

**Jahresbericht 2005**

# **Thermotragelemente aus hochfestem Faserverbundstoff und integrierten Vakuumisolationspaneelen**

Autor(en)	Olaf Huth
Beauftragte Institution	Empa Dübendorf
Adresse	Ueberlandstrasse 129
E-mail, Internetadresse	<a href="mailto:olaf.huth@empa.ch">olaf.huth@empa.ch</a> , <a href="http://www.empa.ch">www.empa.ch</a>
BFE Vertrags-Nummer	101'307
Dauer des Projekts (von – bis)	1. Juli 2005 – 31. Mai 2007

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Das vorliegende F&E Projekt beinhaltet die Optimierung eines bereits bestehenden Prototyps eines Thermotragelementes (TTE), bei dem zur Schnittkraftübertragung Glasfaserkunststoffstäbe (GFK) und als Wärmedämmung Vakuumisolationspaneelle (VIP) eingesetzt werden.

Im ersten Abschnitt des Projektes wurden die Werkstoffparameter der statisch wirksamen Bestandteile des Thermotragelementes (TTE) bestimmt. Dies umfasste die Bestimmung der Zug- und Biegemoduli sowohl für den GFK-Gewindestab als auch für das GFK-Rechteckprofil. Ferner wurde die Bruchlast auf Beanspruchung durch Zug des GFK-Gewindestabes bestimmt. Die Schubfestigkeit beider Profile wurde ebenfalls experimentell bestimmt.

Die Tests zur Sicherung der Korrosionsbeständigkeit wurden in Übereinstimmung mit der HITEK Construction AG auf das Jahr 2006 verschoben.

Ein Finite Elemente Modell des TTE wurde erstellt. Erste Resultate sind ab Februar 2006 zu erwarten.

Weiter wurden thermische Simulationen zu verschiedenen konstruktiven Varianten des TTE durchgeführt. Entgegen den Erwartungen ist eine Verbreiterung des Vakuumisolationspaneels von 20 mm auf 30 mm ohne durchschlagende Wirkung auf die Verringerung des Wärmestroms. Die Simulationen unterstreichen deutlich die positiven Eigenschaften einer Faserverbundstoff-Bewehrung des TTE hinsichtlich Wärmedämmung im Vergleich zu einer herkömmlichen Bewehrung aus Edelstahl.

Die Firma HITEK Construction AG beabsichtigt, das Produkt auch auf dem deutschen Markt zu platzieren. Erste Kontakte dazu wurden seitens der *Empa Dübendorf* mit dem *Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)* aufgenommen.

## Projektziele

### Allgemeine Projektbeschreibung

Das vorliegende F&E Projekt beinhaltet die Optimierung eines bereits bestehenden Prototyps eines Thermotragelementes (TTE), bei dem zur Schnittkraftübertragung Glasfaserkunststoffstäbe (GFK) (Gewindestäbe Firma: *Rockbolt Systems AG*; Rechteckprofil Firma: *EXEL GmbH Werk Voerde*) und als Wärmedämmung Vakuumisolationspaneele (VIP) eingesetzt werden. Zu untersuchende und einander bedingende Kriterien stellen Wärmedämmwirkung, Tragfähigkeit und Dauerfestigkeit sowie Korrosionsbeständigkeit insbesondere der statisch wirksamen GFK-Stäbe dar. Mit dem erfolgreichen Nachweis der Korrosionsbeständigkeit ist es möglich, die Stäbe und/oder Rechteckprofile anstatt wie beim Prototyp zu 30%, verbessert dann bis zu 50 % der Bruchspannung auszulasten. Die Dimensionierung des TTE für die Sicherung der Tragfähigkeit soll so erfolgen, dass ein duktiles (angekündigtes) Versagen, d.h. Fliessen des angrenzenden Bewehrungsstahles, eintritt. Für die statischen Berechnungen werden auch Finite Element-Simulationen eingesetzt. Eine höhere Auslastung der GFK-Stäbe hat weniger Durchstösse des VIP und damit einen höheren Wärmedurchlasswiderstand zur Folge. Diese Effekte wie auch andere konstruktive Änderungen werden durch thermische Simulationen quantifiziert. Änderungen, die aus statischen Erfordernissen notwendig sind, bewirken auch Änderungen im Wärmedurchlasswiderstand und umgekehrt. Die Optimierung des TTE ist deshalb ein interaktiver Prozess. Die Dauerfestigkeit des TTE wird durch einen Dauer-Belastungstest experimentell verifiziert und findet durch einen Beiwert in der Bemessung Berücksichtigung.

