)$$

But the hydraulic gradient is not really of interest. What is of interest is whether or not there is a drop in pie-

piezométrica sobre el geotextil ($\Delta\phi$), así la relación de interés es:

$$v = \psi \cdot \Delta\phi \quad (2)$$

donde ψ es la permitividad (1/s).

La relación de permeabilidad sugiere que un geotextil 2 veces más grueso daría lugar a una caída 2 veces mayor que la carga piezométrica (como ocurre en la arena donde Darcy es válida y esto es correcto). Sin embargo, los ejemplos de medidas mostradas anteriormente reflejan que la permeabilidad de un geotextil no está determinada por su espesor, sino por la interacción entre el geotextil y el material granular. La modificación del espesor del geotextil en una estructura es probable que tenga una influencia muy escasa, incluso nula, sobre su permeabilidad. Por consiguiente, la permitividad representa mejor el comportamiento real del geotextil en una construcción de filtro.

3.3. CONSECUENCIAS

Como consecuencia de lo anterior, no es posible afirmar que la permeabilidad del geotextil ha de ser n veces más alta que la permeabilidad del suelo. Para comprobar si un geotextil es apropiado para esta función en una construcción de filtro, Giroud (2010) en su prestigiosa conferencia, "Desarrollo de criterios para los filtros de geotextil y granulares" en el noveno Congreso Internacional de Geosintéticos, obtuvo un criterio derivado de la mecánica granular y concluyó que para que los geotextiles tejidos puedan ser utilizados en filtros las aberturas deben ser más del 10% de la superficie total y para los geotextiles no tejidos la porosidad tiene que ser mayor de 55%. En nuestra opinión no son criterios absolutos. En los Países Bajos, se utilizan en los filtros una gran cantidad de geotextiles tejidos que incumplen el criterio, no obstante estos criterios puede ser un punto de partida. Para los no tejidos, la situación es más fácil. Será difícil encontrar un producto que no cumpla el criterio para no tejido mencionado por Giroud, incluso cuando se somete a esfuerzos de compresión.

4. DISEÑO DE BLOQUES DE REVESTIMIENTOS Y GEOCOLCHONES

4.1. INSTALACIÓN DEL BLOQUE DE REVESTIMIENTO

En las estructuras de revestimiento los geotextiles se utilizan principalmente para proteger el subsuelo del lavado por las cargas hidráulicas como las olas y las corrientes. Aquí el geotextil reemplaza a un filtro granular. Desafortunadamente, la mera sustitución de un filtro granular por un geotextil puede poner en peligro la estabilidad de otros componentes en la estructura de protección de las orillas (es decir, la estabilidad interna del subsuelo en la interfaz con un geotextil, véase la Sección 2.4. Por lo tanto, debería ser definido un criterio adicional relativo al espesor total necesario (o peso unitario) del revestimiento (capa superior más subcapa) para evitar la inestabilidad interna del suelo (Klein *et al.* 1994 Breteler, 1998, Pilarczyk, 2000, 2002).

Además, el requisito habitual en un revestimiento de rip-rap de que la permeabilidad de la capa superior debe ser mayor que la de las capas inferiores no se puede cumplir en el caso de un bloque de revestimiento cerrado. La capa superior es menos permeable, lo que introduce presiones levantamiento durante la acción del oleaje.

En caso de que un geotextil esté situado directamente debajo de la capa de recubrimiento, la permeabilidad de la capa de cobertura disminuye drásticamente. Dado que el geotextil es presionado contra la capa de recubrimiento por el agua saliente, debería ser tratado como una parte de la capa de recubrimiento. En este caso la relación entre permeabilidad de la

zometric head over the geotextile ($\Delta\phi$), thus the relation of interest is:

$$v = \psi \cdot \Delta\phi \quad (2)$$

where ψ is the permittivity (1/s).

The permeability relation suggests that a 2 times thicker geotextile would lead to a 2 times higher drop in piezometric head (as is the case in sand where Darcy is valid and this is correct). However, the examples of measurements shown before show that how permeable a geotextile will be in a structure is not determined by its thickness, but by the interaction between the geotextile and the granular material. Changing the thickness of the geotextile in a structure is likely to have only a limited to no influence on how permeable it is. Consequently the permittivity represents better the real behaviour of the geotextile in a filter construction.

3.3. CONSEQUENCES

As a consequence of what is written above, it is not possible to say the permeability of the geotextile has to be x times higher than the permeability of the soil. To check whether or not a geotextile is suitable for his task in a filter construction Giroud (2010) in his Prestigious Lecture, "Development of criteria for geotextile and granular filters" at the 9th ICG derived a criterion from the granular mechanics and concluded that for wovens to be used in filters the openings must be more than 10% of the total area and for non-woven geotextiles the porosity has to be larger than 55%. In our opinion these are not absolute criteria. In the Netherlands a lot of wovens are used in filters that do not fulfil the woven criterion, but these criteria can be a starting point. For the non-wovens the situation is easier. It will be hard to find a product that does not fulfil the non-woven criterion mentioned by Giroud, even when subjected to compressive stresses.

4. DESIGN OF BLOCK REVETMENTS AND GEOMATTRESSES

4.1. PLACED BLACK REVETMENTS

In revetment structures geotextiles are mostly used to protect the subsoil from washing away by the hydraulic loads, such as waves and currents. Here the geotextile replaces a granular filter. Unfortunately, the mere replacing of a granular filter by a geotextile can endanger the stability of other components in the bank protection structure (i.e. internal stability of the subsoil at the interface with a geotextile), see Section 2.4. Therefore, an additional criterion concerning the necessary total thickness (or unit weight) of revetment (top layer plus sublayer) to avoid internal instability of soil should be defined (Klein Breteler *et al.* 1994, 1998, Pilarczyk, 2000, 2002).

Furthermore, the usual requirement in a rip-rap revetment that the permeability of the cover layer should be larger than that of the under layers cannot be met in the case of a closed block revetment. The cover layer is less permeable, which introduces uplift pressures during wave attack.

In case a geotextile is situated directly under the cover layer, the permeability of the cover layer decreases drastically. Since the geotextile is pressed against the cover layer by the out flowing water, it should be treated as a part of the cover layer. In this case the permeability ratio of the cover layer and the base or filter layer and its thickness, represented in the leakage length (Λ), is found to be the

capa de recubrimiento y la capa base o de filtro y su espesor, representado en la longitud de fuga (Λ), se ha visto que es el parámetro estructural más importante, determinando la subpresión, Figura 9; (Breteler Klein *et al.*, 1998, Pilarczyk, 2000, 2002, www.tawinfo.nl). En general, todas las capas superiores (bloques de revestimiento y geocolchones) de baja permeabilidad deberían ser diseñadas sobre la base de la definición del tamaño de fuga que proporciona una especie de optimización entre todos los requisitos de diseño (Breteler Klein *et al.*, 1994, 1998, CUR, 1995). Se abrevia esta descripción ya que la amplia descripción en el diseño de revestimientos que incorporan geotextiles se puede encontrar en las referencias y también están disponibles online.

4.2. GEOCOLCHONES

La permeabilidad del geocolchón es uno de los factores que determina su estabilidad. Se ha podido comprobar que la permeabilidad proporcionada por los proveedores, a menudo es la permeabilidad del geotextil, o de los llamados puntos de filtro. En ambos casos, la permeabilidad global del conjunto es mucho más pequeña. Una alta permeabilidad del conjunto asegura que cualquier acumulación de presión debajo del conjunto pueda disiparse, y como resultado de ello las presiones diferenciales a través del conjunto permanecen más pequeñas. Por lo tanto, la estabilidad es la más grande con una gran permeabilidad del conjunto. Esta permeabilidad tiene que ser determinada experimentalmente, y en el diseño ha de tenerse en consideración que con el tiempo esta permeabilidad disminuirá debido a la contaminación o la obstrucción.

