

# Die Kyoto-Straße: Ein Großversuch, Messungen und Berechnungen

Suzanne J.M. van Eekelen

Geodelft, Niederlande

Dimiter Alexiew

HUESKER Synthetic GmbH, Gescher

**KURZFASSUNG:** Ein neues Straßenkonzept auf weichem Untergrund wurde im Feld getestet. Es handelt sich um extrem flache Straßendämme auf Pfählen in Holland. Der Bodenkörper besteht aus recyceltem Boden, die schlanken Pfähle sind aus Holz mit Betonkappen, worauf eine hochfeste Geogitterbewehrung verlegt wird. Auf Grund der Wiederverwendung des Abfallmaterials und der Speicherung von C (Kohlenstoff) in den Holzpfählen ist die Straße umweltfreundlich. Der recycelte Boden und die Holzpfähle sind relativ preiswert. Die Haltbarkeit der Holzpfähle wird erreicht, indem sie unterhalb des Grundwasserspiegels positioniert werden, was in den Niederlanden gut möglich ist. Es werden Vergleiche durchgeführt zwischen Messergebnissen und gängige analytische Berechnungsverfahren, wobei sich einige als unsicher erweisen. Außerdem sind der Einfluß der Bodenbettung, des klimatischen Lauffeldes und der dynamischen Verkehrseinwirkung erkennbar.

**ABSTRACT:** A new road concept on soft subsoil was tested in situ: Extremely flat road embankments on piles in the Netherlands. The embankment consists of recycled soil, the slim piles are made of wood with concrete caps and high-strength geogrid reinforcement on them. Due to the use of dredged material after modification as fill and the storage of carbon in wooden piles the concept is environmentally friendly. The recycled soil and the wooden piles are relatively cheap. The durability of the wooden piles seems to be no problem because of their position completely below groundwater level, which is done in the Netherlands. Comparisons are performed between measurements and most common analytical design procedures. Also the influence of soft soil embedment (counterpressure), of climate and dynamic impact by traffic on the system has been identified.

## 1 EINLEITUNG

Das Nebenstraßennetz in den Niederlanden hat eine Gesamtlänge von ungefähr 100.000 Kilometern. Etwa die Hälfte dieser Straßen wurden auf sehr weichen Böden gebaut und unterliegen erheblichen Setzungen, normalerweise in einer Größenordnung von 1 Meter. Das Ziel der Studie war es, ein neues Straßenkonzept zu entwerfen und zu bauen, das drei Kriterien erfüllt. Der Straßenunterbau sollte so billig wie die konventionelle Bauweise sein, aus Abfall und erneuerbaren Materialien bestehen und setzungsfrei sein. Dem sich ergebenden Konzept wurde in Anlehnung an die Kyoto-Protokolle der Name „Kyoto-Straße“ verliehen. In einem Pilotversuch wurde diese „Kyoto-Straße“ als extrem flacher halbversenkter Damm mit Geogitterbewehrung auf Pfählen im November 2005 in Giessenburg in den Niederlanden gebaut. Im Folgenden werden das Konzept der „Kyoto-Straße“ sowie die Überwachungsergebnisse des Pilotversuchs bei intensiver Be-

nutzung vorgestellt und mit herkömmlichen Bemessungsmethoden verglichen.

## 2 DIE KYOTO-STRASSE, EIN UMWELTNEUTRALES UND KOSTENGÜNSTIGES KONZEPT

Für nachhaltige Mobilität in dicht bevölkerten Gebieten ist es erforderlich, die Bau- und Instandhaltungsarbeiten an den Straßennetzen zu minimieren. Gleichzeitig verursacht die ständige Mobilität eine ausgedehnte CO<sub>2</sub>-Verschmutzung in diesen Bereichen. Die Kyoto-Straße schlägt beide Probleme mit einer Klappe: mit einem nachhaltigen Straßendamm mit Geogitterbewehrung auf Pfählen und C-Speicherung in Holzpfählen. Es ist klar ersichtlich, dass sich hier der Kreis der grünen Mobilität schließt (niedriger CO<sub>2</sub>-Ausstoß).

Die Kyoto-Straße ist ein Damm auf Pfählen, der auf Grund der Wiederverwendung von „Abfallboden nach Modifizierung“ und der Speicherung von C (ein Teil von

CO<sub>2</sub>) in Holzpfählen umweltfreundlich ist. Der recycelte Boden und die Holzpfähle sind günstig. Die Haltbarkeit der Holzpfähle wird erreicht, indem die Pfähle unterhalb des Wasserspiegels in den Torfschichten positioniert werden.

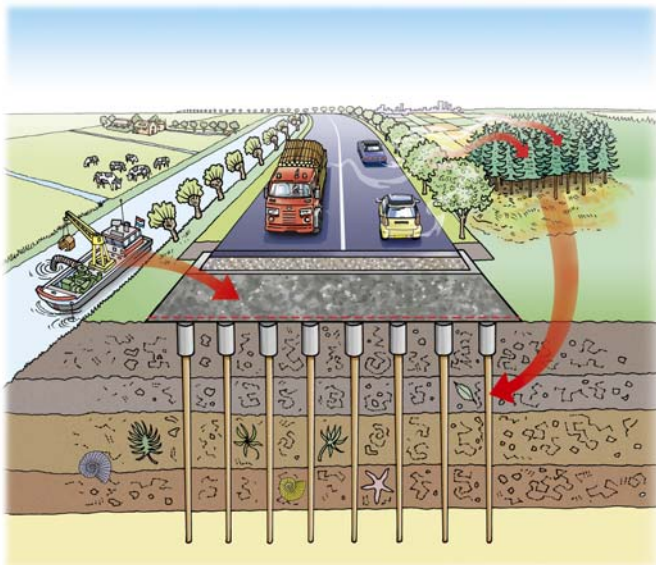


Abbildung 1. Die Kyoto-Straße

Die Lebensdauerkosten der Kyoto-Straße und einer konventionellen Straße wurden verglichen. Die zweispurige Straße ist 1 km lang und 8 m breit. Die konventionelle Baumethode besteht aus einer 3,0 m Sandaufschüttung einschließlich einer vorläufigen Schicht von 1,0 m Mächtigkeit, 10,0 m langen vertikalen Streifendrains mit einem Achsabstand von 1,0 m, einer Gründungsschicht und einer Asphaltsschicht. Die Bauzeit für diese Straße beträgt 2 Jahre.

