

Überwachungsmessungen im *rewirpowerSTADION* Bochum

Manfred Bäumker
Hochschule Bochum
Fachbereich Vermessung und Geoinformatik
44801 Bochum
manfred.baeumker@hs-bochum.de

1 Einleitung

Aufgrund der Katastrophen der letzten Jahre im Zusammenhang mit dem Einsturz öffentlicher Gebäude hat die Gewährleistung der Sicherheit von öffentlichen Gebäuden einen deutlich höheren Stellenwert bekommen. Im Rahmen der 2006 begonnenen und Ende 2008 abgeschlossenen Sanierung der 38 Spannbetonbinder des ca. 30 Jahre alten *rewirpowerSTADIONs* des VFL Bochum (ehemals Ruhrstadion Bochum, s. Abb. 1) hat sich die Stadt Bochum als Eigentümer des Stadions entschlossen ein Messsystem zur permanenten Höhenüberwachung aller 38 Binder, die die gesamte Traglast der Dachkonstruktion aufnehmen müssen, zu installieren. Die Hauptanforderungen an das Messsystem waren neben den Genauigkeitsanforderungen (Alarmierungsgrenzwert für die Höhenkomponente: 15 mm) ein permanenter Messbetrieb während der mehrjährigen Sanierungsarbeiten an den Bindern und eine automatische Alarmierung per SMS bei Überschreitung der Grenzwerte.

Die bis dato durchgeführten permanenten Messungen eignen sich vorzüglich für eine detaillierte Analyse der Verformungen der Binder als Folge von äußeren Einflüssen wie Temperatur, Regen, Wind und Schneelasten. Die Ergebnisse dieser Analyse sind ein wertvolles Hilfsmittel die auf Hypothesen basierenden statischen Berechnungen über das dynamische Verhalten des Bauwerkes zu überprüfen und zu verfeinern.



Abb. 1: Das *rewirpowerSTADION* des VFL Bochum mit den 38 Spannbetonbindern

2 Das Messsystem zur Überwachung der 38 Spannbetonbinder

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten und der besonders einfachen und unkomplizierten Installation, die auch einen reibungslosen Betrieb während der Sanierungsphase erlaubte, wurde für die höhenmäßige Überwachung der Spannbetonbinder ein tachymetrisches Messsystem konzipiert. Ziel der Überwachung ist es, möglichst frühzeitig einen Riss eines der 7 Spannbetonglieder im Binder zuverlässig zu erkennen. Abb. 2 zeigt die Konstruktion eines ca. 26 m langen Binders, in dem der Bereich der höchsten Beanspruchung, wo auch die Spannglieder befestigt sind, extra gekennzeichnet ist. Ein Riss eines der Spannglieder würde nach den statischen Berechnungen eine Höhenänderung an der Binder Vorderseite von wenigen Zentimetern nach sich ziehen, so dass das Messsystem in der Lage sein muss, zuverlässig Höhenänderungen mit einer Standardabweichung von besser als 1 cm zu erkennen. Dabei müssen die Höhenänderungen von den bis dato unbekanntem Änderungen durch äußere Einflüsse, wie z. B.

Temperatur, Luftdruck, Winddruck, Wasser- und Schneelast, getrennt werden können.

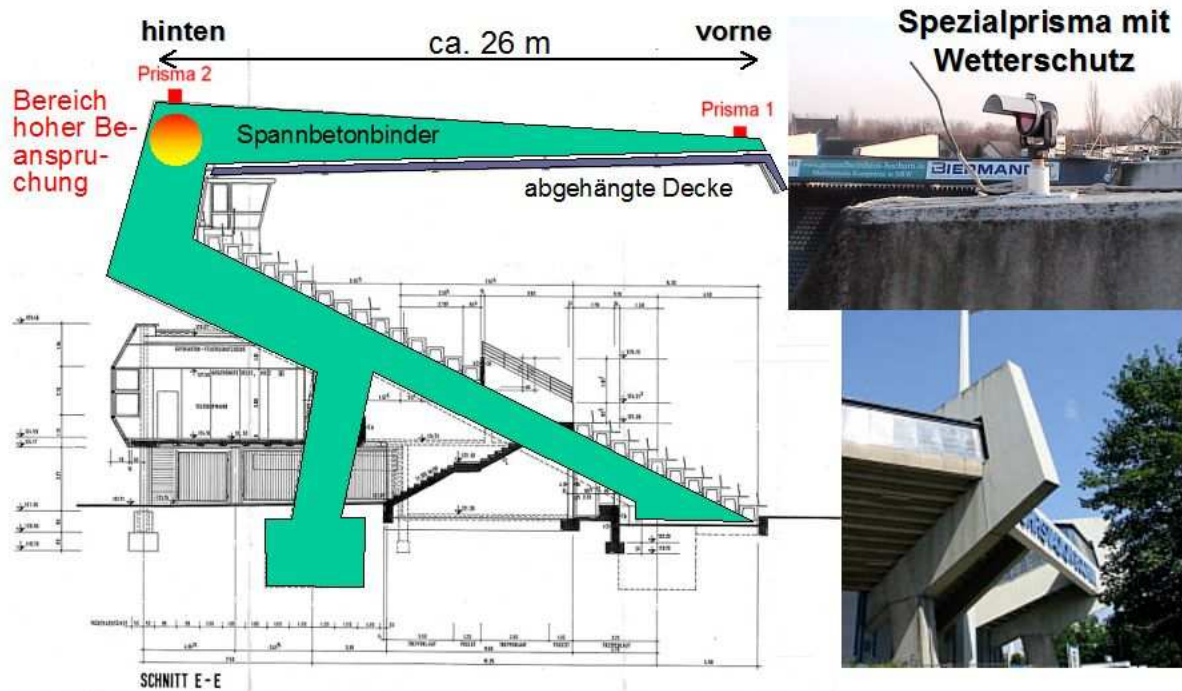


Abb. 2: Konstruktion eines Spannbetonbinders; rechts: Foto eines Binders mit Prisma