Al introducir el concepto de tamaño de fuga, la indicación de la estabilidad para diversos geo-colchones puede ser como se muestra en la Figura 6 (Breteler Klein *et al.*, 1998, Pilarczyk,

*most important structural parameter, determining the uplift pressure, see Figure 9; (Klein Breteler *et al.*, 1998, Pilarczyk, 2000, 2002, www.tawinfo.nl). In general, all low-permeable top layers (block revetments and geo-mattresses) should be designed based on definition of their leakage length which provides a kind of optimization between all design requirements (Klein Breteler *et al.*, 1994, 1998, CUR, 1995). This part is kept short because the extensive description on design of revetments incorporating geotextiles can be found in references and also is available online.*

4.2. GEO-MATTRESSES

The permeability of the mattress is one of the factors that determine its stability. It is found that the permeability given by the suppliers is often the permeability of the geotextile, or of the so-called filter points. In both cases, the permeability of the whole mattress is much smaller. A high permeability of the mattress ensures that any possible pressure build-up under the mattress can flow away, as a result of which the differential pressures across the mattress remain smaller. The stability is therefore the largest with a large mattress permeability. This permeability has to be determined experimentally and in the design it has to be taken into account that in time this permeability will decrease due to pollution or clogging.

*By introducing the concept of leakage length the indication of stability for various geo-mattresses can be given as shown in Figure 6 (Klein Breteler *et al.*, 1998, Pilarczyk, 2000, 2002). To obtain more accurate results it is recommended to perform permeability tests for mattresses as a whole (as a system) and some model/prototype tests for verification of stability; see also website for details <http://www.deltares.nl/en/knowledge-and-innovation>*

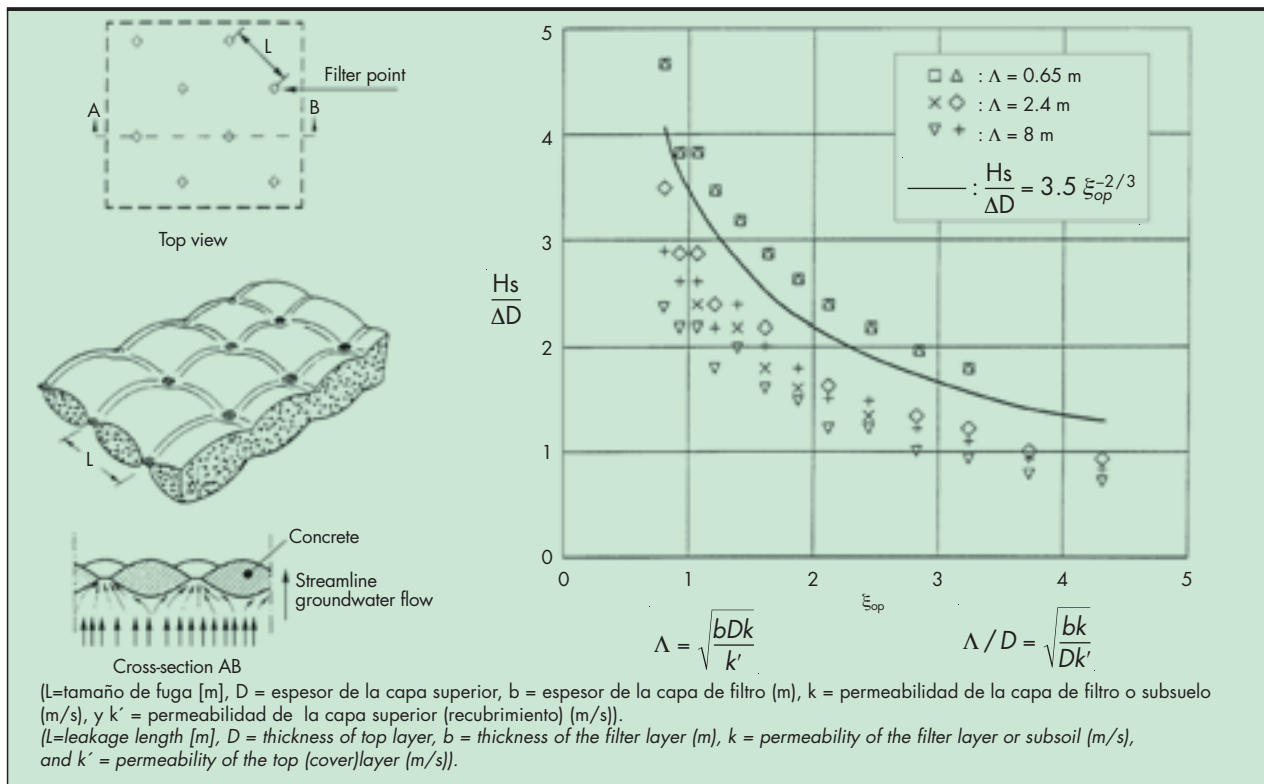


FIGURA 6. Cálculo de resultados para la estabilidad de colchones de hormigón. / FIGURE 6. Calculation results for stability of concrete mattresses.

2000, 2002.). Para obtener resultados más precisos, se recomienda realizar ensayos de permeabilidad para el conjunto (como sistema) y algunos ensayos tipo para la verificación de la estabilidad, consulte el sitio Web para obtener más información <http://www.deltares.nl/en/knowledge-and-innovation>.

El método de diseño con respecto a la estabilidad geotécnica se presenta en forma de diagramas de diseño. (Ver CUR 1995 Pilarczyk 2000). La altura máxima de la ola es una función del espesor equivalente igual a la suma de la capa de cubierta (ΔD) y el espesor del filtro (b_f).

5. GEOTUBOS Y GEOCONTENEDORES RELLENOS DE ARENA

5.1. INTRODUCCIÓN

Además de los geotubos y geocontenedores rellenos de arena, el objeto de la presente sección, también existen geotubos y geocontenedores rellenos de lechada. Estos pueden ser usados para drenar la lechada (tubos) o proporcionar algo de contención alrededor de la lechada. Estas estructuras tienen diferentes aspectos de diseño y no serán tratados en este trabajo. Un ejemplo de tales aplicaciones se puede encontrar en Lawson (2010). En principio, los geotubos rellenos de arena y los geocontenedores rellenos de arena son equiparables. El geotextil se envuelve alrededor de la arena o lechada para obtener un conjunto estructural que sea estable ante las corrientes y la acción del oleaje. Los tubos se utilizan en tierra o en aguas poco profundas. Un tubo grande de geotextil se rellena con arena mediante un relleno hidráulico. Las dimensiones pueden ser de hasta 4 m de altura. La Figura 7 y la Figura 8 muestran un momento durante la construcción de un geotubo y el resultado final de los diques construidos con geotubos rellenos de arena (como un núcleo), respectivamente. Se puede observar en la primera imagen que el geotubo se mantiene en la posición deseada mediante la fijación con pilotes. Una vez finalizado, el geotextil no es visible, ya que está cubierto con grava.

En aguas más profundas se utilizan geocontenedores. Se construyen en una barcaza que se abre y se transportan hasta la posición deseada. Allí, la barcaza se abre y el contenedor geosintético se vierte.

Con respecto a la profundidad del agua, los geotubos rellenos de arena y los geocontenedores son complementarios. Los tubos han de construirse en aguas poco profundas o en la costa. Los contenedores necesitan aguas más profundas, ya que la barcaza que se abre debe ser capaz de navegar para poder acceder al punto de colocación.



FIGURA 7. Momento de la construcción de una presa secundaria. /
 FIGURE 7. Moment in the construction of secondary dam.

The design method with regard to geotechnical (in) stability is presented in the form of design diagrams. (see CUR 1995, Pilarczyk 2000). The maximum wave height is a function of equivalent thickness equal to the sum of the cover layer (ΔD) and filter thickness (b_f).

5. SAND FILLED GEOSYNTHETIC TUBES AND CONTAINERS

5.1. INTRODUCTION

Apart from sand filled geotextile tubes and containers, the subject of this section, there also exist slurry filled geotextile tubes and containers. These can be used to dewater the slurry (tubes) or to have some containment around the slurry. These structures have different design aspects and will not be dealt in this paper. An example of such applications can be found in Lawson (2010). In principle sand filled synthetic tubes and sand filled geosynthetic containers are quite comparable. Geotextile is wrapped around sand or slurry to make a large structure that is stable in current and wave attack. Tubes are used on shore or in shallow water. A large geotextile tube is filled with sand by means of hydraulic fill. Dimensions can be up to 4 m high. Figure 7 and Figure 8 show a moment during construction of a geosynthetic tube and the final result of dams constructed with a sand filled geosynthetic tubes (as a core) respectively. It can be seen from the first picture that the geosynthetic tube is kept in the desired position by fixing it with piles. No geotextile is visible in the final result, because it is covered with gravel.