Die Kyoto-Straße besteht aus 10,0 m langen Holzpfählen mit einem Pfahldurchmesser von 0,12 m und einem Achsabstand von 1,5 m, Pfahlkopfplatten mit einem Durchmesser von 0,3 m und einer Höhe von 0,4 m, Geokunststoffbewehrung, Dammmaterial aus (in diesem Fall) Sand von 1 m sowie einer Gründungsschicht und einer Asphaltsschicht. Die Bauzeit beträgt 1 Jahr.

Die detaillierte Kostenanalyse inklusive Wartung ergibt für 15 Jahre dass für die konventionelle Straße 841 Tsd. Euro (Netto Barwert) vorgesehen werden, müssen, für die Kyoto-Straße sind es 739 Tsd. Euro.

### 3 GROSSVERSUCH

In Giessenburg in den Niederlanden wurde die „Kyoto-Straße“ in einem Großversuch getestet (Abbildung 2). Ein Damm auf Pfählen wurde auf 13 m langen Holzpfählen, 0,4 m hohen Pfahlkopfplatten aus Beton mit einem Durchmesser von  $a = 0,3$  m (entsprechende Seitenbreite  $a_{eq} = 0,27$  m), Geogitter-Bewehrung und 1,15 m hohem

Dammmaterial aus einer „Hegemann“-Mischung, auch Hegemann-Sand genannt, (Hegemann 2004 und 2005) errichtet. Ein Messprogramm wurde durchgeführt, um verschiedene Bemessungsmethoden für die Bewehrung in Dämmen auf Pfählen zu validieren.

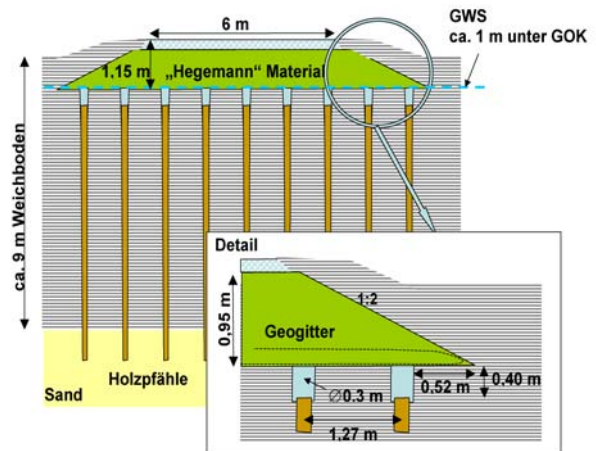


Abbildung 2. Aufbau des Großversuchs Kyoto-Straße

Die Hegemann-Mischung ist ein Gemisch aus Sand mit Schluffanteilen und chemischen Additiven. Während des Baus sieht sie aus wie eine Mischung aus Lehm und Sand. Proben aus dem Damm des Großversuchs (die einen Monat nach dem Bau der Kyoto-Straße entnommen wurden) weisen die in Tabelle 1 angegebenen durchschnittlichen Kennwerte auf.

$\gamma$	$\gamma_{dry}$	$w$	$K_v$	$\varphi$	$c_{oh}$
kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	% ds	m/s	°	kPa
20,0	17,0	18,1	2,1 E-9	33,8	11,5

Tabelle 1. Eigenschaften des Hegemann-Materials (Füllmaterial des Damms)

Dabei ist  $\gamma$  die Wichte,  $\gamma_{dr}$  die Trockenrohichte,  $w$  der Wassergehalt,  $K_v$  die vertikale Permeabilität,  $\varphi$  der innere Reibungswinkel und  $c$  die Kohäsion.

Folgendes wurde bei dem Großversuch registriert: Der Druck auf den Pfahlkappen, sowohl auf der Bewehrung als auch unterhalb der Bewehrung, die seitliche Verschiebung der Pfähle, der Grundwasserspiegel und die Poren drücke unterhalb des Damms. Die Messungen werden mehrere Jahre fortgeführt. In dieser Publikation werden die Ergebnisse der Messungen des ersten Jahres vorgestellt.

### 4 BEMESSUNG VON DÄMMEN AUF PFÄHLEN

Die folgenden herkömmlichen Bemessungsmethoden werden betrachtet (weiterführende Informationen zu den unterschiedlichen analytischen Verfahren zusammen mit

Erfahrungen aus Projekten finden sich z.B. in Alexiew (2004, 2005):