Auf jedem Binder wurde jeweils vorne und hinten ein Spezialprisma mit Wetterschutz angebracht. Auf dem Dach des Stadioncenters, von dem aus sämtliche 78 Prismen gut sichtbar sind, wurde ein Tachymeter vom Typ LEICA TCA 2003 mit automatischer Zielerfassung (ATR, Winkelmessgenauigkeit: ca. 0.2 mGon, Streckenmessgenauigkeit ca. 1 mm + 1 ppm) installiert. Die Steuerung des Tachymeters, die Datenerfassung und die Berechnungen erfolgen über einen PC, der in einem Raum im Stadion untergebracht ist. Zusätzlich wurden zum Nachweis der Standsicherheit des Tachymeters und zur Erfassung der Refraktionseinflüsse zwei Referenzpunkte auf dem Dach eines nahe gelegenen Hotels im Westen und der Justizvollzugsanstalt (JVA) im Süden eingerichtet. Die minimale und maximale Entfernung vom Tachymeter, der auf dem etwas höher gelegenen Dach des Stadioncenters eingerichtet wurde, zu den Messpunkten betragen ca. 21 m bzw. 225 m. Um die Auswirkung von äußeren Einflüssen wie Temperatur, Luftdruck, Wind, Regen und Schnee zu analysieren, werden zusätzlich die Daten einer wartungsfreien Wetterstation vom Typ Vaisala WXT510 erfasst. Abb. 3 und 4 zeigen die Installationsorte des Tachymeters, der Wetterstation und der

Prismen sowie die Entfernungen vom Tachymeter zu den einzelnen Messpunkten. Neben der Höhenkomponente werden zusätzlich für spätere Analysen auch die Lagekomponenten erfasst, wobei die Achsen des Koordinatensystems parallel zu den Hauptachsen des Stadions orientiert wurden.



Abb. 3: Installationsorte und Entfernungen des 3D-Messsystems



Abb. 4: Installationsorte des Tachymeters und der Wetterstation

Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen an die Höhenkomponente ist eine Messung in beiden Fernrohrlagen und die Berücksichtigung der Refraktionsinflüsse unerlässlich. Da die eigentliche kritische Größe die Höhendifferenz zwischen dem Binder vorne und dem Binder hinten darstellt, ist das Messprogramm speziell auf die Erfassung dieser Größe abgestimmt. Die Beobachtung dieser Höhendifferenz bietet den Vorteil, dass der Refraktionseinfluss in dieser Differenz zu vernachlässigen ist. Das Messprogramm, das vom PC automatisch gesteuert wird, sieht daher wie folgt aus:

- Messung Binder Nr. i vorne, Fernrohrlage 1
- Messung Binder Nr. i vorne, Fernrohrlage 2
- Messung Binder Nr. i hinten, Fernrohrlage 2
- Messung Binder Nr. i hinten, Fernrohrlage 1
- Messung Binder Nr. i +1 vorne, Fernrohrlage 1
- usw.

Ist ein Punkt nicht messbar, wird sofort der nächste Punkt zuerst in der aktuellen Fernrohrlage gemessen, um unnötige Drehungen des Tachymeters zu vermeiden. Diese Messreihenfolge resultiert vor allem daraus, dass der Höhenindex des Tachymeters temperatur- und entfernungsabhängig ist und sich zeitlich ständig ändert. Die Berechnung der 3D-Koordinaten eines Punktes erfolgt nur, wenn dieser Punkt vollständig in beiden Fernrohrlagen gemessen wurde. Eine komplette Messung aller 78 Punkte dauert ca. 35 min, so dass bei optimalen Verhältnissen ca. 40 Koordinatentripel pro Tag pro Punkt vorliegen. Von der Wetterstation, die im Gegensatz zum Tachymeter völlig wartungsfrei arbeitet, werden im 1s-Takt folgende Daten, die direkt zur Korrektur der Tachymetermessungen verwendet werden, erfasst:

- Luftdruck
- Temperatur
- relative Feuchte
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Niederschlag (Menge, Dauer)

3 Mess- und Auswerteprogramme

Zur Steuerung des komplexen Messablaufs und der Datenerfassung, einer übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse in Echtzeit sowie zur Alarmierung wurden spezielle Programme entwickelt. Das Tachymetersteuerungsprogramm führt die Messungen und die Berechnungen unter Berücksichtigung der meteorologischen Daten der Wetterstation aus. Neben den berechneten 3D-Koordinaten werden auch sämtliche Originalmessdaten des Tachymeters und der Wetterstation abgespeichert.

Auf diese Daten greifen zwei weitere Programme zu. Ein Plotprogramm, das die aktuelle Höhe und den Höhenverlauf der letzten 12 Tage für jeden Messpunkt zusammen mit der Temperatur, der Regenmenge und der Windstärke anzeigt (Abb. 5). Über ein Auswahlménü lassen sich für jeden einzelnen Punkt diese Daten abrufen und in der Grafik anzeigen.