Geosynthetic containers are used in deeper water. They are constructed in a split barge and sailed to the desired



FIGURA 8. Dique secundario cuyo núcleo está construido con geotubos. /
 FIGURE 8. Secondary dam constructed with geosynthetic tubes as a core.

Ambos sistemas pueden ser utilizados en la construcción de un dique: contenedores geosintéticos para las partes más profundas y tubos geosintéticos para las partes menos profundas. La Figura 9 presenta una ilustración del vertido.

Los geotubos se utilizan sobre todo para la protección de la costa (Fowler *et al.* 2002 y Hornsey *et al.*, 2011). Los gecontenedores son utilizados para conseguir pendientes elevadas en un dique de arena, en sistemas de regeneración de playa. La posición de los contenedores tras su vertido ha de ser determinada mediante un aparato sonar.

Al diseñar geosistemas, hay que distinguir entre los tipos de geotextiles utilizados. Lo habitual es emplear los geotextiles tejidos y los no tejidos agujeteados. Los geotextiles tejidos ofrecen una elevada resistencia a tracción y baja elongación, pero peor comportamiento ante impactos. Los geotextiles no tejidos agujeteados son más gruesos (mejor comportamiento de filtración), pero presentan menor resistencia a tracción, elongación alta (se deforman) y un mejor rendimiento frente a la perforación (fuerzas de impacto). Todos ellos deben proporcionar suficiente protección a los rayos UV. Este tipo de propiedades deben ser consideradas para seleccionar el material más adecuado para cada proyecto.

5.2. HISTORIA Y POSICIÓN EN EL MERCADO DE LAS ESTRUCTURAS RELLENAS DE ARENA

Durante mucho tiempo, las bolsas rellenas de arena se han utilizado como reparación de emergencia en diques en los Países Bajos. La Figura 10 muestra la primera aplicación a gran escala en los Países Bajos en 1957, en el cierre de la Pluimpot, un pequeño estuario en los Países Bajos. Desde entonces se ha realizado con asiduidad (Lawson, 2010 Heerten 2000 CUR 217, 2006). Aunque hay bastante experiencia, las estructuras de arena rellena aún están presentes en el mercado de las estructuras costeras por las siguientes causas:

- En numerosas localizaciones el coste de las estructuras rellenas de arena es igual o superior que el de las estructuras tradicionales con grava y roca (Das Neves, 2011^a).
- Para soluciones permanentes, normalmente será necesario tener una capa de material granular, o tener un estricto programa de mantenimiento con inspecciones periódicas.



FIGURA 9. Ilustración de un contenedor de geosintéticos vertido. /
 FIGURE 9. Artist impression dumping of a geosynthetic container.

position. There, the split barge opened and the geosynthetic container is dumped in position.

With respect to the water depth sand filled geosynthetic tubes and geosynthetic containers are complementary. Tubes need rather shallow water or construction on shore. Containers need deeper water, because the split barge must be able to sail over the dumping location.

Both systems can be used in the construction of a dam: geosynthetic containers for the deeper parts and geosynthetic tubes for the more shallow parts. An artist impression of the actual dumping is presented in Figure 9.

Geosynthetic tubes are mostly used for coast or shore protection (Fowler *et al.* 2002 and Hornsey *et al.*, 2011). Geosynthetic containers are used to make steep slopes on a sand dike, hanging beaches. The positions of the containers after dumping have to be determined by sonar.

When designing geosystems, distinction must be made between the types of geotextile used. Usually woven and needle-punched nonwovens are applied. Woven geotextiles represent a large scale of tensile strength, low elongation but worse performance against impact. Nonwoven, needle-punched geotextiles are thicker (better filtration performance) but represent lower tensile strength, large elongation (shape deformation) and better performance against puncturing (impact forces). All of them must provide sufficient UV-protection. This kind of properties must be considered when selecting the most suitable material for specific project.

5.2. HISTORY SAND FILLED STRUCTURES AND POSITION ON THE MARKET

Sand filled bags have been used as an emergency repair for dikes during a long time in the Netherlands. Figure 10 shows the first large scale application in the Netherlands, the closure of the Pluimpot, a small estuary in the Netherlands in 1957. Since then quite a number of applications has been realised (Lawson 2010, Heerten 2000, CUR 217, 2006). Although there is quite some experience, the sand filled structures are still present in the market of coastal structures. This has the following reasons:

- At a number of locations sand filled structures have the same or a higher price level than traditional structures with gravel and rock (Das Neves, 2011^a).



FIGURA 10. El cierre de la "Pluimpot", 1957. /
 FIGURE 10. The closure of the "Pluimpot", 1957.

- En su diseño no hay reglas universalmente aceptadas, como las existentes para las estructuras tradicionales.

Por consiguiente en la mayoría de las aplicaciones de estas estructuras ocurre que:

- La estructura es temporal. La ventaja es que la estructura se puede quitar con facilidad.
- No se puede utilizar grava o roca porque dañaría las estructuras adyacentes o personas (surfistas), o no es admisible desde el punto de vista estético, por ejemplo en una playa.
- La grava o la roca no está disponible inmediatamente o no es deseable su empleo desde el punto de vista del medio ambiente, o el transporte de grandes cantidades de roca es peligroso.

5.3. FORMA DE LOS TUBOS Y CONTENEDORES RELLENOS DE ARENA

5.3.1. Grado de llenado

La forma habitual para describir el grado de llenado es comparar el área de sección transversal de un tubo o de un contenedor relleno de arena con el área teórica máxima de la sección transversal que es posible para una determinada circunferencia del geotextil. El máximo teórico se produce cuando la sección transversal de un tubo o contenedor (perpendicular a su eje mayor) fuese un círculo perfecto. Así que cuando se tiene la circunferencia (L) del geotextil en un tubo o contenedor, y el área de la sección transversal (A), el grado de relleno (d_{fill}) es:

$$d_{fill} = 4\pi \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

Esta definición se utilizará en adelante en el presente artículo. La diferencia entre un contenedor relleno de arena y un tubo relleno de arena después de la colocación es sólo una diferencia en el grado de relleno. Un contenedor tiene que ser arrojado con una barcaza y por lo tanto tiene que ser "estrujado" a través de la abertura de la barcaza. Esto limita el grado de relleno. Estas restricciones carecen de sentido para los tubos. Normalmente, el grado de relleno de un contenedor relleno de arena es 35 – 45% y para un tubo de 70 a 80%. Se utilizan diferentes definiciones para el grado de relleno. En el campo, se utiliza la relación entre la altura real de un tubo dividido por la altura máxima teórica. Esto se emplea porque es más fácil de medir en el campo. Para los contenedores geosintéticos, a veces se utiliza el volumen real del contenedor dividido por el volumen de la barcaza. Estas diferentes definiciones pueden ser bastante confusas y por consiguiente, uno debe asegurarse de qué definición se utiliza cuando se menciona un grado de relleno. En este trabajo sólo se utiliza la definición de la ecuación (3).

5.3.2. Forma

La forma de los tubos y contenedores rellenos de arena es importante ya que determina la altura del tubo o contenedor. La manera de calcular la forma es la misma para tubos y contenedores, sólo se diferencia en el grado de relleno. Mecánicamente hablado, un geotextil es una membrana. Puede resistir fuerzas de tracción, pero no de flexión. Esto significa que la curvatura de una parte del geotextil viene determinada por la relación entre la fuerza de tracción y la fuerza perpendicular al geotextil o en una situación de 2-D:

$$\frac{T}{r} = p \quad (4)$$

- For a permanent solution it will normally be necessary to have a cover of granular material, or to have a strict maintenance programme with regular inspections.
- There are no well accepted design rules, as there are for traditional structures.