### Bedeutung und Ziel des Projektes

In der Überbauung in Saanen ist der Prototyp des Thermotragelementes (TTE) bereits mehrfach eingebaut (Abb. 1). Für diese konkrete Baustellensituation wurde im Vorfeld des *BFE*-Projektes zwischen dem *HITEK*-GFRP System und dem hinsichtlich Verringerung der Wärmeübertragung besten, zur Zeit am Markt erhältlichen Kragplattenanschluss *Isolan Plus* mit einer Edelstahllösung (Firma *SFS Locher*), eine vergleichende Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\psi$  durch die Empa Dübendorf durchgeführt. Das System *Isolan Plus* besitzt demnach einen 1.57fachen  $\psi$ -Wert gegenüber dem GFRP-System *HITEK*. Im Fall, dass ein VIP des GFRP-System *HITEK* auf eine Länge von 0.2m beschädigt wird, verringert sich dieser Faktor auf 1.28. Diese Faktoren sollen innerhalb des vorliegenden Forschungsprojektes noch einmal deutlich erhöht werden.

Die Ergebnisse einer Studie (angefertigt durch *Strobel&Partner AG*, Luzern) weisen auf eine jährliche Einsparung von Heizöl bei dem Einsatz des GFRP-System *HITEK* im Vergleich zum *Isolan Plus* für eine Wohnüberbauung mit 3 Balkonen mit je 8.75m Länge in Zürich (11.7 – 16.4 Liter) bzw. –bei der Annahme identischer Bauten- in Davos (18.5 – 26.0 Liter) hin.



Abb. 1: Eingebaute Prototypen von Thermotragelementen

## Stand des Projektes

Mit Abschluss des Jahresberichtes 2005 sollten folgende Tätigkeiten abgeschlossen sein:

- Sicherung der Korrosionsbeständigkeit
- Ermittlung der Werkstoffparameter
- Finite Element Modellierung
- Thermische Simulation des TTE

Die beiden letzten Punkte sind - entsprechend dem Zeitplan - noch in Bearbeitung.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### Sicherung der Korrosionsbeständigkeit

In gegenseitiger Abstimmung zwischen der *HITEK Construction AG* und der Abteilung *Ingenieurstrukturen* der *Empa Dübendorf* wurde der Nachweis der Korrosionsbeständigkeit bisher noch nicht erbracht. Grund dafür ist eine Konstruktionsänderung, bei der das 0.5 mm dicke Abdeckblech (Abb. 2) durch eine 3 mm dicke Glasfaserkunststoffplatte ersetzt wird. Ziel dieser Änderung ist eine Erhöhung der Wärmedämmwirkung. Dieser Effekt wird im Kapitel *Thermische Simulation* näher untersucht.

Bei den Tests zur Korrosionsbeständigkeit soll nachgewiesen werden, dass kein Eintrag des durch den angrenzenden Beton verursachten alkalischen Milieus in das TTE erfolgt. Die Schwierigkeit dabei ist, in das TTE die Feuchtigkeitssensoren [1] einzufügen, ohne durch die Verkabelung der Sensoren eine undichte Stelle in das TTE einzufügen.