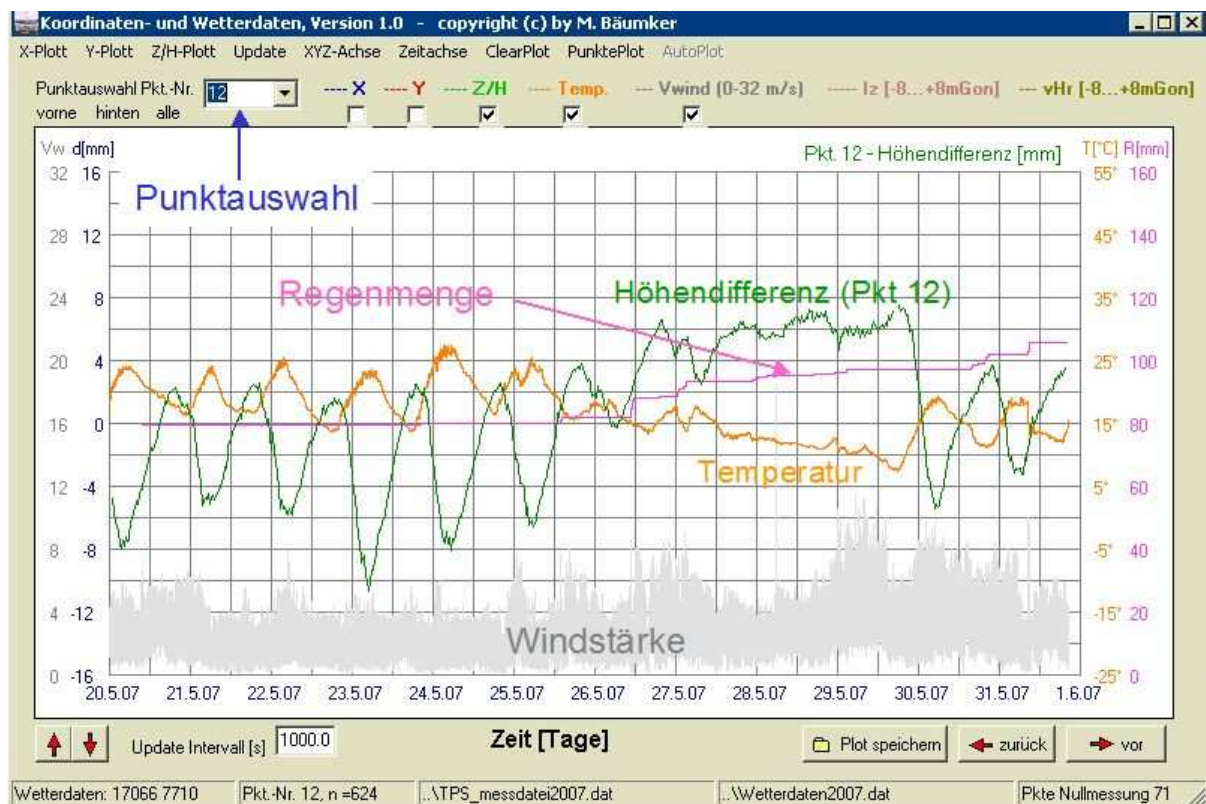


Abb. 5: Plotprogramm zur Darstellung des Höhenverlaufs eines jeden Messpunktes

Das Programm bietet weiterhin die Möglichkeit, von jedem Messpunkt die beiden Lagekoordinaten, den Höhenindex oder die Horizontalrichtungsdifferenz

zwischen den beiden Lagenmessungen als Funktion der Zeit grafisch darzustellen.

Ein weiteres Programm dient zur grafischen Darstellung der aktuellen Situation von allen Messpunkten in Form von farbigen Balkendiagrammen und zur Auslösung der Alarme per SMS. Abb. 6 zeigt einen Screenshot von diesem Programm. Die Balkendiagramme in der oberen Grafik zeigen die aktuellen Höhendifferenzen aller Punkte zur Nullmessung und die untere Grafik die Höhendifferenzen zwischen dem hinteren und vorderen Binderpunkt zur Nullmessung. Erreichen die Differenzen 75% des festgelegten Grenzwertes wechselt die Farbe von grün auf gelb. Bei Überschreitung des Grenzwertes erscheint der Balken dann in rot. Ein schraffierter Balken deutet an, dass der Punkt für mehr als zwei Stunden nicht mehr gemessen werden konnte. Durch Anklicken des Balkens lassen sich weitere Informationen über die Messrate, die Differenzen und den Zeitpunkt der letzten Messung abrufen.