Consequently most of the applications of these structures fulfil one or more of the following:

- The structure is temporarily. The advantage is then that the structure can be easily removed.
- Gravel or rock cannot be used, because it will harm adjacent structures or people (the last in case of a surf reef or groins), or is not acceptable from an aesthetic point of view, for example at a beach.
- Gravel or rock is not readily available, or not desirable to use from an environmental point of view, or transporting large quantities of rock is dangerous.

5.3. SHAPE OF SAND FILLED TUBES AND CONTAINERS

5.3.1. Degree of filling

The usual way to describe the degree of filling is to compare the cross-sectional area of a sand filled tube or container and compare that with the theoretically maximum cross-sectional area that is possible for given circumference of the geotextile. The theoretical maximum is when the cross-section of a tube or container (perpendicular to its longest axes) would be a perfect circle. So when the circumference (L) of the geotextile in a tube or container is given, and the cross-sectional area (A), the degree of filling (d_{fill}) is:

$$d_{fill} = 4\pi \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

This definition will be used in the remaining part of this article. The difference between a sand filled container and a sand filled tube after placement is only a difference in degree of filling. A container has to be dumped with a barge and therefore it has to be 'squeezed' through the barge opening. This limits the degree of filling. Such restrictions do not apply for a tube. Normally the degree of filling for a sand filled container is 35 – 45% and for a tube 70 to 80%. Different definitions for the degree of filling are used. In the field the ratio of the actual height of a tube divided by the theoretically maximum height is used. This is done because this is easier to measure in the field. For geosynthetic containers the actual volume of the container divided by the volume of the split barge is sometimes used. These different definitions can be rather confusing and therefore one should be sure what definition is used when a degree of filling is mentioned. In this paper only the definition by Eq. (3) is used.

5.3.2. Shape

The shape of sand filled tubes of containers is of importance because this determines the height of the tube or container. The way to calculate the shape is the same for a tube and a container, only the degree of filling is different. Mechanically spoken a geotextile is a membrane. It can take tensile forces, but no bending forces. This means that the curvature of a part of the geotextile is determined by the ratio of tensile stress and the stress perpendicular to the geotextile or in formula for a 2-D situation:

$$\frac{T}{r} = p \quad (4)$$

Siendo T la fuerza de tracción en el geotextil, r la curvatura del geotextil y p la presión que actúa sobre el geotextil (Timoshenko y Woinowsky-Krieger, 1959). Para calcular la forma del contenedor o tubo, se supone que la fuerza de tracción es constante a lo largo de la parte del geotextil en contacto con el relleno y no tiene contacto con el subsuelo. Este supuesto es válido cuando el contenedor geosintético se rellena con lechada. No es válido cuando el contenedor se rellena con arena, porque puede existir una tensión cortante entre la arena y el geotextil. Sin embargo, en general, las tensiones cortantes serán pequeñas porque la arena está suelta y por lo tanto el método de cálculo se puede utilizar con una precisión razonable para un contenedor relleno de arena. Con algunas transformaciones de coordenadas, que se describen en Timoshenko y Woinowsky-Krieger 1959, es posible calcular la curvatura del geotextil como una función de la altura para una determinada resistencia a la tracción (T) y una presión de partida (p) del relleno en la parte superior del contenedor o tubo y suponiendo que la presión aumenta hidrostáticamente con la profundidad (lo que implica que la curvatura también aumentará con la profundidad). El resultado de tal cálculo se muestra en la Figura 11.

La Figura 12 muestra cómo la forma del tubo relleno de arena está relacionada con la fuerza de tracción, la presión de relleno y el grado de relleno. Para la situación calculada, un grado de relleno extremo del 96% sólo es posible con una presión de llenado que sea equivalente a 5 m de columna de agua y dará lugar a una fuerza de tracción de 113 kN/m. Con una presión de relleno más habitual, el equivalente de 0,5 m de columna de agua dará lugar a un grado de llenado del 81%, que también está más cerca de los grados de relleno normalmente medidos.

Las mediciones muestran una buena concordancia entre estas formas determinadas teóricamente y las mediciones, Figura 13.

6. ESTABILIDAD DE GEOTUBOS Y GEOCONTENEDORES RELLENOS ANTE LA ACCIÓN DEL OLEAJE

6.1. INTRODUCCIÓN

Evaluando los mecanismos de fallo de los tubos y contenedores rellenos de arena, parece que el período de construcción es un período crítico. Los tubos pueden ser dañados por altas presiones de bombeo; los contenedores pueden ser dañados al dejar la barcaza o durante el impacto con el fondo. Hay que tener en cuenta estas circunstancias al diseñar un geosistema. Se puede encontrar información sobre estos mecanismos de fallo en Bezuijen *et al.* (2004). En este artículo nos centramos en tipos de fallo importantes tras la construcción, socavación y estabilidad frente a la acción del oleaje.

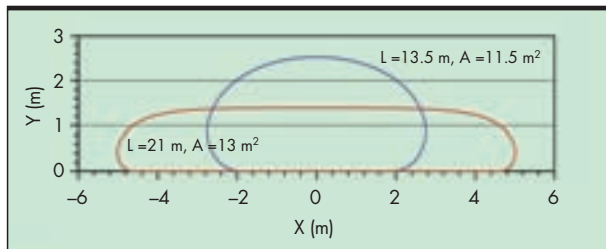


FIGURA 11. Forma de un contenedor geosintético ($L=21$ m, $A=13$ m², $d_{fill}=37\%$) y un tubo ($L=13.5$ m, $A=11.5$ m², $d_{fill}=79\%$). /
 FIGURE 11. Shape of a geosynthetic container ($L=21$ m, $A=13$ m², $d_{fill}=37\%$) and tube ($L=13.5$ m, $A=11.5$ m², $d_{fill}=79\%$).

With T the tensile force in the geotextile, r the curvature of the geotextile and p the pressure acting on the geotextile (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1959). To calculate the shape of the container or tube, it is assumed that the tensile stress is constant over the part of the geotextile in contact with the fill and has no contact with the subsoil. This assumption is valid when the geosynthetic container is filled with slurry. It is not valid when the container is filled with sand, because a shear stress can develop between the sand and the geotextile. However, in general the shear stresses will be small because the sand is in a loose state and therefore the calculation method can also be used with a reasonable accuracy for a container filled with sand. With some coordinate transformations, described in Timoshenko & Woinowsky-Krieger 1959, it is possible to calculate the curvature of the geotextile as a function of height for a given tensile strength (T) and a starting pressure (p) of the fill at the top of the container or tube and assuming that the pressure increases hydrostatically with depth (which means that also the curvature will increase with depth). The result of such a calculation is shown in Figure 11.

Figure 12 shows how the shape of the sand filled tube is related with the tensile force, filling pressure and the degree of filling. For the situation calculated, an extreme filling degree of 96% is only possible with a filling pressure that is the equivalent of 5 m water difference and will result in a tensile force of 113 kN/m. A more usual filling pressure the equivalent of 0.5 m water difference will lead to a degree of filling of 81%, which is also closer to the normally measured degrees of fill.

Measurements show that there is a good agreement between these theoretically determined shape and measurements, Figure 13.

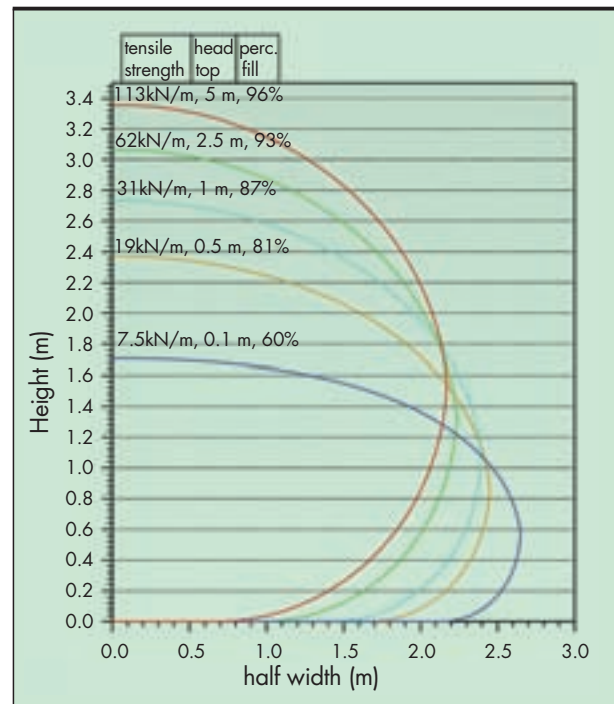


FIGURA 12. Relación entre la forma y la fuerza de tracción (kPa), carga piezométrica sobre el tubo (m) y grado de relleno (%). /
 FIGURE 12. Relation between shape and tensile force (kPa), piezometric head above the tube (m) and degree of fill (%).