Langzeitstudien [2], [3], [4] über einen Zeitraum von 5-8 Jahren, bei denen GFK-Stäbe in Betonstrukturen untersucht wurden, haben gezeigt, dass GFK-Stäbe im alkalischen Milieu nicht altern müssen, entgegen den Erwartungen, die aus Laborstudien [5], [6] begründet wurden. Als Gründe sind zu nennen [2], [3], [4]:

- Die in den Laborstudien untersuchten GFK-Stäbe waren einer hochprozentigen basischen Lösung und einer hohen Temperatur ausgesetzt. Der für die Korrosion notwendige Nachschub an  $OH^-$  Ionen war immer vorhanden. Dies ist bei porösen Betonstrukturen immer weniger der Fall, da mit Austausch an  $OH^-$  Ionen der PH-Wert der Lösung, die in den Poren vorhanden ist, stetig absinkt. Weiter ist mit wesentlich niedrigeren Betontemperaturen zu rechnen.
- Nicht alle Poren sind mit einer alkalischen Lösung gefüllt.
- Viele Poren im Beton sind nicht miteinander verbunden und damit ist der Nachschub an  $OH^-$  Ionen weiter eingeschränkt.

In diesen Studien sind jedoch die GFK-Stäbe nur einer geringen mechanischen Spannung ausgesetzt worden. Die Gefahr einer Spannungsrisskorrosion ist damit wesentlich geringer. Trotz dieser in den Studien gezeigten positiven Resultate halten die *HITEK Construction AG* und die *Empa Dübendorf* daher an der Notwendigkeit des Nachweises der Korrosionsbeständigkeit fest.

### Ermittlung der Werkstoffparameter

Die wichtigsten statisch wirksamen Bestandteile des TTE (Abb. 2) sind die GFK-Gewindestäbe (Aussendurchmesser 25 mm, Aussendurchmesser ohne Gewinde 23 mm) bzw. das Rechteckprofil (20 x 40 mm) sowie ihre angrenzenden Verbindungen über die Stahlmuffen zum sich anschließenden Bewehrungsstahl. Das Rechteckprofil zeichnet sich durch eine grösse Schubfestigkeit als der Rundstab aus und gilt deshalb als mögliche Alternative für den Ersatz des unteren Gewin-

destabes. Die Elastizitätsmoduli gehen als Stoffparameter in das Finite Elemente Modell ein. Tabelle 1 zeigt die notwendigen Tests.

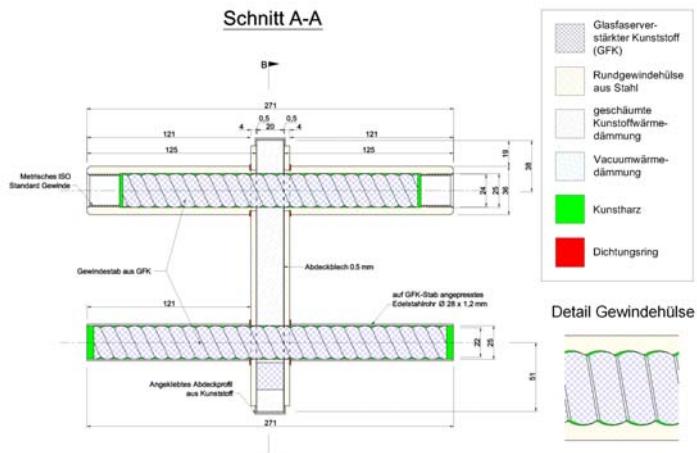


Abb. 2: Querschnitt des Thermotragelementes (TTE)

Tabelle 1. Versuchsprogramm zur Bestimmung der Elastizitätsmoduli und Bruchversuche

	Elastizitätsmodul	Bruch
<b>Gewindestab</b>		
Biegung	X	
Zug	X	X
Schub		Schubfestigkeit
<b>Rechteckprofil</b>		
Biegung	X	
Zug	X	
Schub		Schubfestigkeit