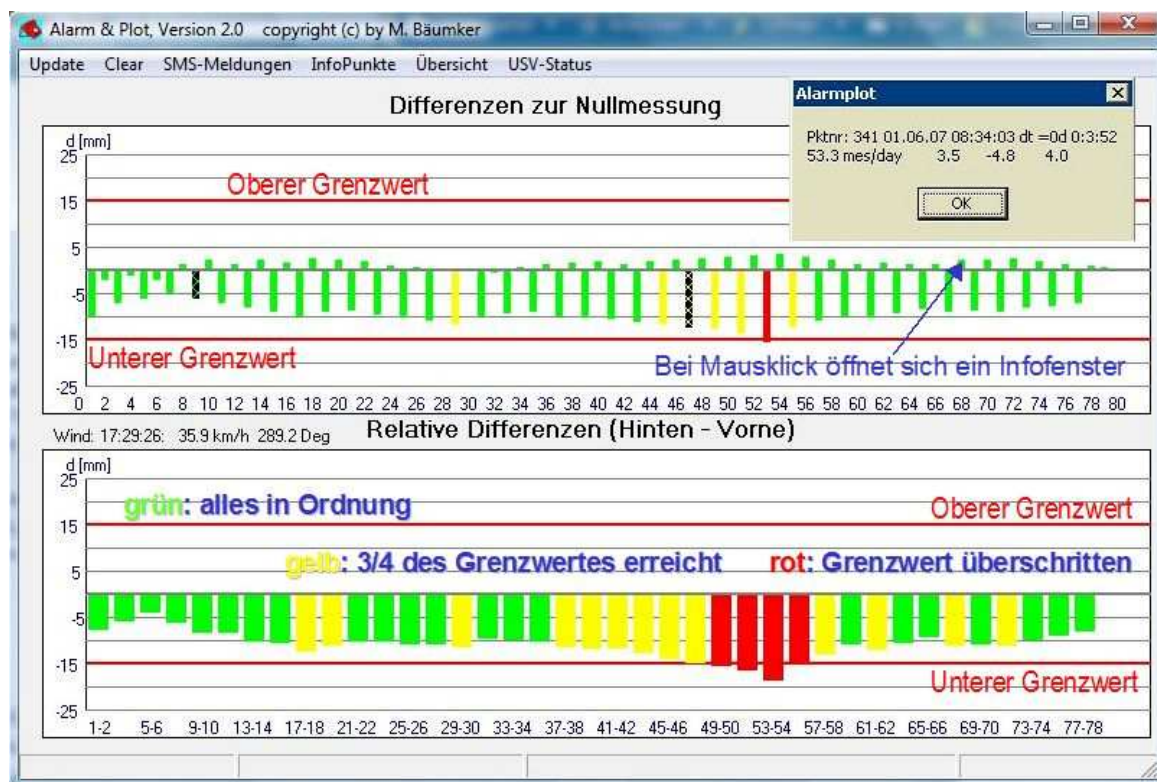


Abb. 6: Balkendiagramme für die Höhenänderung eines einzelnen Punktes (oben) und für die kritische Höhenänderung zwischen hinterem und vorderem Binderpunkt

4 Zeitreihenanalyse der Messdaten

Bei einem störungsfreien Betrieb des Messsystems wird jeder Messpunkt ca. 40 mal pro Tag bei einem Zeitintervall von ca. 36 min gemessen. Zusammen mit den im 5s-Takt registrierten Daten der Wetterstation ermöglichen diese Daten eine detaillierte Analyse der Auswirkung der äußeren Einflüsse wie Temperatur, Regen (Luftfeuchtigkeit), Wind usw. auf die Verformung der Binder.

Hierzu wurden die Messdaten aller Punkte für einen ausgewählten Zeitabschnitt einer Zeitreihenanalyse unterzogen. Als Zeitabschnitt wurden die Daten eines ganzen Monats (1. Juli – 5. August 2007), der durch große Temperaturänderungen und heftige Niederschläge gekennzeichnet war, ausgewählt. Damit die Analysen nicht durch die Refraktionseinflüsse beeinträchtigt werden, wurde zunächst aus den Daten der beiden Referenzpunkte ein zeitabhängiges Refraktionsmodell berechnet.

4.1 Einfluss der Refraktion auf die Höhenmessung

Bei bekannter Höhendifferenz ΔH zum Referenzpunkt lässt sich der Refraktionskoeffizient k nach

$$k = 1 - (\Delta H - S_h \cdot \cot z) \cdot \frac{2 \cdot R}{S_h^2} \quad (1)$$

mit S_h : Horizontalstrecke, z : Zenitdistanz, R : Erdradius

berechnen. Abb. 7 zeigt für den ausgewählten Zeitabschnitt den berechneten zeitlichen Verlauf des Refraktionskoeffizienten, der im Bereich von $-1,5$ bis $+1,5$ streut. Ein Vergleich mit den meteorologischen Daten zeigt zwar einen Zusammenhang mit Luftdruck und Temperatur, aber die Streuung ist zu groß, um diese Daten zur Korrektur zu verwenden. Um die Streuung zu reduzieren wurden daher die berechneten Refraktionskoeffizienten einer digitalen Filterung unterzogen. Eine einfache und effektive Methode ist die Anwendung eines rekursiven Filters nach

$$Y_k = a \cdot X_k + b \cdot Y_{k-1} = Y_k + c \cdot (X_k - Y_{k-1}) \quad (2)$$

mit

$$c = 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}$$

$$a = c$$

$$b = 1 - c,$$

$$\Delta t = t_k - t_{k-1}$$

Hierin bedeuten:

X_k : ungefilterter Wert zum Zeitpunkt t_k

Y_k : gefilterter Wert zum Zeitpunkt t_k

Y_{k-1} : ungefilterter Wert zum Zeitpunkt t_{k-1}

τ : Zeitkonstante des Filters

a, b, c : Filterkoeffizienten

Die Ergebnisse dieser digitalen Filterung sind in Abb. 8 dargestellt.

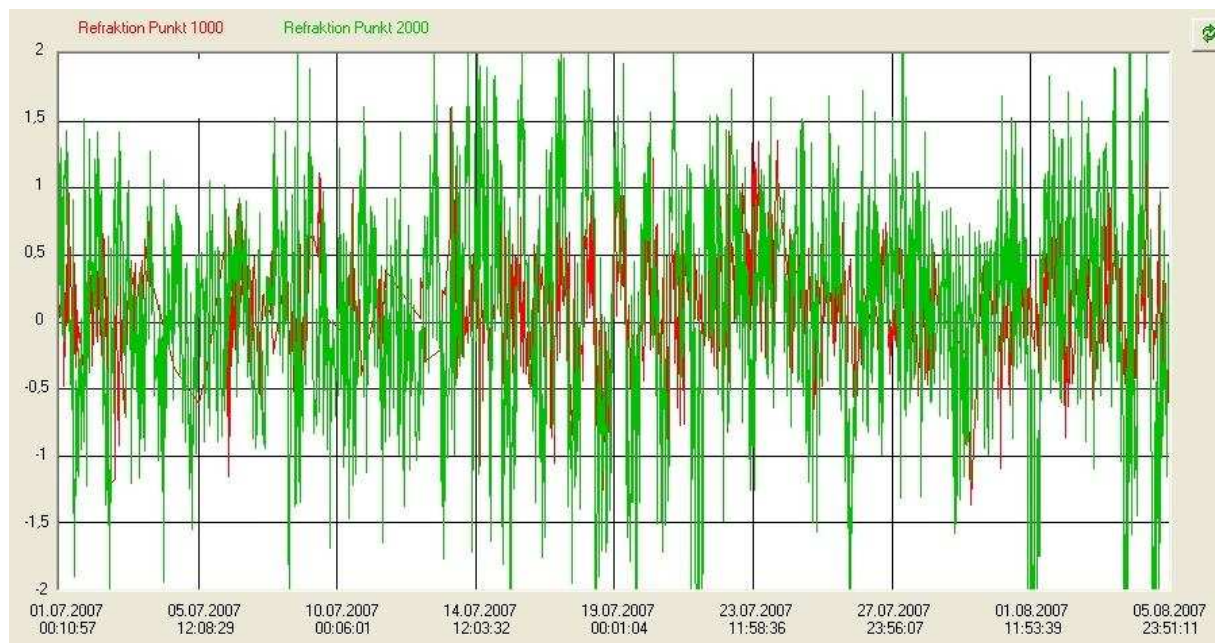


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf des berechneten Refraktionskoeffizienten