- Die so genannte „alte deutsche Methode“ beruht auf einer Kombination der Lastverteilungstheorie in einem punktuell gestützten Dammkörper von Hewlett & Randolph (1988) mit der klassischen Membrantheorie für die Geokunststoffbewehrung, vgl. Kempfert et al. (1997) (Die in EBGEO (2006) beschriebene, so genannte „neue deutsche Methode“ wird hier noch nicht berücksichtigt).
  - Die britische Norm BS 8006 (1995) unterscheidet Dämme, die höher oder geringmächtiger als  $1,4(s-a)$  sind, während Dämme mit einer Höhe von weniger als  $0,7(s-a)$  vermieden werden sollten ( $s$ = Pfahlaxialabstand,  $a$  = Kappe).
  - Mehrere skandinavische Modelle: Carlsson arbeitet mit einem 2D-Bodenkeil mit einem Scheitelwinkel von  $30^\circ$ . Rogbeck et al. (1998) erweiterten Carlssons Methode auf 3D-Bedingungen. Van Eekelen (2003) erweiterte Rogbecks Methode für unvollständige Gewölbe (geringmächtige Dämme), so dass die Auflast (das Verkehrsaufkommen) angemessen berücksichtigt wird. Die Methode von Svane et al. (2000) ist ein vollständiger 3D-Ansatz, der von der Annahme ausgeht, dass jede Pfahlkopfplatte einen 3D-Bodenkeil mit einer Neigung von  $\beta = 2,5$  bis  $3,5$  trägt.
  - McKelvey (1994) ist eine 2D-Theorie auf der Grundlage von Terzaghi, die die Materialeigenschaften des Dammmaterials vollständig berücksichtigt.
- Die Methodik der „verbesserten Gewölbewirkung“ - oft auch Guido-Verfahren genannt- gilt aufgrund neuerer theoretischer und praktischer Erkenntnisse als eher zu unsicher und wurde hier nur nebenbei verfolgt. Wir folgen hier internationalen Tendenzen/Ansichten, die in der neuen deutschen EBGEO, der britischen BS8006 und dem technischen Hinweis von Graham Horgan (2006), wo die Überarbeitung der BS8006 angekündigt wird, ausgedrückt sind.

Die Ergebnisse der Berechnungsmodelle werden in den Abbildungen 3 bis 5 verglichen. In Abbildung 3 wird der Spannungsreduktionsbeiwert  $S_{3D}$  gemäß Definition durch Low et al. (1994) verglichen:  $S_{3D} = w_g / (s^2 \gamma H)$ , wobei  $w_g$  (in kN) das Gewicht des Bodenkeils unterhalb des Gewölbes,  $s$  (in m) der Achsabstand zwischen den Pfählen,  $\gamma$  (in  $\text{kN/m}^3$ ) das spezifische Gewicht des Dammmaterials und  $H$  (in m) die Höhe des Damms ist. Der Wert von  $S_{3D}$  ist gegenläufig zu der „Pfähleffizienz“ nach Hewlett & Randolph (1988) bzw. zum deutschen „Umlagerungsfaktor“: Ein kleinerer  $S_{3D}$  aber ein größerer „Umlagerungsfaktor“ bedeuten das Gleiche, nämlich dass mehr Belastung direkt auf den Pfählen „landet“.

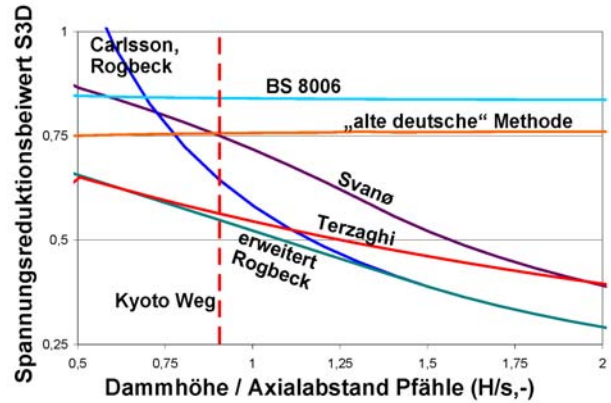


Abbildung 3. Spannungsreduktionsbeiwert  $S_{3D}$  gemäß Low et al. (1994), siehe Abschnitt 3 (Großversuch) und Tabelle 1, Auflast oder partielle Sicherheiten werden nicht berücksichtigt.

Nach Berechnung von  $S_{3D}$  für die Bemessung der Bewehrung werden die Zugbeanspruchungen in der Bewehrung berechnet. Wenn wir 3 % als mittlere Dehnung in der Bewehrung annehmen, erhalten wir die in Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse. Bei Hinzufügung einer Auflast (Verkehr) von 25 kPa erhalten wir die Ergebnisse in Abbildung 5.

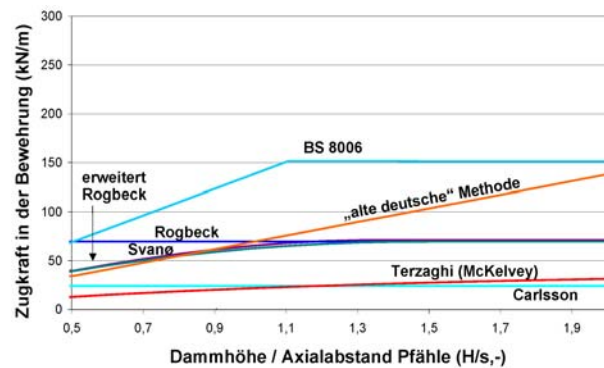


Abbildung 4. Zugbeanspruchungen in der Bewehrung nach unterschiedlichen Methoden, keine Auflast, keine partiellen Sicherheiten

Dabei ist der Einfluß von Spreizkräften nahe des Dammrandes nicht berücksichtigt, d.h. es wird nur die „von Pfahl zu Pfahl“-Wirkung erfasst. Die Methode „verbesserte Gewölbewirkung“ („enhanced arching“) alias Guido lieferte systematisch sehr geringe Zugkräfte und ist auf den Abbildungen 4 und 5 nicht dargestellt. Die Ergebnisse (Abb. 4 & 5) zeigen unter anderem den bekannten „Sprung“ bei der BS 8006-Methode. Bei niedrigeren Dämmen ist BS 8006 am konservativsten, bei höheren Dämmen und z.T. bei Auflast – die „alte deutsche Methode“.