Tabelle 2: Mittelwerte der Biegemoduli

	Biegemoduli Mittelwert Probe [ N / mm <sup>2</sup> ]	Biegemoduli Mittelwert und Standardabweichung über alle Proben [ N / mm <sup>2</sup> ]
<b>GFK-Gewindestab</b>		
Probe 1-L	43090	
Probe 2-L	44001	
Probe 3-L	44316	
Probe 4-L	43888	
Probe 5-L	45796	44218 +/- 886
<b>GFK-Rechteckprofil</b>		
Probe 1	38653	
Probe 2	38099	
Probe 3	37594	
Probe 4	38111	38365 +/- 375

\*) L bedeutet Proben mit einer Länge, so dass diese nicht als Zugproben geeignet waren

### Biegemodul

Unter Biegemodul wird in der Norm DIN EN ISO 14125 [7] der Elastizitätsmodul unter Biegung verstanden. Die Biegemoduli wurden am Gewindestab und am Rechteckprofil nach DIN EN ISO 14125 mit einem Vier-Punkt-Biegeversuch bestimmt. Der Biegemodul wird aus dem Quotienten

Tabelle 3: Zugmoduli

Probe	Spannung $\sigma^H$ [N / mm <sup>2</sup> ]	Spannung $\sigma^I$ [N / mm <sup>2</sup> ]	Deh- nung $\varepsilon^H$ [%]	Deh- nung $\varepsilon^I$ [%]	Zugmodul [N / mm <sup>2</sup> ]	Zugmodul Mittelwert und Stan- dardabweichung über alle Proben [N / mm <sup>2</sup> ]
<b>Rechteckprofil</b>						
1	91.95	18.26	0.25	0.05	36845	
2	91.72	18.57	0.25	0.05	36578	
3	90.99	17.84	0.25	0.05	36575	
4	92.79	19.46	0.25	0.05	36665	<b>36666 +/- 110</b>
<b>GFK-Gewindestab (Spannungen bezogen auf einen Aussendurchmesser = 24 mm)</b>						
1	117.38	22.9	0.25	0.05	47239	
2	127.54	28.14	0.25	0.05	49704	
3	115.94	21.11	0.25	0.05	47415	<b>48119 +/- 1123</b>

der Differenz der Spannungen und der Differenz der Dehnungen bei  $\varepsilon = 0.25\%$  und  $\varepsilon = 0.5\%$  bestimmt:

$$E_B = \frac{\sigma^H - \sigma^I}{\varepsilon_{0.0025}^H - \varepsilon_{0.0005}^I} \quad (1)$$

Gemäss dem Prüfprogramm waren drei Proben erforderlich. Für einen verbesserten Datensatz wurden jedoch alle zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Proben (fünf Gewindestäbe und vier Rechteckprofile) in die Messung einbezogen. Für jede Probe wurde der Versuch fünf Mal durchgeführt und der E-Modul nach Gl. (1) berechnet. Im Anschluss daran wurden der Mittelwert und die Standardabweichungen bestimmt. Die Tabelle 2 fasst die Mittelwerte aller Stichproben zusammen.

### Zugmodul

Unter Zugmodul wird in der Norm DIN EN ISO 527-4 [8] der Elastizitätsmodul unter Zugbeanspruchung verstanden. Die Zugmoduli wurden nach der DIN EN ISO 527-4 bestimmt. Die GFK-Gewindestäbe wurden entsprechend ihrer Verwendung im TTE als kraftschlüssige Verbindung zwischen Stahlhülse und GFK-Gewindestab geprüft. Analog der Bestimmung des Biegemoduls wird der Zugmodul aus dem Quotienten der Differenz der Spannungen und der Differenz der Dehnungen bei  $\varepsilon = 0.25\%$  und  $\varepsilon = 0.5\%$  (Gl. 1) berechnet. Die Dehnungen wurden auf einer Länge von 200 mm ermittelt. Da die Längenmasse der GFK-Gewindestäbe, die für die Bestimmung des Biegemoduls genutzt wurden, die der Einbaulänge der Prüfmaschine überschritten, wurden drei andere Proben für die GFK-Gewindestäbe getestet. Die Proben der Rechteckprofile waren die gleichen, an denen vorgängig die Biegemoduli getestet wurden. Tabelle 3 fasst die Zugmoduli zusammen. Die grösseren Zugmoduli der Gewindestangen werden daraus ersichtlich.