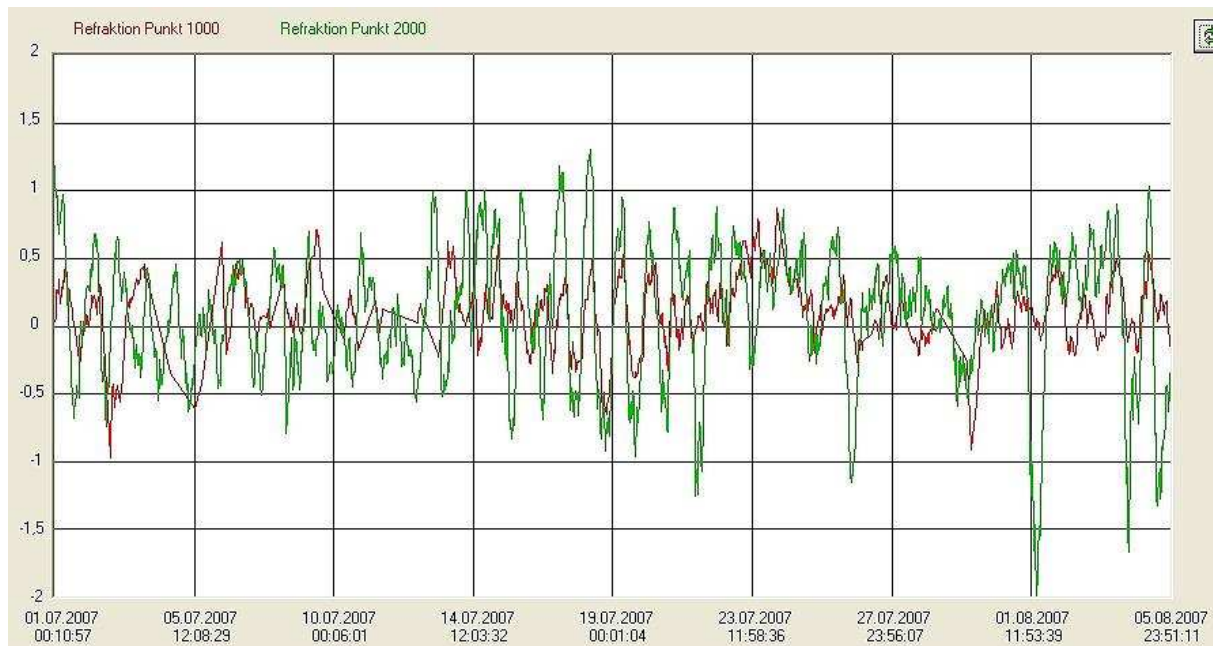


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des berechneten Refraktionskoeffizienten nach der digitalen Filterung

Nach der Filterung ist der Zusammenhang mit den meteorologischen Daten bereits deutlich erkennbar. In Abb. 9 sind für einen Abschnitt von einer Woche die gefilterten Refraktionskoeffizienten (obere Grafik), die aus den Messungen zu den beiden Referenzpunkten berechnet wurden, den meteorologischen Daten (Temperatur, Luftdruck, relative Feuchte) gegenübergestellt (untere Grafik).

Ein erster visueller Vergleich zeigt, dass der Luftdruck offensichtlich nur einen geringen Einfluss auf die Refraktion hat, während die Temperatur und die relative Feuchte einen signifikanten Zusammenhang erkennen lassen. Um diese Beobachtung auch mathematisch zu belegen, wurden die Korrelationskoeffizienten zwischen der Refraktion und den meteorologischen Daten berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt. Den Haupteinfluss auf die Refraktion übt die relative Feuchte aus. Mit zunehmender Luftfeuchtigkeit nimmt auch der Refraktionskoeffizient k zu. Eine Erhöhung von Luftdruck bzw. der Temperatur führt hingegen zu einer Abnahme des Refraktionskoeffizienten, was sich auch an dem negativen Korrelationskoeffizienten erkennen lässt.