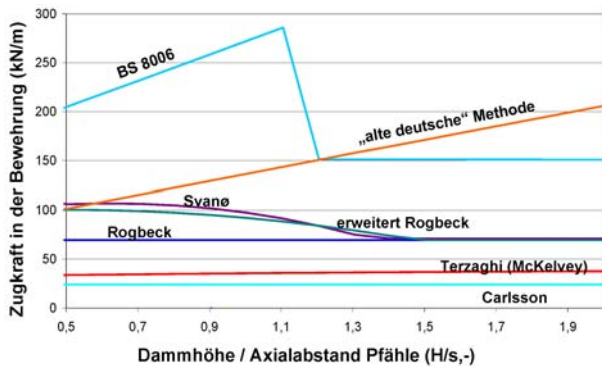


Abbildung 5. Zugbeanspruchungen in der Bewehrung nach unterschiedlichen Methoden. Auflast = 25 kPa, keine partiellen Sicherheiten

Bei der Berechnung von Dämmen auf Pfählen bleiben einige Fragen nach wie vor von Interesse und die folgenden werden hier anhand der verfügbaren Messergebnisse nach einem Jahr Großversuch Kyotoweg behandelt:

- Leistet der Weichboden zwischen den Pfählen einen entlastenden, nach oben gerichteten Gegendruck (effiziente Bettung)? Alle bisherigen analytischen Methoden mit Ausnahme der „alten deutschen“ (vereinfacht) und dem „neuen deutschen EBGEO Entwurf“ (präziser) berücksichtigen diesen etwaigen Gegendruck nicht, was auf der sicheren Seite liegt.
- Worin besteht der Einfluß der Dammbodenkennwerte und seines Zustandes? Zur Zeit wird z.B. die effektive Scherfestigkeit nur bei den „alten“ und „neuen“ deutschen Methoden berücksichtigt. Bei den anderen Modellen spielt sie keine Rolle.
- Worin besteht der Einfluß einer dynamischen Verkehrsbelastung insbesondere bei einem sehr flachen Damm?

Nun kurz konkret zu der Bewehrung beim Kyotoweg. Vergleichende Berechnungen und Bemessungen erwiesen sich erwartungsgemäß als stark differierend (Abb. 3, 4 & 5). Man orientierte sich letztendlich eher an den „alten und neuen“ deutschen Methoden: Es liegen jahrelange positive Erfahrungen mit der „alten“ vor (Alexiew 2004a, 2004b) und die „neue“ sollte unter Verwendung korrekter Ansätze präziser sein. Es bestanden aber weitere Unsicherheiten (verschärft durch das ungünstige Verhältnis Dammhöhe/Pfahlabstand und durch die erwünschten geringen Verformungen auch unter Schwerverkehr): Wichtige Vorangaben zu Kennwerten des Hegemann-Materials schwankten in der Projektphase spürbar und mit spürbarer Auswirkung, die anzusetzende Verkehrsbelastung schwankte auch, Unsicherheiten bestanden auch bezüglich der oben erwähnten Gegenpressung vom Weichboden etc. Man entschied sich letztendlich für eine Bewehrung mit den Geogittern Fortrac<sup>R</sup> 400/30 – 30 M quer zur Testfeld-Längsachse und Fortrac<sup>R</sup> 350/50 – 30 M parallel dazu. Um Arbeitshöhe beim extrem flachen Damm zu

gewinnen wurden die beiden Lagen direkt auf den Pfahlköpfen aus Beton und direkt aufeinander verlegt. Mitentscheidend für die Wahl waren sowohl die hohe chemische Beständigkeit der Fortrac<sup>R</sup> M-Familie aus Polyvinylalkohol (PVA) (Kontakt zum Pfahlkopfbeton und eine gewisse chemische Spezifik des Hegemann-Materials), wie auch deren hohe Kurz- und Langzeitdehnsteifigkeit (hohe Module, geringes Kriechen). Letzteres war wegen der hohen Verformungssensibilität des Flachdamms sehr wichtig. Das Testfeld Kyotoweg liegt direkt in der Einfahrt einer Bauunternehmung und wird somit intensiv mit schweren LKWs befahren. Das war natürlich gewollt, denn es geht um das Testen eines möglichen Prototyps für holländische Nationalstraßen. Die generelle Geometrie ist aus Abbildung 2 ersichtlich, der Verlegeplan für eine Bewehrungslage aus Abbildung 6. Abbildungen 7 und 8 zeigen die Verlegeebene z.T. mit Pfahlköpfen und das z.T. aufgebaute System mit noch nicht zurückgeschlagenen Geogittern. Der gesamte Aufbau erfolgte innerhalb von 3 Tagen Anfang November 2005. Aufgrund des sehr schlechten Wetters war der „Hegemann-Sand“ insbesondere im oberen Bereich eher zu feucht.

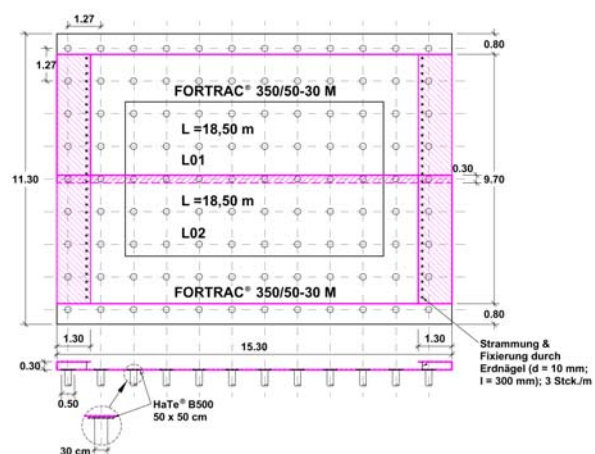


Abbildung 6. Verlegeplan für die Geogitterlage Fortrac 350/50-30 M



Abbildung 7. Gründungsebene, Pfahlpositionen, Pfahlköpfe



Abbildung 8. Aufbau des Großversuchs, Geogitter in beide Richtungen eingebaut und noch nicht zurückgeschlagen.