*Maximale Zugkraft (Bruchversuch)*

In Tabelle 4 sind Bruchlast und Versagensart aufgelistet. Die Proben aus der Tabelle 4 wurden in der Reihenfolge Probe 1, Probe 3, Probe 4L, Probe 2 und Probe 5L getestet. Die Probe 3 versagte aufgrund des Einschnürens der Stahlhülse. Aufgrund des Versagens der Stahlhülse wurde die Einspannlänge der Stahlhülse bei den späteren Proben von 5.5 cm auf 7.0 cm erhöht. Auf die Zug-Bruchtests für die GFK-Rechteckprofile wurde in Übereinstimmung mit der *HITEK Construction AG* verzichtet.

*Tabelle 4: Bruchversuche der Gewindestäbe*

Probe	Bruchkraft [kN]	Bruchspannung* [N / mm <sup>2</sup> ]	Versagensart
1	219.0	484.1	Delamination des Stabes, teilweise Auszug aus der Hülse
2	258.0	570.3	Kopfbruch i.d. Hülse ca. 2cm vom Hülsenzrand entfernt
3	300.64	664.6	Einschnüren und Abriss der Stahlhülse
4L	333.03	736.1	Delamination des Stabes, teilweise Auszug aus der Hülse
5L	323.63	715.4	Kopfbruch i.d. Hülse

\*) Spannungen bezogen auf einen Aussendurchmesser = 24 mm

*Tabelle 5: Bruchkräfte und max. Schubspannungen der auf Schub beanspruchten Profile*

Probe	Maximale Kraft Q [kN]	Max. Schubspannung im Querschnitt [N / mm <sup>2</sup> ]	Verformung [mm]
<b>Rechteckprofil</b>			
1	80.36	75.34	1.53
2	79.46	74.49	1.56
3	79.67	74.69	1.57
4	81.03	75.96	1.59
<b>Gewindestab (Spannungen bezogen auf einen Aussendurchmesser = 24 mm)</b>			
1L	45.72	67.38	1.41
2L	47.99	70.72	1.42
3L	46.14	67.99	1.19

\* bei der Ermittlung der max. Schubspannung wurde bereits durch 2 dividiert

*Schubfestigkeit*

Für die Übertragung der Querkräfte sind die Schubfestigkeiten der verwendeten Profile bedeutsam. Generell kann die Wirkung von Biegemomenten bei solchen Versuchen nicht ausgeschlossen werden. Deshalb wurde ein – zur Einbaupraxis des TTE relevanter – Abstand von 2 cm zwischen Widerlager und Mittenteil gewählt, der der Dicke des Vakuumisolationspaneeels (VIP) entspricht. Alle Versuche wurden weggesteuert gefahren. Für die Ermittlung der Last-Verformungskurve wurde ein Wegaufnehmer mit einem Messbereich von 40 mm installiert.