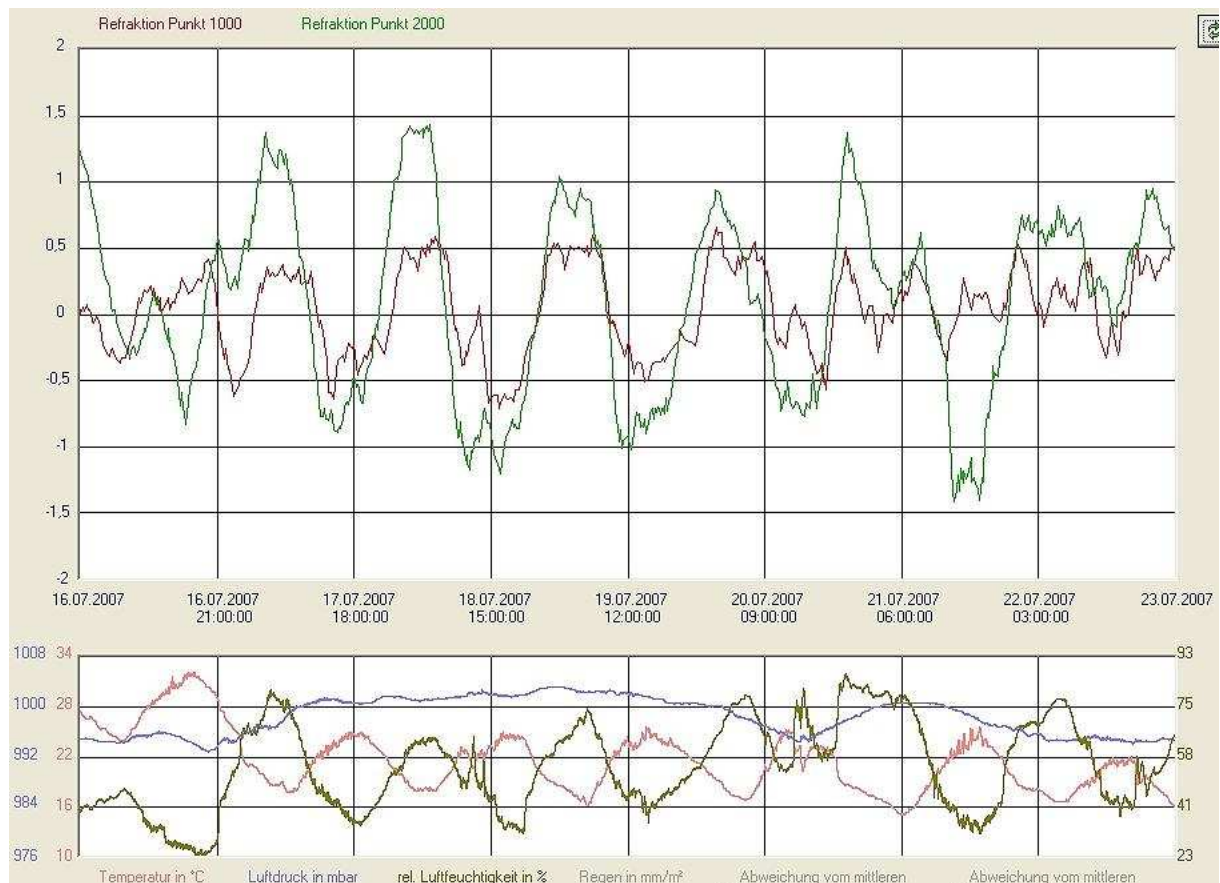


Abb. 9: Vergleich des berechneten Refraktionsverlauf mit den meteorologischen Daten (Temperatur, Luftdruck, rel. Feuchte)

	Korrelation der Refraktion Referenzpunkt 1000	Korrelation der Refraktion Referenzpunkt 2000
Luftdruck	-0,17	-0,16
Temperatur	-0,18	-0,22
rel. Feuchte	0,24	0,27

Tabelle 1: Korrelation zwischen der Refraktion und der Meteorologie

4.2 Berechnung eines Verformungsmodells für die Binder

Die Berechnung der Refraktion ist notwendig um die tachymetrisch berechneten Höhen zu korrigieren. Die zeitlichen Höhenänderungen der vorderen und hinteren Binderpunkte wurden anschließend einer Korrelations- und Frequenzanalyse unterzogen. Zweck der Analyse ist die Entwicklung eines Verformungsmodells

für die sicherheitsrelevanten Höhen der vorderen Binderpunkte in Abhängigkeit von den äußeren Einflüssen wie Luftdruck, Temperatur und relative Feuchte. Dieses Modell lässt sich dann für eine Prädiktion der Verformung der Binderpunkte verwenden. Vergleicht man anschließend die prädizierten Werte mit den tatsächlich gemessenen Werten lässt sich auf diese Weise bereits frühzeitig ein abnormes Verhalten der Verformung erkennen, was auf eine Schädigung der nicht sichtbaren und zugänglichen Spannbetonglieder hindeuten kann.

Abb. 10 zeigt exemplarisch für den Binder Nr. 1 den zeitlichen Verlauf der beobachteten Höhenänderungen des hinteren (Pkt. 11) und des vorderen Binderpunktes (Pkt. 12). In der Grafik sind weiterhin die Temperatur, die Windstärke und die Regenmenge dargestellt. Der Juli 2007 war sowohl durch große Temperaturunterschiede als auch durch z.T. heftige Niederschläge gekennzeichnet.