## 5 ERGEBNISSE DER MESSUNGEN

Die Messergebnisse aller Druckmessgeber TPC b1, TPC t1, TPC t2 und TPC t3 sind in Abbildung 9 dargestellt. Alle Druckgeber wurden auf Pfahlkappen platziert.

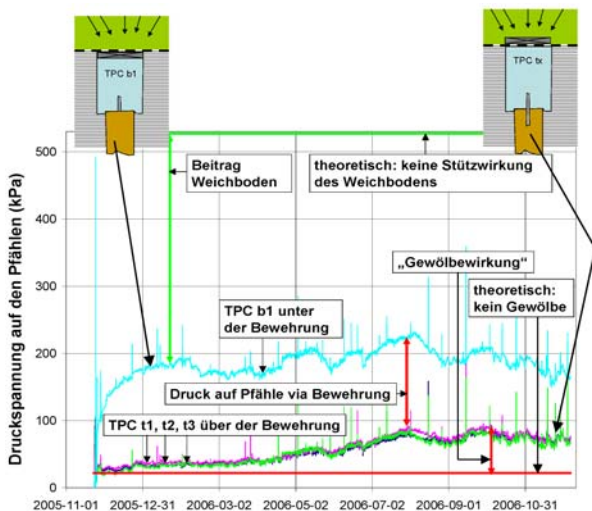


Abbildung 9. Gemessene Gesamtdrucke auf Pfählen während des ersten Jahres

TPC b1 wurde unterhalb der Bewehrung installiert und misst deshalb den Gesamtdruck auf den Pfahl einschließlich der Last, die direkt auf den Pfahl einwirkt, und der Last, die durch Zugbeanspruchungen in der Bewehrung auf den Pfahl übertragen wird. Wenn wir annehmen, dass die Pfähle die gesamte Last tragen (und der weiche Boden überhaupt keine Last trägt), können wir die erwartete Höchstbelastung auf den Pfählen bzw. Pfahlkappen berechnen:  $\gamma \cdot H \cdot (\text{Pfahlabstand})^2 / (\text{Pfahlfläche}) = (20,0 \cdot 0,95 + 15,9 \cdot 0,2) \cdot 1,27^2 / (\pi \cdot 0,147^2) = 527 \text{ kPa}$ . Dies ist mehr als das Doppelte des gemessenen Gesamtdrucks auf den Pfahl (TPC b1). Obwohl dies ein einziger Druckmessgeber unterhalb der Bewehrung ist, so entsteht doch der Eindruck, dass der weiche Boden mehr als die Hälfte

der Gesamtlast trägt. Es wird erwartet, dass diese Gegenpressung vom weichen Boden mit der Zeit abnimmt. Die Geber TPC t1, t2 und t3 wurden auf der Bewehrung installiert, direkt oberhalb des Pfahls. Diese TPCs messen den Druck, der direkt auf die Pfähle wirkt. Es ist möglich, den Druck zu berechnen, der gemessen werden würde, wenn keine Gewölbewirkung aufträte. In diesem Fall wird die gesamte Last genau vertikal übertragen, und die Last beträgt  $\gamma \cdot H = (20,0 \cdot 0,95 + 15,9 \cdot 0,2) = 22 \text{ kPa}$ . Sobald eine Gewölbewirkung auftritt, wird die Last teilweise seitlich übertragen, und die Druckmessgeber TPC t1, t2 und t3 sollten mehr als 22 kPa messen. Somit ist der vertikale Abstand zwischen TPC t1, t2, t3 und der horizontalen Linie bei 22 kPa in Abbildung 9 auf die Gewölbewirkung zurückzuführen.

Die Entwicklung des zunehmenden Drucks, der über das Geogitter auf die Pfähle übertragen wird, ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Messungen von TPC t1 bis t3 in Abbildung 9 und 10 sind ausführlich in Abbildung 11 dargestellt.

Wie aus Abbildung 9 bis 11 hervorgeht, verstärkt sich die Gewölbewirkung generell tendenziell mit der Zeit. Das geschieht bis zu einem gewissen Niveau und schwankt weiter ein bisschen. Diese anfängliche tendenzielle Zunahme ist wahrscheinlich auf gewisse puzzolanische Eigenschaften durch die Additive im Material zurückzuführen. Die Kyoto-Straße ist die Zufahrtsstraße zum Lagerplatz eines Bauunternehmers. Deshalb ist dort am Wochenende kein (starker) Verkehr. Die meisten Vormittage an Wochentagen beginnen damit, dass einige schwere Lastwagen die Kyoto-Straße passieren. In Abbildung 11 ist ausführlich dargestellt, dass die Gewölbewirkung sich während der Ruhezeiten verstärkt. Schwere Lastwagen verringern den Effekt an jedem Wochentag. Die Gewölbewirkung nimmt insbesondere während der relativ langen Weihnachtszeit zu. Die schweren dynamischen Lasten am Tag nach der Weihnachtszeit verringern die Gewölbewirkung wieder, aber nicht vollständig. Diese „Entfestigung“ des Dammmaterials unter dynamischer Einwirkung bzw. die Reduzierung der Gewölbewirkung korrespondieren mit den Erkenntnissen von Heitz (2006). Bei dem vorliegenden extrem flachen Dammkörper ist davon auszugehen, dass die dynamische Einwirkung unter den schweren LKW's den Körper vollständig durchdringt. Es ist wiederum so, dass bei der gewählten Bewehrung diese dynamisch „Gewölbereduzierung“ ohne negative Folgen für die Gebrauchstauglichkeit des Systems bleibt.