Die Kraft-Verformungskurven für den Gewindestab besitzen bis zum Erreichen der maximalen Kraft einen leicht nichtlinearen Charakter. Nach dem Erreichen der Maximalkraft nimmt die Kraft stark ab, um später auf einem Niveau zwischen ca. 70% - 80% der Maximallast zu bleiben. Dies solange, bis der Bruch einsetzt bzw. bei den GFK-Gewindestäben die Kraft wieder ansteigt. Prinzipiell ist zu erkennen, dass das Rechteckprofil aufgrund der größeren Fläche größere Querkräfte abträgt. In Tabelle 5 sind die Maximalkräfte mit den zugehörigen Verformungen eingetragen. Da die Belastung auf zwei Widerlager aufgebracht wurde, ist die vom Thermotragelement aufnehmba-

re Maximallast  $Q$  durch den Faktor 2 zu dividieren. Die Gewindestäbe konnten nicht bis zum Bruch belastet werden, da die zunehmende Verformung auch die Versuchseinrichtung zu beeinträchtigen drohte.

### Finite Elemente Modellierung

Vom Thermotragelement (TTE) wurde ein Finite Elemente Modell (Abb. 3) mit dem Programm MARC Mentat [9] erstellt. Die Modellierung ist noch in Bearbeitung und deshalb werden in diesem Bericht noch keine Resultate präsentiert. Das Finite Elemente Modell soll im späteren Verlauf des Projektes helfen, Spannungen an den Bauteilen zu ermitteln. Änderungen der Konstruktion, die

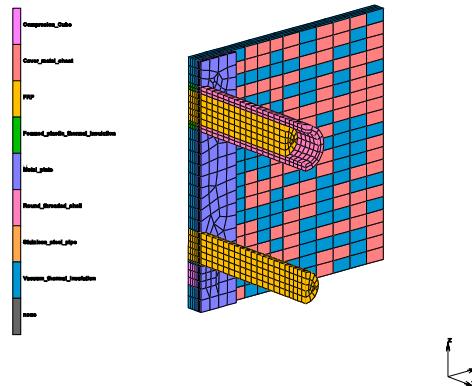


Abb. 3: Finite Elemente Modell

sich aus den wärmetechnischen Erfordernissen ergeben, sollen im FE-Modell abgebildet und deren statische Wirkung studiert werden. Das TTE besitzt eine doppelte Symmetrie und braucht deshalb nicht voll abgebildet zu werden. Es ist lediglich notwendig, einen Teil des gesamten TTE zu modellieren. Dadurch verringern sich die Rechenzeiten. Lediglich die Randbedingungen und die Lasten müssen angepasst werden.

### Thermische Simulation

Für das Studium des Wärmedurchlasswiderstandes des TTE wurde dieses mit Hilfe des Programms TRISCO & KORBU 86 [10] modelliert. Das Modell wurde auf eine Fläche von 1m Höhe x 0.2m Breite begrenzt. Eine Ausweitung der Dimensionen stellt kein Problem dar, ist aber für das Studium der einzelnen Effekte, die sich aus der Änderung der Konstruktion ergeben, nicht notwendig. Als Ausgangsgeometrie wurde die Zeichnung nach Abb. 2 gewählt (Variante a). Folgende Parameter wurden variiert:

- Variante b: Ersatz des durch VIP abdeckenden Bleches durch eine GFK-Platte 3 mm dick
- Variante c: Ersatz der GFK-Stäbe durch Edelstahl
- Variante d: Erhöhung der Dicke des VIPs von 20 mm auf 30 mm

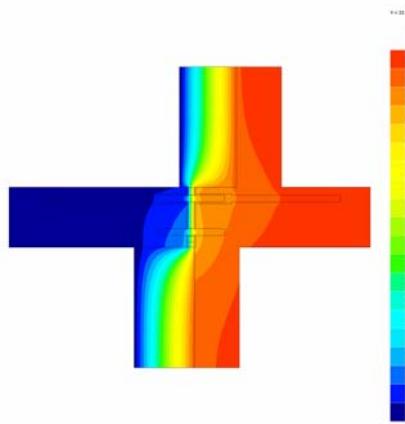


Abb. 4: Isothermen Mitte TTE mit VIP 20 mm (Variante a)