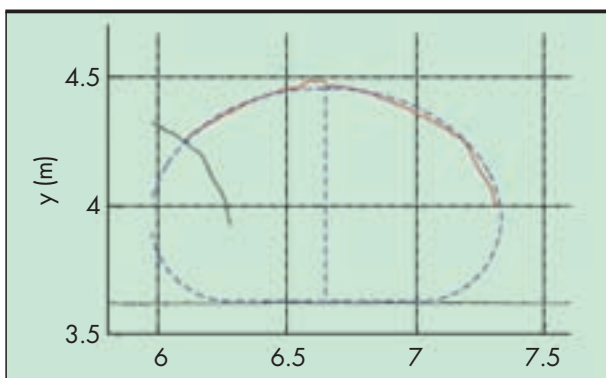


FIGURA 13. Forma medida en un ensayo modelo en el canal Delta (línea dibujada) comparada con la forma teórica (línea de puntos) (dimensiones modelo). / **FIGURE 13.** Measured shape in a model test in the Delta flume (drawn line) compared with the theoretical shape (dashed line). (model dimensions).

6.2. SOCAVACIÓN

Muy a menudo los tubos de geotextil rellenos con arena se utilizan en la playa como protección de la costa, véase la Figura 14 como ejemplo. Para estas estructuras la socavación es un modo de fallo importante. Cuando el punto más bajo del tubo no se encuentra lo suficientemente profundo en la arena, entonces tarde o temprano la estructura se debilitará y fallará. La posibilidad de socavación ha sido investigada por Das Neves (2011) en varios ensayos con modelos a escala. Como es habitual en los ensayos de socavación, hubo bastante dispersión en los resultados, pero los resultados indican que la profundidad de socavación de una estructura geotextil es comparable a la profundidad de socavación de una estructura de roca y grava (en teoría la socavación puede ser aún mayor, porque hay más movimientos de olas hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la parte más impermeable del geotextil).

En consecuencia, se puede mencionar que cuando la regla básica para un rompeolas tradicional es que la profundidad máxima de socavación será menor o igual a la altura de la ola incidente antes de que rompa, este es sin duda también aplicable al caso de estructuras hechas de geotextil y arena, y la protección de la parte inferior debe construirse de modo que pueda afrontar tal profundidad de socavación.

6.3. ESTABILIDAD ANTE EL OLEAJE

La estabilidad ante el oleaje de los tubos y contenedores rellenos de arena se ha probado recientemente en una serie de ensayos con modelos físicos en los Países Bajos. Análisis detallados de estos ensayos se encuentran en Van Steeg *et al.* (2011).

Los resultados de los ensayos condujeron a alguna adaptación de las fórmulas habituales de estabilidad para geotubos rellenos de arena, como se describe a continuación. Para los geocontenedores con un grado de relleno relativamente bajo, parece haber otro posible mecanismo de fallo adicional, que se llama el efecto oruga. Ambos mecanismos se describen en las siguientes secciones. Ambas series de pruebas se llevaron a cabo en el canal Delta de Deltares. Este canal tiene una longitud de 235 m, una anchura de 5 m y una profundidad de 7 m. En un extremo del canal se crearon olas irregulares con un espectro JONSWAP y una altura de ola, basada en el período de pico de la onda, de $s_{0,p} = 0,03$, en el

6. STABILITY SAND FILLED GEOSYNTHETIC TUBES AND CONTAINER UNDER WAVE ATTACK

6.1. INTRODUCTION

Evaluating the failure mechanisms of sand filled tubes and containers, it appears that the construction period is a critical period. Tubes can be damaged by too high pumping pressures; containers can be damaged during leaving the barge or during the impact on the bottom. In a design of a geosystem these failure mechanisms have to be taken into account. Information on these failure mechanisms can be found in Bezuijen *et al.* (2004). In this paper we focus on the failure mechanism of importance after construction, scour and stability against wave attack.

6.2. SCOUR

Quite often sand filled geotextile tubes are used at the beach as a coast protection, see Figure 14 for an example. For these structures scour is a major failure mode. When the lowest point of the tube is not located sufficiently deep in the sand, then sooner or later the structure will be undermined and fail. The possibility of scour is investigated by Das Neves (2011) in a number of small scale model tests. As usual with scour tests, there was quite some scatter in the results, but the results indicate that the scour depth of a geotextile structure is comparable to the scour depth of a rock and gravel structure (in theory the scour can be even more, because there is more wave run-up and run-down along the more impervious geotextile structure).

Consequently it can be mentioned that when the rule of thumb for a traditional breakwater is that the maximum scour depth will be less or equal to the incident unbroken wave height, this is certainly also the case for structures made of geotextile and sand and the toe protection should be built to cope with such scour depth.

6.3. STABILITY UNDER WAVE ATTACK

The stability of under wave attack of sand filled geotextile tubes and sand filled geotextile containers is recently tested in a series of physical model tests in the Netherlands. Tests details are reported by Van Steeg *et al.* (2011).

The results of the tests led to some adaption of the usual stability formulas for sand filled geotextile tubes, as will be described below. For the geotextile containers with a relative low degree of filling there appeared to be also a different failure mechanism possible, which was called the caterpillar effect. Both these mechanisms will be described in the following sections. Both test series were performed in the Delta flume of Deltares. This flume has a length of 235 m, a width of 5 m and a depth of 7 m. At one end of the flume irregular waves with a JONSWAP spectrum and a wave steepness, based on the peak wave period, of $s_{0,p} = 0.03$ was created, at the other end a structure made of geotextile elements was built. At all the test series, thus only woven geotextile containers were tested. The geotextiles had an opening size $O_{90} = 0.170$ mm. The experiments had a duration of around 1000 waves or until damage occurred. If no damage occurred during a test, a new test with a higher wave height was started.

6.3.1. Geosynthetic tubes

Figure 15 shows a picture taken during the tests in the Delta Flume and Figure 16 shows the configurations tested. All layouts except the 2-1 stack were displaced due to sliding of an individual element. Significant deforma-



FIGURA 14. Geotubo en la playa. / FIGURE 14. Geotube on the beach.

otro extremo fue construida una estructura con los elementos de geotextil. En todas las pruebas sólo se probaron geotenedores con geotextiles tejidos. Los geotextiles tenían una un tamaño de apertura de $O_{90} = 0.170$ mm. Los ensayos tuvieron una duración de alrededor de 1000 olas o hasta que se produjeron daños. Si no se habían producido daños durante el ensayo, se reiniciaba la prueba con una altura de ola mayor.

6.3.1. Geotubos

La Figura 15 muestra una fotografía tomada durante las pruebas en el Canal Delta y la Figura 16 muestra las configuraciones probadas. Todas las configuraciones excepto la pila 2-1 fueron desplazadas debido al deslizamiento de un elemento individual. No se produjo ninguna deformación importante de los tubos a excepción de aquél que estaba relleno al 55%. Este tubo se deformó de manera significativa. Tubos con un mayor grado de llenado se deformaron en función del grado de relleno, Figura 17.