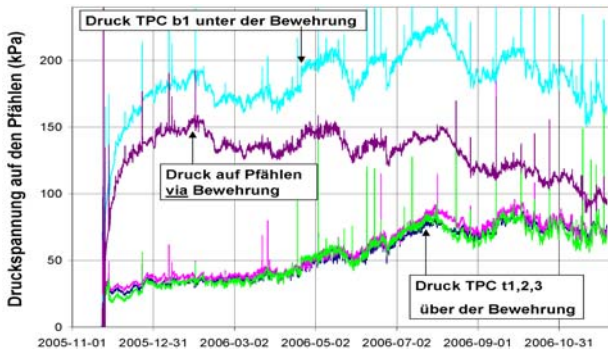


Abbildung 10. Der über Zugbelastungen in der Bewehrung auf die Pfähle übertragene Druck

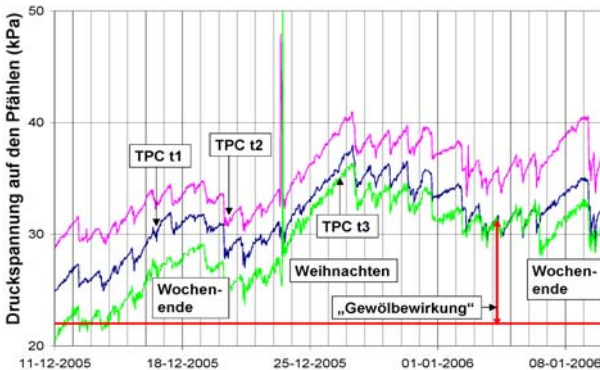


Abbildung 11. Ausschnitt aus Abbildung 9 und 10: Druck auf die Pfähle während der Weihnachtszeit.

Die nach oben gerichtete, die Bewehrung entlastende Weichbodengegenpressung (Bettung) zwischen den Pfählen ist ein wichtiges Thema. Sie hat sowohl faktisch als auch bemessungstechnisch (z.B. bei der „neuen deutschen“ Methode -EBGEO (2004) Entwurf Kapitel 6.9- oder bei numerischen Analysen) einen großen Einfluß auf das Systemverhalten und insbesondere auf die Zugbeanspruchung der Geokunststoffbewehrung. Mit ein entscheidender Punkt ist: Ist diese Bettung immer in einer in etwa konstanten Größe präsent, oder kann sie ohne Weiteres spürbar zurückgehen bis hin zum Ausfall (die Folge ist eine „freihängende“ Bewehrung). Die Abbildung 12 gibt einige wertvolle Hinweise:

Im Jahr 2006 waren die Monate Juni und Juli in den Niederlanden sehr heiß und trocken, der August war sehr regnerisch. Der Niederschlagsmangel (wenn die Verdunstung den Niederschlag überschreitet, erhöht dies den Niederschlagsmangel) ist in Abbildung 12 dargestellt, zusammen mit der entsprechenden Senkung des Grundwasserspiegels (GWS). Alle Druckspannungen (an sämtlichen TPC's) ändern sich praktisch zeitgleich signifikant.

- Der Gesamtdruck (d.h. auch der via der Bewehrung transferierte) auf die Pfähle nimmt stark zu (TPC b1)
- Der unmittelbare Druck auf die Pfähle nimmt zu (TPC t1 bis t3), jedoch weniger als der Gesamtdruck

Offensichtlich passiert Folgendes:

1. Die „Gewölbewirkung“ nimmt bei weniger Feuchtigkeit zu, weil sich die Scherfestigkeit des hier verwendeten Hegemann-Materials erhöht (auch im Labor festgestellt).
2. Die Beanspruchung in der Bewehrung nimmt zu, weil sich die Bettung (Gegenpressung) im Weichboden in Folge des gesunkenen GWS reduziert. Bei mehr Niederschlag und einem wieder erhöhten GWS tritt eine gegenteilige Entwicklung ein, mit der Ausnahme, dass der unmittelbare Druck auf die Pfähle (TPC t1 bis t3) weniger abnimmt, als er auf Grund der Trockenperiode zunahm.

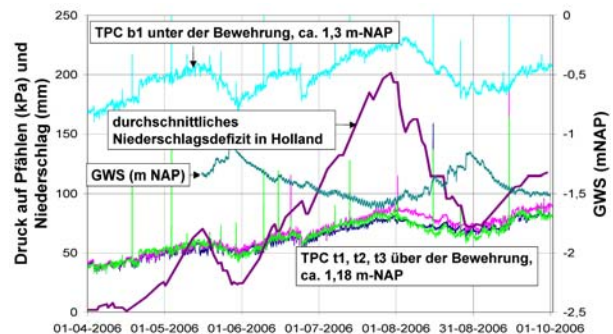


Abbildung 12. Einfluss des Niederschlags und des Niederschlagsmangels auf die Lastübertragung im Damm; NAP ist der normale niederländische Meeresspiegel (in m)

Die Ergebnisse in Abbildung 10 zeigen, dass die Bewehrung eine ziemlich große Ausgangsbelastung hat, wahrscheinlich auch wegen der Aufbau- und Verdichtungsbelastung und sie bleibt über mehrere Monate erhalten. Danach verringert sie sich geringfügig, wahrscheinlich wegen der o.g. tendenziellen Festigkeitszunahme des Hegemann-Materials.

Und zum Schluß (ohne Abbildung) auch ein wichtiges Messergebnis: Die seitlichen Verschiebungen der schlanken Pfähle, die durch die Geogitterbewehrung auch minimiert werden sollen, erreichten im Messzeitraum in der Tat keine nennenswerten Größenordnungen.