Die Abb. 4 zeigt den Verlauf der Isothermen für die Variante a. Die grosse Bedeutung der GFK-Stäbe wird noch einmal durch einen Vergleich der Varianten a und c unterstrichen (Tabelle 6). Der Ersatz des VIP Abdeckbleches verringert den Verlust im modellierten Detail um ca. 4%. Eine Verbreiterung des VIPs um 10 auf 30 mm hat eine Reduktion des Wärmeverlustes um ca. 9% zur Folge. Dies ist aber kritisch zu sehen, da einerseits die Anschaffungskosten ansteigen würden, andererseits das Biegemoment auf die GFK-Stäbe erhöht und dadurch die Schubtragfähigkeit der Stäbe verringert wird. Dies hätte eine grössere Anzahl von Durchstössen und damit wieder eine Verminderung der Wärmedämmung zur Folge. Die Optimierung dieser Parameter im Bezug zum Anschaffungspreis ist Teil des Projektes.

Tabelle 6: Wärmeverluste im modellierten Detail

Variante	Wärmeverlust im modellierten Detail (Watt)
a	1.379
b	1.324
c	3.53
d	1.25

## Nationale Zusammenarbeit

Bereits vor der Bewilligung des BFE-Projektes existierte durch die Bearbeitung von Prüfaufträgen eine gute Zusammenarbeit zwischen der *Empa Dübendorf* und der *HITEK Construction AG*. Mit der Bewilligung und insbesondere mit stetigem Fortschritt des BFE-Projektes hat sich die Zusammenarbeit immer stärker intensiviert.

Die Zusammenarbeit mit dem BFE wird als durchwegs konstruktiv, hilfreich und unbürokratisch empfunden.

Von der Arbeitsgruppe Vakuumdämmung (AG VIP) der Technologie-Vermittlung des energiecluster.ch erfolgte eine Einladung zu einem Kick-off Treffen. Diese Arbeitsgruppe soll die Verbreitung von VIPs in der Schweiz fördern.

## Internationale Zusammenarbeit

Bisher keine, ausser ersten Kontakten zum Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt).



## Referenzen

- [1] [www.diselectric.com](http://www.diselectric.com)
- [2] Mufti, A., Onofrei, M., Benmokane, B., Banthia, N., Boulfiza, M., Newhook, J., Bakht, B., Tadros, G., Brett, P. "Durability of GFRP Reinforced Concrete in Field Structures", *7<sup>th</sup> International Symposium on Fibre Reinforced Polymer reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-7)*, New Orleans, Louisiana, November 7-10, 2005
- [3] Mufti, A., Onofrei, M., Benmokane, B., Banthia, N., Boulfiza, M., Newhook, J., Bakht, B., Tadros, G., Brett, P. "Report on the Studies of GFRP Durability in Concrete from Field Demonstration Structures", Composites in Construction, *3<sup>rd</sup> International Conference*, Lyon France, 11-13 July, 2005
- [4] Benmokane, B., Cousin, P., "University of Sherbrooke GFRP Durability Report", ISIS Canada, April 2005
- [5] Porter, M. L., Barnes B.A., "Accelerated Durability of FRP Reinforcement for Concrete Structures", *1st International Conference on Durability of Fibre Reinforced Polymer Composite for Construction*, CDCC'98, Sherbrooke (Quebec), Canada, 1998
- [6] Sen, R., Mullins, G., Salem, T., "Durability of E-Glass / Vinyl Ester Reinforcement in Alkaline Solution", *ASI Structural Journal*, V.99, No. 3, pp. 369-375
- [7] Bestimmung der Biegeeigenschaften, DIN EN ISO 14125, Ausgabe Juni 1998
- [8] Bestimmung der Zugeigenschaften, DIN EN ISO 527-4, Ausgabe 1997
- [9] MARC Mentat, MARC Analysis Research Corporation, 1994
- [10] TRISCO & KORBU 86, Version 10.0w, 2002