El fallo de la pila 2-1 se produjo debido a un mecanismo de deslizamiento hacia el mar del tubo en la parte superior y del tubo que estaba colocado en el lado de la pila orientado hacia el mar. El deslizamiento hacia el mar pudo ser causado por una pequeña viga de madera que estaba fijada en el sector de tierra de los tubos en la subestructura de hormigón. Esta viga se utilizó porque la idea era que la superficie del hormigón era demasiado plana en comparación con una situación real donde los tubos se colocan en arena o en la parte superior de otros tubos. Sin embargo, el deslizamiento hacia el mar indica que puede haber también fuerzas hacia el mar significativas en la pila de 2-1. La estabilidad de un tubo apareció comparable a la estabilidad de los 2 tubos. El nivel de agua tiene una gran influencia en la estabilidad. Los geotubos rellenos de arena son mucho más estables por encima del nivel del agua, comparados con aquellos por debajo del nivel del agua. La estabilidad contra el deslizamiento de un tubo con su cima igual al nivel del agua para una ola más alta que la altura del tubo (D) se puede obtener con la fórmula:

$$\frac{C\sqrt{H_s}}{\Delta\sqrt{B}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0.65 \quad (5)$$

Donde, C es una constante que depende de la pendiente de la ola que varía entre 0,5 y 0,65, H_s la altura significativa de las olas, Δ la densidad relativa, B la anchura del tubo, f el coeficiente de fricción entre el geotextil y la subestructura de hormigón en las pruebas y α el ángulo de la subestructura de



FIGURA 15. Impacto de las olas en los tubos durante las pruebas del canal. / FIGURE 15. Wave impact on tubes during flume tests.

tion of the tubes did not take place except for the tube which was filled for 55%. This tube was significantly deformed. Tubes with a higher degree of filling deformed as a function of the degree of fill, Figure 17. Failure of the 2-1 stack occurred due to a seaward sliding mechanism of the tube on top and the tube which was placed on the seaward side of the stack. The seaward sliding may be caused by a small wooden beam that was fixed at the landside of the tubes on the concrete substructure. This beam was used because the idea was that the concrete surface was too flat compared to a real situation where the tubes would be placed on sand or on top of other tubes. However, the seaward sliding does indicate that there can be also significant seaward forces in the 2-1 stack. The stability of one tube appeared comparable to the stability of 2 tubes. The water level has a large influence on the stability. Sand filled geosynthetic tubes are much more stable above the water line, compared to below the water line. The stability against sliding for a tube with its crest equal to the water line for wave higher than the height of the tube (D) can be given with the formula:

$$\frac{C\sqrt{H_s}}{\Delta\sqrt{B}(f \cos \alpha + \sin \alpha)} \leq 0.65 \quad (5)$$

Where, C is a constant depending on the wave steepness varying between 0.5 and 0.65, H_s the significant wave height, Δ the relative density, B the width of the tube, f the friction coefficient between the geotextile and the concrete substructure in the tests and α the angle of the concrete substructure. For $C = 0.65$ and $\alpha = 0$ deg, this relation reduces until:

$$\frac{H_s}{B} \leq (\Delta \cdot f)^2 \quad (6)$$

hormigón. Para $C = 0,65$ y $\alpha = 0^\circ$, esta relación se reduce hasta que:

$$\frac{H_s}{B} \leq (\Delta \cdot f)^2 \quad (6)$$

Esta relación es similar a la ecuación de estabilidad tradicional de rompeolas que normalmente toma la forma:

$$\frac{H_s}{\Delta D} \leq C_c \quad (7)$$

Donde D es el diámetro de los bloques (altura media de tubo) y C_c una cierta constante que depende de varios factores. Aunque las ecuaciones (6) y (7) parecen similares, hay una diferencia notable. La influencia de D (la altura del tubo) no está disponible y la influencia de Δ es mucho más grande en la ecuación (7), puesto que Δ es llevada al cuadrado en la ecuación. Este resultado necesitaría realizar más comprobaciones, ya que en todos los ensayos Δ fue cercano a 1 por lo que la diferencia es pequeña. La fricción, sin embargo, fue modificada (mediante el uso de la construcción de la viga) y se encontró esta relación. Esa B en lugar de D parece comprensible. Una D más alta también dará más superficie expuesta, mientras que un aumento de la B da lugar a una mayor estabilidad a igualdad de superficie expuesta. Los ensayos aquí descritos se realizan con geotubos rellenos de arena con geotextiles tejidos. Recio y Oumeraci (2009) han realizado ensayos para estructuras comparables, pero a partir de materiales no tejidos. Sus fórmulas se pueden utilizar en caso de material no tejido. Muestran que en algunos casos también la deformación de la estructura bajo la acción del oleaje es importante, como también en el caso con contenedores geosintéticos rellenos de arena, ver a continuación.

Tubos de deformación

La cantidad de deformación del tubo relleno de arena resultó ser una función del porcentaje de relleno. El asiento relativo es pequeño solo para aquellos bien rellenos, pero aumentó significativamente en aquellos cuyo grado de llenado era inferior.

Esto significa que para minimizar los asentamientos después de la construcción, se necesita un porcentaje significativo de llenado de los tubos y más de un 80% de llenado. Para reducir, al menos en los ensayos modelo el asentamiento al 10% o menos, es necesario un relleno de más del 80%.

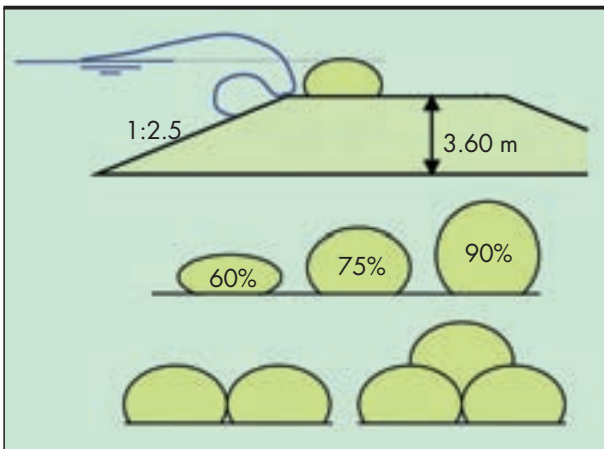


FIGURA 16. Configuraciones ensayadas. /
 FIGURE 16. Configurations tested.

This relation is similar to the traditional stability equation for breakwaters that normally takes the form:

$$\frac{H_s}{\Delta D} \leq C_c \quad (7)$$

Where D is the diameter of the blocks (average height of tube) and C_c a certain constant depending on various factors. Although the equations (6) and (7) look similar, there is a remarkable difference. The influence of D (the height of the tube) is not available and the influence of Δ is much larger in equation (7), since Δ is taken to the square in the equation. This outcome would need further testing since in all tests Δ was close to 1 and then the difference is only small. The friction, however, was varied (by using the beam construction) and this relation was found. That B instead of D is found is understandable. A higher D will also give more exposed surface, while an increase of B results in more stability for the same exposed surface. The tests described here are performed with sand filled tubes with woven geotextiles. Recio and Oumeraci (2009) have performed tests for comparable structures, but made from non-woven materials. Their formulas can be used in case of non-woven material. They show that in some case also the deformation of the structure under wave attack is important, as is also the case with sand filled geosynthetic containers, see below.

Deformation tubes

The amount of deformation of the sand filled tube appeared to be a function of the filling percentage. The relative settlement is only small for well filled but increased significantly for lower degrees of fill.

This means that to minimize settlements after construction, a significant filling percentage of the tubes is needed and more than 80% percentage of fill is necessary. To reduce, at least in the model tests the settlement to 10% or less a filling percentage more than 80% is needed.