## 6 VERGLEICH MIT BERECHNUNGEN

Die meisten Bemessungsmethoden für Dämme auf Pfählen, mit Ausnahme der deutschen, gehen davon aus, dass der Untergrund überhaupt keine Last trägt. Die Belastung in den Berechnungen ist theoretisch in zwei Teile aufgeteilt:

- A. den Teil, der unmittelbaren Druck auf die Pfähle ausübt
- B. den Teil, der über Zugbeanspruchungen in der Bewehrung auf die Pfähle übertragen wird. Normalerweise

ist dies das Gewicht des Bodens unterhalb des theoretischen Gewölbes.

Die Messungen der Kyoto-Straße zeigen allerdings einen zusätzlichen Lastteil:

C. den Teil, der von dem weichen Untergrund getragen wird.

Um einen Vergleich der Messungen und Berechnungen zu ermöglichen, betrachten wir nur den Teil der Last, der von den Pfählen getragen wird. Deshalb wird der von TPC b1 ermittelte Gesamtdruck auf den Pfahl als „Gesamtbelastung“ betrachtet. In den Abbildungen 13 bzw. 14 sind A (unmittelbarer Druck auf die Pfähle) und B (Last, die durch Zugbeanspruchungen in der Bewehrung auf die Pfähle übertragen wird) dargestellt.

Diese Kurven werden mit den Anteilen des Spannungsreduktionsbeiwertes  $S_{3D}$  berechnet, wie vorstehend beschrieben.

Wir betrachten diese Anteile von  $S_{3D}$  für die Situation, in der die Auflast nicht berücksichtigt wird, da die Auflast nicht permanent vorhanden ist. Diese Anteile von  $S_{3D}$  werden mit der gemessenen Gesamtlast auf den Pfählen (TPC b1) multipliziert. Daraus ergeben sich die Kurven in Abbildung 14. Die Ergebnisse in Abbildung 13 werden berechnet, indem man die gesamte gemessene Last auf den Pfählen (TPC b1) mit  $(1-S_{3D})$  multipliziert.

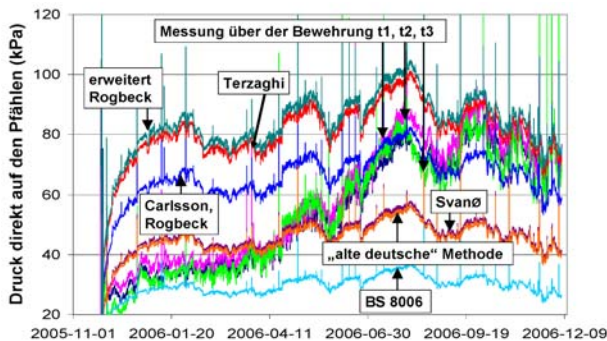


Abbildung 13. Unmittelbar auf die Pfähle übertragene Last, Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen. Kurven oberhalb (t1, 2, 3) bedeuten eine unsicherere Bemessung der Bewehrung.

Alle „Rechenkurven“, die in Abbildung 14 über den Messkurven (t1, 2, 3) liegen, liegen auf der unsicheren Seite für die Bemessung der Bewehrung. Die Kurve für die Methode Guido („verbesserte Gewölbewirkung“, „enhanced arching“) liegen hoch in diesem unsicheren Bereich und sind deshalb auf dem Diagramm nicht abgebildet.

Alle „Rechenkurven“, die in Abbildung 14 unter der Messung „Druck auf Pfählen via Bewehrung“ liegen, liegen auf der unsicheren Seite. Die Situation mit „Guido“ ist auch hier weit auf der unsicheren Seite und deshalb auch hier nicht abgebildet.

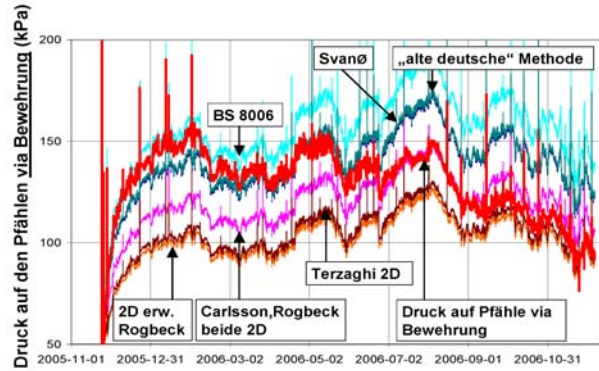


Abbildung 14. Durch Zugbeanspruchungen auf die Pfähle übertragene Last, Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen. Höher berechneter Druck auf den Pfahl (via die Bewehrung) bedeutet eine sicherere Bemessung der Bewehrung.

In den Abbildungen 13 und 14 erfolgen die Berechnungen nach Rogbeck (erweitert), Carlsson und Terzaghi in 2D. Rogbeck gibt jedoch einen 3D-Faktor an, der aber zur Berechnung der Zugbeanspruchung in der Bewehrung in einer späteren Phase des Bemessungsverfahrens dient. Somit verstehen sich die Ergebnisse in diesen Abbildungen als 2D. Es wird erwartet, dass 2D-Berechnungen eine unsichere, zu niedrige Vorhersage der Belastung der Bewehrung ergeben. In der Praxis kommt die 3D-Vorhersage von Svanø den Vorhersagen der erweiterten Rogbeck nahe.

In den Abbildungen 13 und 14 bewegen sich die alte deutsche Berechnung und die Berechnungen nach Svanø im selben Bereich. Die britische Berechnung nach BS8006 ist etwas vorsichtiger.