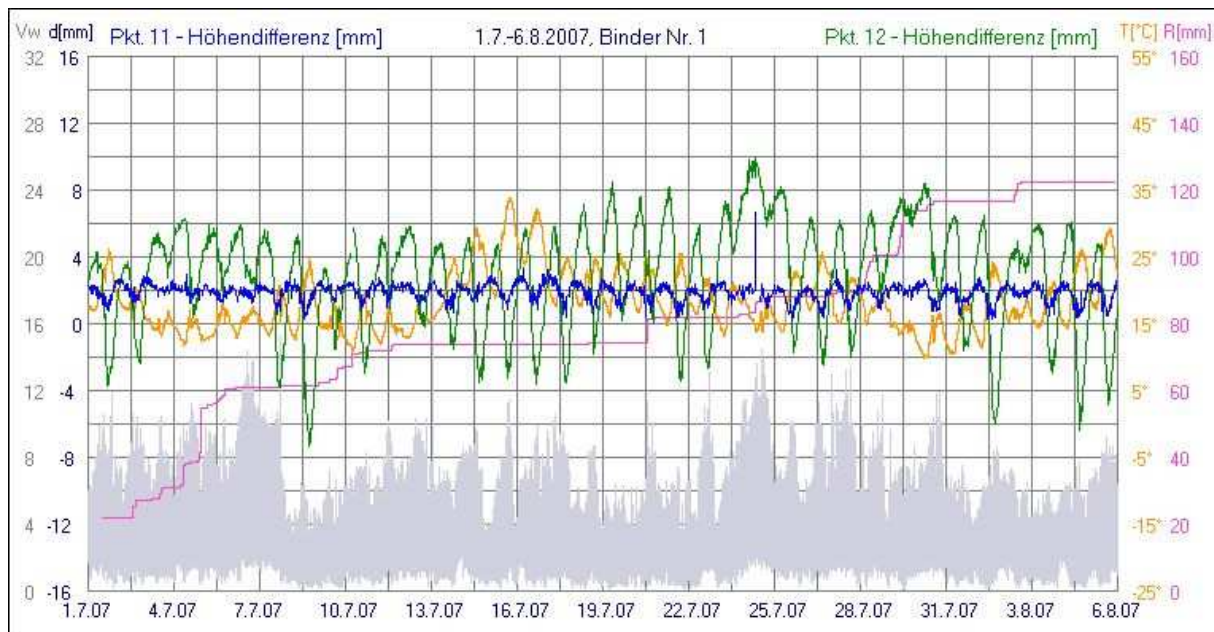


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf der Höhenänderungen der beiden Messpunkte auf Binder Nr. 1, der Temperatur, der Regenmenge und der Windstärke für Juli 2007

An Hand der Grafik ist zu erkennen, dass der vordere Binderpunkt eine deutliche Höhenänderungen von ca. +/- 15 mm aufweist. Diese Höhenänderungen sind deutlich mit der Temperatur korreliert. Der hintere Binderpunkt zeigt nur geringe Höhenänderungen von ca. +/- 1 mm, die ebenfalls mit der Temperatur korreliert sind. Bei Erwärmung des Binders tritt an der Vorderseite der Binder eine negative Höhenänderung auf während die Hinterseite sich geringfügig hebt.

Die Windstärke übt offensichtlich entgegen den Vermutungen der Statiker keinen signifikanten Einfluss auf die Dachkonstruktion aus.

Um diese Zusammenhänge auch mathematisch nachzuweisen, wurden die beobachteten Höhenänderungen einer Korrelationsanalyse mit den meteorologischen Daten unterzogen. Dabei wurde zusätzlich aus den vorliegenden meteorologischen Daten die Feuchttemperatur berechnet und anschließend die Korrelationen zwischen der Höhenänderung der vorderen Binderpunkte und den meteorologischen Daten berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Punkt	Temperatur	Luftdruck	rel. Feuchte	Feuchttemperatur
12	-0,61	-0,23	0,69	-0,57
22	-0,64	-0,26	0,74	-0,58
142	-0,62	-0,33	0,74	-0,56
232	-0,68	-0,25	0,75	-0,62
242	-0,71	-0,27	0,77	-0,65
252	-0,71	-0,27	0,78	-0,66
262	-0,68	-0,26	0,76	-0,63
272	-0,70	-0,27	0,76	-0,64
282	-0,70	-0,26	0,77	-0,65
292	-0,68	-0,26	0,77	-0,63
302	-0,62	-0,29	0,73	-0,56
322	-0,73	-0,27	0,79	-0,68
332	-0,73	-0,26	0,78	-0,68
342	-0,74	-0,28	0,79	-0,69
352	-0,69	-0,30	0,74	-0,65
362	-0,72	-0,30	0,80	-0,67
372	-0,69	-0,29	0,76	-0,64
382	-0,59	-0,28	0,70	-0,54
Mittel	-0,68	-0,27	0,76	-0,63

Tabelle 2: Korrelationen zwischen den Höhenänderungen der vorderen Binderpunkte und der Meteorologie

Die berechneten Korrelationen zeigen, dass der Haupteinfluss die Temperatur und der Luftdruck sind. Die Korrelation mit der Feuchttemperatur, die sich aus

der Trockentemperatur, dem Luftdruck und der relativen Feuchte berechnen lässt, zeigt ebenfalls eine sehr hohe Korrelation mit den Höhenänderungen.

Neben der Berechnung dieser Korrelationen wurden die Höhenänderungen und die meteorologischen Daten einer Frequenzanalyse mittels der Fast-Fourier-Transformation (FFT) unterzogen. Für die Untersuchungen mussten aus den Zeitreihen zunächst zeitlich gleichabständige Daten für ein festes Zeitintervall von 30 min interpoliert werden. Die FFT-Berechnung eignet sich besonders um periodische Zusammenhänge zu erfassen und zu analysieren. Wichtig für diese Berechnungen sind einerseits gleichabständige und kontinuierlich über einen ausreichend langen Zeitabschnitt vorliegende Daten.

Aus den über einen Zeitraum von mehr als einem Monat benutzten Daten und des Abtastzeitintervalls von 30 min (0,5 h) lassen sich hier Frequenzen von einer Grundfrequenz von $1/(36 \cdot 24\text{h}) = 0,00116/\text{h} = 0,000000322 \text{ Hz}$ bis zu der Nyquistfrequenz von $1/\text{h} = 0,000278 \text{ Hz}$ analysieren. Das Ergebnis einer FFT-Berechnung ist einerseits die Amplitude der Frequenz sowie deren Phasenlage. Die Amplitude ist der Indikator, wie stark ein Signal der entsprechenden Frequenz in dem vorliegenden Signal enthalten ist.

Aus den FFT-Berechnungen der Höhenänderungen kristallisierten sich in den Amplituden der Höhenänderungen zwei Hauptfrequenzen heraus: Ein erster Peak lag bei $f = 0,0417 \text{ 1/h} = 1/(24\text{h})$ mit einer Amplitude von ca. 4 mm. Dieses entspricht exakt dem Tagesgang. Neben diesem Hauptpeak zeigte sich ein zweiter Peak bei einer Frequenz von $0,0834/\text{h} = 1/(12 \text{ h})$ mit einer Amplitude von 0,6 mm – also einem Halbtagesgang. Diese Peaks zeigten sich bei denselben Frequenzen auch in den meteorologischen Daten. Aus dem Vergleich der beiden Amplituden lässt sich nun eine Höhenänderungen von ca. 4 mm bei einer Temperaturänderung von ca. 3°C ableiten. Aus den Differenzen der Phasenlagen für die Höhenänderungen und für die meteorologischen Daten lassen sich weiterhin die Reaktionszeiten des Bauwerks auf eine Temperaturänderung ableiten. Diese Reaktionszeit beträgt hier ca. 30 min.