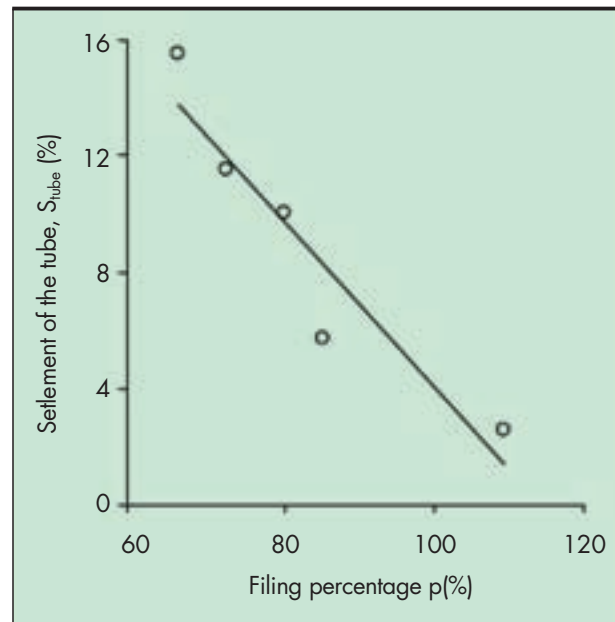


FIGURA 17. Asentamiento del tubo durante el programa de ensayos en función del porcentaje de relleno (Modificado de Van Steeg et al., 2011). /
 FIGURE 17. Settlement of tube during the test programme as a function of the filling percentage (Modified from Van Steeg et al., 2011).

6.3.2. Geocontenedores rellenos de arena

Se encontró un mecanismo de fallo adicional que ocasionaba el deterioro en los geocontenedores rellenos arena para altura de olas inferiores a lo previsto. En estas pruebas no sólo se producía el deslizamiento de los contenedores enteros, sino también la migración de la arena dentro del contenedor. Los ejemplos de cálculo mostraron que en los geosintéticos rellenos de arena con un grado de relleno del 60% o inferior, el relleno habitual de un contenedor geosintético producirá sólo una fuerza de tensión muy baja en el geosintético. En consecuencia, este puede comenzar a ondear bajo la acción del oleaje. Esto posibilita que las partículas de arena migren y comience lo que se denomina mecanismo de fallo 'oruga'. Todo el conjunto del geocontenedor parece moverse debido a la migración de la arena como una oruga de una excavadora que ocasiona una deformación progresivamente mayor. Venis (1968) también detectó este resultado en las pruebas de mayor escala con bolsas de arena. No se encontró en las pruebas de menor escala y por lo tanto Venis advirtió de los efectos de escala que pueden ocurrir cuando se realizan pruebas sólo a pequeña escala.

Una consecuencia de este mecanismo de oruga es que los geocontenedores rellenos de arena se deformarán a alturas de ola significativas superiores a 0,8 m según las mediciones en el canal. Esto limita la aplicación de los geocontenedores rellenos de arena en situaciones con acción significativa del oleaje. Sin embargo, esto en la mayoría de los casos no es un problema ya que, como se mencionó antes, es necesario volcar los contenedores con una profundidad mínima de 4 m. Frecuentemente, esto estará por debajo de la zona en la que se puede esperar la mayor acción del oleaje. Sólo habría de considerarse en áreas con mareas extremas.

Crterios de filtro

Estos ensayos también condujeron a otro hallazgo: se encontró bastante arena fuera de los contenedores. Desafortunadamente, no se puede excluir por completo que hubiera alguna junta estropeada en el contenedor. Sin embargo, la explicación más verosímil es que atravesara el geotextil aunque el geotextil con un d_{90} de 170 μm debería ser ajustado para la arena utilizada con un d_{50} de 194 μm .

No obstante, debe tenerse en cuenta que el movimiento de la arena dentro del contenedor permite también el movimiento de los granos más finos y que, donde no haya transporte de arena, los finos quedarán atrapados en la arena.

Con transporte de la arena, y 15% de los finos que pasan por el O_{90} , todavía es posible que este 15% sea extraído por lavado. Por consiguiente, si se permite un mayor movimiento de arena en la estructura son necesarias reglas de filtrado más estrictas.

7. CONCLUSIONES

A partir de los estudios descritos en este trabajo se presentan las siguientes conclusiones:

- Las reglas de filtrado provienen de las capas de suelo estable. Tienen que ser más estrictas cuando el suelo puede moverse por debajo de un filtro de geotextil, como cuando hay acción del oleaje en un geocontenedor relleno de arena.
- En aplicaciones de ingeniería costera el subsuelo en un filtro debería cumplir con los criterios de Kenny y Lau (ver sección 2.2) para asegurarse de que no se desarrollan capas impermeables en el subsuelo.

6.3.2. Sand filled geosynthetic containers

An additional failure mechanism appeared to result in failure at lower wave heights than expected for sand filled geosynthetic containers. In these tests there was not only sliding of the whole containers, but the sand migrated within the container. The example calculations in showed that sand filled geosynthetic elements with a degree of filling of 60% or less, the usual fill of a geosynthetic container will have only a very low tension force on the geosynthetic. Consequently this can start flapping under wave attack. This allows the sand grains to migrate and started what is called the 'caterpillar' failure mechanism. The whole geosynthetic container seems to move due to the migrating sand as a caterpillar from a bulldozer resulting in larger and larger deformation. This result was also found by Venis (1968) in larger scale tests on sand bags. It was not found in smaller scale tests and therefore Venis warned for the scale effects that can occur when tests are performed at only a small scale.

A consequence of this caterpillar mechanism is that sand filled geosynthetic containers will deform at significant wave heights higher than 0.8 m according the measurements in the flume. This limits the application of sand filled geosynthetic containers in situations with significant wave attack. This is, however, in most cases hardly a problem, since, as mentioned before, a minimum of 4 m water depth is necessary to dump the containers. Quite often this will be below the area where the largest wave attack can be expected. It should only be taken into account in areas with extreme tides.

Filter criteria

These tests also led to another result: quite some sand was found outside the containers. Unfortunately it could not be completely excluded that there was some bad seam in the container. However, the most plausible explanation is that it went through the geotextile although the geotextile with a d_{90} of 170 μm should be sand tight for the sand used with a d_{50} of 194 μm .

It should however be realized that sand movement within the container allows also the movement of finer grains and that where without sand transport the fines will be trapped in the sand.

With sand transport, and 15% of the fines is smaller than the O_{90} , it is still possible that this 15% is washed out. Therefore allowing more sand movement into the structure requires stricter filter rules.

7. CONCLUSIONS

From the studies described in the paper the following conclusions are possible:

- Filter rules are derived for stable soil layers. They need to be stricter when soil can move around underneath a geotextile filter, as is the case when there is wave attack at a sand filled geosynthetic container.
- In coastal engineering applications the subsoil in a filter should fulfil the Kenny and Lau criteria (see section 2.2) to be sure that there is no development of impermeable layers in the subsoil.
- The sand - geotextile boundary is in itself a resistance for the water flow perpendicular to the geotex-

- El borde arena-geotextil es en sí mismo una resistencia para el flujo de agua perpendicular al geotextil. Tal resistencia equivale a unos pocos centímetros adicionales de arena. El ensayo tipo de CEN / ISO “capacidad de flujo de agua normal al plano” que se realiza sin arena puede indicar una capacidad de flujo a una diferencia de presión estática determinada que es de hasta más de un orden de magnitud que la capacidad de flujo real cuando el geotextil es colocado en la arena. Esto significa que el ensayo de flujo es sólo un deficiente indicador de la capacidad de flujo real.
- La forma de un geotubo o geocontenedor relleno de arena se puede calcular con precisión suponiendo que el geosintético es una membrana y que la arena aplica una presión hidrostática sobre la membrana. La forma del tubo y el contenedor está entonces influenciada sólo por la densidad del relleno con respecto a la densidad del volumen fuera del tubo o contenedor (normalmente aire o agua) y la presión del material de relleno en la parte superior del tubo o del contenedor.
- La estabilidad de los geotubos rellenos de arena bajo la acción del oleaje se puede calcular utilizando las fórmulas dadas en este trabajo o en general por la fórmula presentada por Van Steeg *et al.* (2011). Para diferentes configuraciones, se pueden utilizar las fórmulas de Recio y Oumeraci, (2009).
- En lo relativo a la estabilidad de los geocontenedores rellenos de arena, parece existir un mecanismo de fallo adicional. En estos contenedores con un porcentaje de relleno relativamente pequeño (menos de 50%), parece posible que la arena migre dentro del contenedor lo que conlleva a un efecto de oruga, lo que desemboca en la deformación y la rotura a una altura de ola menor que cuando este tipo de fallo no aparece.