## 7 SCHLUSSBEMERKUNGEN

Bei dem Konzept der Kyoto Straße handelt es sich um einen extrem flachen Damm auf schlanken stehenden Pfählen mit hochfester ein- bis zweilagiger Geogitterbewehrung, die tief direkt auf den Pfahlkappen in einer Ebene liegt. Somit wird der Straßenkörper auf weichem Untergrund und bei hohem GWS von Anfang an dauerhaft setzungsfrei gegründet. Weil Baggergut aus Ablagerungen nach Modifizierung und Holzpfähle verwendet werden, ist das Konzept umweltfreundlich und für einen Berechnungszeitraum von 30 Jahren nicht teurer als die konventionelle (nicht problemlose) Flachgründung. Die bisherigen Messungen von ca. einem Jahr die weiterlaufen, lassen folgende erste Schlussfolgerungen zu:

1. Bei den Berechnungsverfahren (Belastung der Bewehrung): BS 2006 liegt durchgehend auf der sicheren Seite, die „alte deutsche“ Methode ist weniger konservativ aber immer noch sicher genug. Carlsson, Rogbeck und Terzaghi erscheinen z.T. unsicher, Guido („verbesserte Gewöl-“

- bewirkung“, „enhanced arching“) liegt stark auf der unsicheren Seite.
2. Der Beitrag der Gegenpressung vom Weichboden zwischen den Pfählen ist hier beträchtlich (bis über 50% der Last), ist aber nicht konstant und reduziert sich signifikant bei sinkendem GWS; es ist also Vorsicht geboten.
  3. Die Gewölbewirkung im Flachdammkörper reduziert sich bei dynamischer Belastung durch Schwerverkehr trotz der generellen Verfestigungstendenz bei dem hier verwendeten „Hegemann-Sand“ mit Additiven. Danach „erholt“ sich das Material z.T. wieder; bei Trockenheit nimmt die Gewölbewirkung zu.
  4. Die hier eingesetzte Geogitterbewehrung sichert die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Systems trotz der ungünstigen Geometrie, der schweren LKW-Belastung und gewisser Schwankungen in der Spannungsverteilung und der Bettung. Das gilt auch für die horizontalen Verschiebungen der schlanken Pfähle („Antispreizbewehrung“).

## DANKSAGUNG

Wir danken für die finanzielle Unterstützung und die Beiträge von Delft Cluster, Huesker, Van Biezen, Kantakun, des Ministeriums für Wasserwege und öffentliche Bauarbeiten - Ostniederlande, von Greenlease, Klimaat Neutraal und Hegemann.

## LITERATUR

- Alexiew, Dimiter , 2004, Geogitterbewehrte Dämme auf pfahlähnlichen Elementen: Grundlagen und Projekte. Bautechnik 81, Heft 9, Ernst und Sohn, Berlin, S. 710-716
- Alexiew, Dimiter, 2005, Piled Embankments in soft soils for railroads: Methods and significant case studies. Proc. Of the 6<sup>th</sup> International Conference on Ground Improvement Techniques, July 2005, Coimbra, Portugal, pp. 87-94
- British Standard, BS 8006, 1995, Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. BSi.
- Carlsson, B., 1987, Reinforced soil, principles for calculation, Teratema AB, Linköping (in schwedischer Sprache)
- EBGEO: Empfehlung „Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern“, Juli 2004, Entwurf EBGEO Kapitel 6.9. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). Fachsektion „Kunststoffe in der Geotechnik“ Arbeitskreis AK 5.2 „Berechnung und Dimensionierung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen“.
- Eekelen, S.J.M. van; Bezuijen, A.; Oung, O., 2003; Arching in piled embankments; experiments and design calculations, Proc. BGA Int. Conf. on Foundations, Dundee, September 2003 London, Telford, 2003, S. 885-894

- Gangakhedkar, Rutugandha, 2004, Geosynthetic Reinforced Pile Supported Embankments, Masters Thesis of the University of Florida, University of Florida
- Guido, V.A., Knueppel, J.D. and Sweeny, M.A., 1987 Plate Loading Tests on Geogrid-Reinforced Earth Slabs, Geosynthetics 1987 Conference, Volume 1, New Orleans, USA
- Hegemann, D., 2004, Hegemann-Verfahren, Baggerschlick zu Baustoff: Eignungsuntersuchung, & und Kämmerer Group, Bremen, Deutschland
- Hegemann, D., 2005, Aufbereitungsanlage De Meene, Aufbereitung von Baggergut, Hegemann & Kämmerer Group, Bremen, Deutschland
- Heitz, C., 2006, Bodengewölbe unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungslagen aus Geogitter. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 19
- Hewlet, W.J., Randolph, M.F. Aust, M.I.E, 1988, Analysis of piled embankments, Ground Engineering, April 1988, Volume 22, Number 3, 12-18
- Horgan, Graham, 2006, Code breaking, technical note in Ground engineering, Oktober 2006, S. 38 – 41.
- Kempfert, H.G., Göbel, C., Alexiew, D., Heitz, C., 2004, German recommendation for reinforced embankments on pile-similar elements, Proc. EuroGeo 3, München, S. 279-284
- Kempfert, H.G., Stadel, M., Zaeske, D., 1997, Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen, Bautechnik, Vol. 74, Heft 12, S. 279-284
- Low, B.K., Tang, S.K., and Chao, V.1994. Arching in piled embankments, J. of Geo. Eng., ASCE, 120(11), S. 1917-1926
- McKibben, James A., 1994, the Anatomy of Soil Arching, Geotextiles and Geomembranes 13 (1994) 317-329
- Rogbeck, Y., Gustavsson, S., Södergren, I. Lindquist, D. ,1998, Reinforced Piled Embankments in Sweden – Design, Aspects, Proc. of the 6th Int. Conf. on Geosynthetics 755-762
- Svanø, G., Ilstad, T., Eiksund, G., Want, A., 2000, Alternative calculation principle for design of piled embankments with base reinforcement, Proc. of the 4th GIGS in Helsinki
- Terzaghi, K., 1943, Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, USA, S. 66
- Zaeske, D., 2001, Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über Pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Heft 10, Februar 2001