Observaciones generales

- Geosintéticos y geosistemas constituyen posibles alternativas para materiales y sistemas más convencionales. Merecen ser utilizados a mayor escala.
- El diseñador debería tener en cuenta que los geotextiles y geosistemas son solo una parte (o un componente) del proyecto total y deberían ser tratados e integrados en la perspectiva global de un proyecto dado.
- El control sistemático (internacional) de los proyectos realizados (incluyendo los casos de fallo) y la evaluación de los datos de prototipo y laboratorio pueden proporcionar información útil para los propósitos de verificación y mejora de los métodos de predicción. Las organizaciones nacionales e internacionales tienen también el papel de identificar esta falta de información y de lanzar estudios multi-clientes sobre amplios programas de control y ensayo, para proporcionar a los usuarios una evaluación independiente del comportamiento a largo plazo de los geosintéticos y los geosistemas.
- Todavía hay muchas dudas en los métodos de ensayo existentes. Por ello aún se necesita una amplia mejora de los métodos de diseño y más experiencia práctica bajo varias condiciones de carga.
- Hay una necesidad urgente de unas pautas aceptadas internacionalmente para el diseño y la aplicación de los geosistemas. La IGS en colaboración con otras organizaciones internacionales debería emprender acciones en esta dirección.

tile. Such resistance is equivalent to a few centimetres more sand. The index test CEN/ISO ‘water flow capacity normal to the plane’ that is performed without sand can indicate a flow capacity at a given head difference that is up to more than an order of magnitude higher than the real flow capacity when the geotextile is placed in sand. This means that the flow test is just a poor indicator of real flow capacity.

- *The shape of a sand filled geosynthetic tube or container can be calculated accurately by assuming that the geosynthetic is a membrane and that the sand applies a hydrostatic pressure on the membrane. The shape of the tube and container is then influenced only by the density of the fill with respect to the density of the volume outside the tube or container (this will normally be air or water) and the pressure of the fill material at the top of the tube and container.*
- *The stability of sand filled geosynthetic tubes under wave attack can be calculated using the formulas given in this paper or more in general by the formula presented by Van Steeg *et al.* (2011). For different configurations the formulas by Recio and Oumeraci, (2009) can be used.*
- *For the stability of sand filled geosynthetic containers, there appears to be an additional failure mechanism. In these containers with a relative small percentage of fill (less than 50%), it appears possible that the sand migrates within the container leading to a caterpillar effect, resulting in deformation and failure at a lower wave height than when this failure mechanism is not present.*

General remarks

- *Geosynthetics and geosystems constitute potential alternatives for more conventional materials and systems. They deserve to be applied on a larger scale.*
- *The designer should bear in mind that geotextiles and geosystems are only a part (or a component) of the total project and that they have to be treated and integrated in the total perspective of a given project.*
- *Systematic (international) monitoring of realized projects (including failure cases) and evaluation of the prototype and laboratory data may provide useful information for verification purposes and further improvement of prediction methods. It is also the role of the national and international organizations to identify this lack of information and to launch multi-client studies for extended monitoring and testing programmes, to provide users with an independent assessment of the long-term performance of geosynthetics and geosystems.*
- *There are still much uncertainties in the existing design methods. Therefore, further improvement of design methods and more practical experience under various loading conditions is still needed.*
- *There is an urgent need for internationally accepted guidelines for design and application of geosystems. The IGS in cooperation with other international organisations should undertake actions in this direction.*

8. BIBLIOGRAFÍA / REFERENCES

- Beek van, V. & Schenkeveld F.M. (2011) *Permeability measurements geotextile piping filter*. Private communication.
- Bezuijen A., M.B. de Groot, M. Klein Breteler, E. Berendsen.(2004), Placing accuracy and stability of geocontainers, *Proc. EuroGeo 3*, Munich, 2004; see also: <http://www.library.tudelft.nl/delftcluster/> (reports Delft Cluster 1, Coast and River).
- Bezuijen A. & Köhler H.-J. (1996) Filter and revetment design of water imposed embankments induced by wave and draw-down loadings. *Proc. EuroGeo 1*, Maastricht.
- CUR, (1995), Design manual for pitched slope protection, *CUR report 155, ISBN 90 5410 606 9*, P.O. Box 420, Gouda, the Netherlands.
- CUR 217 (2006) *Geosystems Design Rules and Applications* (in Dutch), CUR publication (English version expected in 2012).
- Das Neves L.P. (2011^a), private communication.
- Das Neves L.P. (2011^b), *Experimental Stability Analysis of Geotextile Encapsulated Systems under Wave loading*, Phd-Thesis, Porto University.
- Fowler, J., Stephens, T., Santiago, M. and De Bruin, P., 2002, Amwaj Islands constructed with geotubes, Bahrein, *CEDA Conference*, Denver, USA.
- Grauw A. de, Meulen T van der, Does de Bye, M. van de. (1983) *Design Criteria for Granular filters*. Delft Hydraulics, Publication No 287, January.
- Giroud, J.P. (2010), Development of criteria for geotextile and granular filters, *Proc. 9th Int. Conf. on Geosynthetics*, Guarujá, Brazil, 45-66.
- Heerten G., Jackson, A., Restall S., Saathoff F., (2000) New developments with mega sand containers of non-woven needle-punched geotextiles for the construction of coastal structures. *Proc. 27th ICCE*, Sydney.
- Heibaum, M., A. Fourie, H. Girard, G.P. Karunaratne, J. Lafleur, Palmeira, E.M. (2006), Hydraulic applications of geosynthetics, *Geosynthetics*, Millpress, Rotterdam. *Proc. 8th Int. Conf. on Geosynthetics*, Yokohama, Japan.
- Heibaum, M. (2004), Geotechnical filters – The important link in scour protection, *Proc. 2nd international conference on scour and erosion*, Singapore.
- Hornsey, W.P., Caeley J.T., Coghlan I.R., Cox R.J. (2011), Geotextile sand container shoreline protection systems: Design and application, *Geotextiles and Geomembranes, Volume 29, Issue 4, August 2011, Pages 425-439*.
- Kenney, T., and Lau, D. (1985). Internal stability of granular filters. *Can. Geotech. J.*, 22(2), pp. 215-222.
- Klein Breteler, M.; Smith, G.M.; Pilarczyk, K.W., (1994), Performance of geotextiles on clay and fine sand in bed and bank protections, *5th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Singapore. Also: part of Delft Hydraulics Publication 488, 1995.
- Klein Breteler, M.; Pilarczyk, K.W.; Stoutjesdijk, T., (1998), Design of alternative revetments, *26th International Conference Coastal Engineering*, Copenhagen, Denmark.
- Lawson, C. (2010). Geotextile containment. *Proceedings of 9th International Conference on Geosynthetics*, Guarujá, São Paulo, Brasil, pp. 307–322.
- Pilarczyk, K.W., (2000), Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering, *A.A. Balkema Publisher*, Rotterdam.
- Pilarczyk, K.W., (2002), Design of Revetments, *Hydraulic Engineering Institute*, Delft; www.tawinfo.nl (select: english, downloads).
- Pilarczyk, K.W., (2003), Design of low-crested (submerged) structures: An overview, *6th COPEDEC*, Sri Lanka; www.tawinfo.nl, (insert: english, downloads).
- Recio Molina, Juan Antonio, (2007), Hydraulic Stability of Geotextile Sand Containers for Coastal Structures - Effect of Deformations and Stability Formulae -, Phd-thesis, *Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technical University of Braunschweig*, Germany; <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00021899>.
- Recio J. & Oumeraci H. (2009), Process based stability formulae for coastal structures made of geotextile, *Coastal Engineering* 56, 632-658. doi: 10.1016/j.coastaleng.2009.01.011.
- Steeg P., Vastenburger E., Bezuijen A., Zengerink E., Gijt J. de. (2011). Large-scale physical model tests on sand-filled geotextile tubes and containers under wave attack. To be published *Proc. 6th Int. Conf. on Coastal Structures*, Yokohama.
- Timoshenko S. & Woinowsky-Krieger S.,(1959) *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill Book Company, Inc.