Aus den Ergebnissen dieser Analysen wurde nun folgendes Modell für die Vorhersage der Höhenänderungen entwickelt.

$$H_{t,T} = H_0 - (T_{t-\Delta t} - T_0) \cdot d_1 + (\bar{T}_{24h} - T_0) \cdot d_2 \quad (3)$$

$$\Delta t = 41 \text{ min}$$

mit $d_1 = 1.8 \text{ mm}$
 $d_2 = 1.0 \text{ mm}$

$H_{t,T}$: propagierte Höhe H_0 : Höhe aus der Nullmessung

$T_{t-\Delta t}$: Feuchttemperatur zum Zeitpunkt $t - \Delta t$

\bar{T}_{24h} : 24h-Mittelwert der Feuchttemperatur

T_0 : Feuchttemperatur der Nullmessung

Dieses Modell wurde anschließend auf sämtliche Binderpunkte angewendet. In Abb. 11 ist exemplarisch der Vergleich der mit dem Modell prädizierten Höhenänderungen und den tatsächlich gemessenen Höhenänderungen für den Binderpunkt 252 dargestellt. Aus den Abweichungen der beobachteten Höhen zu den Modellhöhen lässt sich eine Standardabweichung für das Modell von 3 mm bis 4 mm abschätzen.

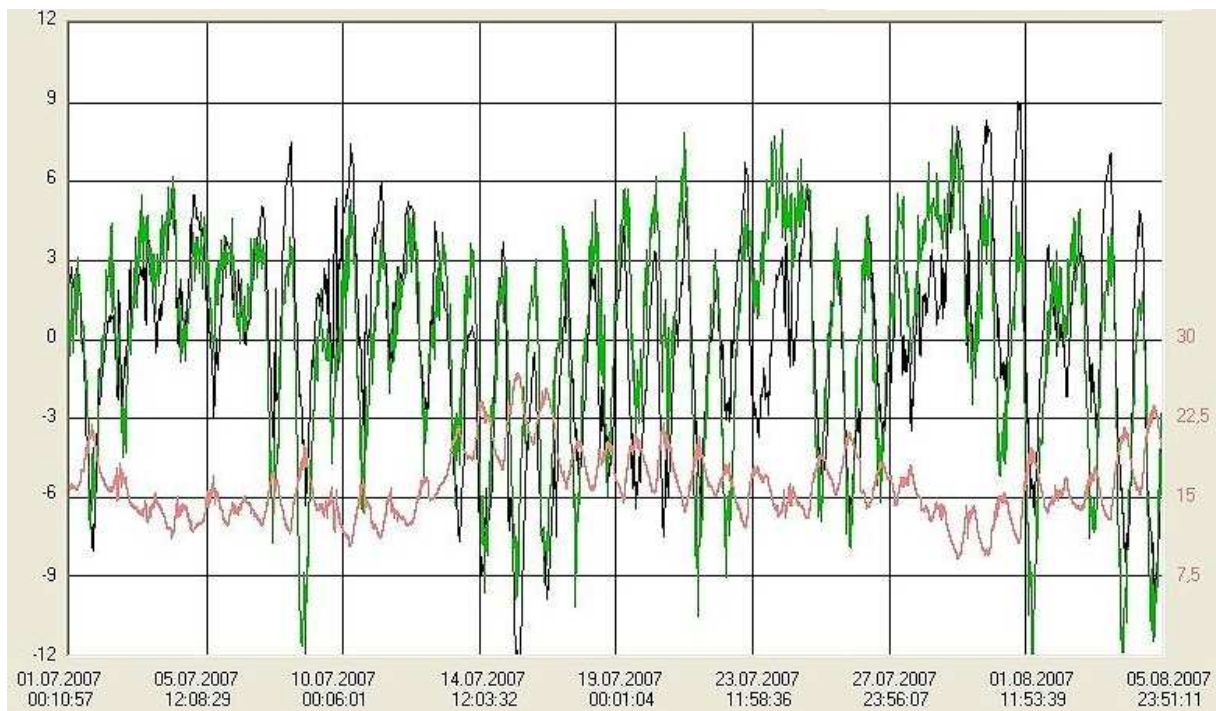


Abb. 11: Prädizierte Höhenänderungen (schwarz), gemessene Höhenänderungen (grün) sowie Verlauf der Feuchttemperatur (rot)

Mit Hilfe dieses Modells ist es nun möglich Höhenänderungen, die auf Bauwerksschäden hindeuten, bereits ab einer Größe von 10 mm zu detektieren und entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten. So zeigten sich im Januar 2009 bei allen vorderen Binderpunkten signifikante Abweichungen zu den Modellhöhen, was eine automatische Alarmierung per SMS durch das Messsystem zur Folge hatte. Abb. 12 zeigt einen Screenshot von dem Alarmierungsprogramm, in dem die negativen Höhenänderungen von allen vorderen Binderpunkten in der Größenordnung von -15 mm bis -20 mm zu erkennen sind. Die Ursache für diese Änderungen war auf die Schneelast auf dem Dach des Stadions nach den ergiebigen Schneefällen zurückzuführen. Die Höhenänderungen waren allerdings aufgrund der Schneelast noch unkritisch und wurden weiter aufmerksam beobachtet. Auf jeden Fall hätte aufgrund der permanenten Höhenmessungen frühzeitig genug auf die Dachlast reagiert werden können, um so einen Einsturz - wie am 2. Januar 2006 die Eissporthalle in Bad Reichenhall - zu vermeiden.

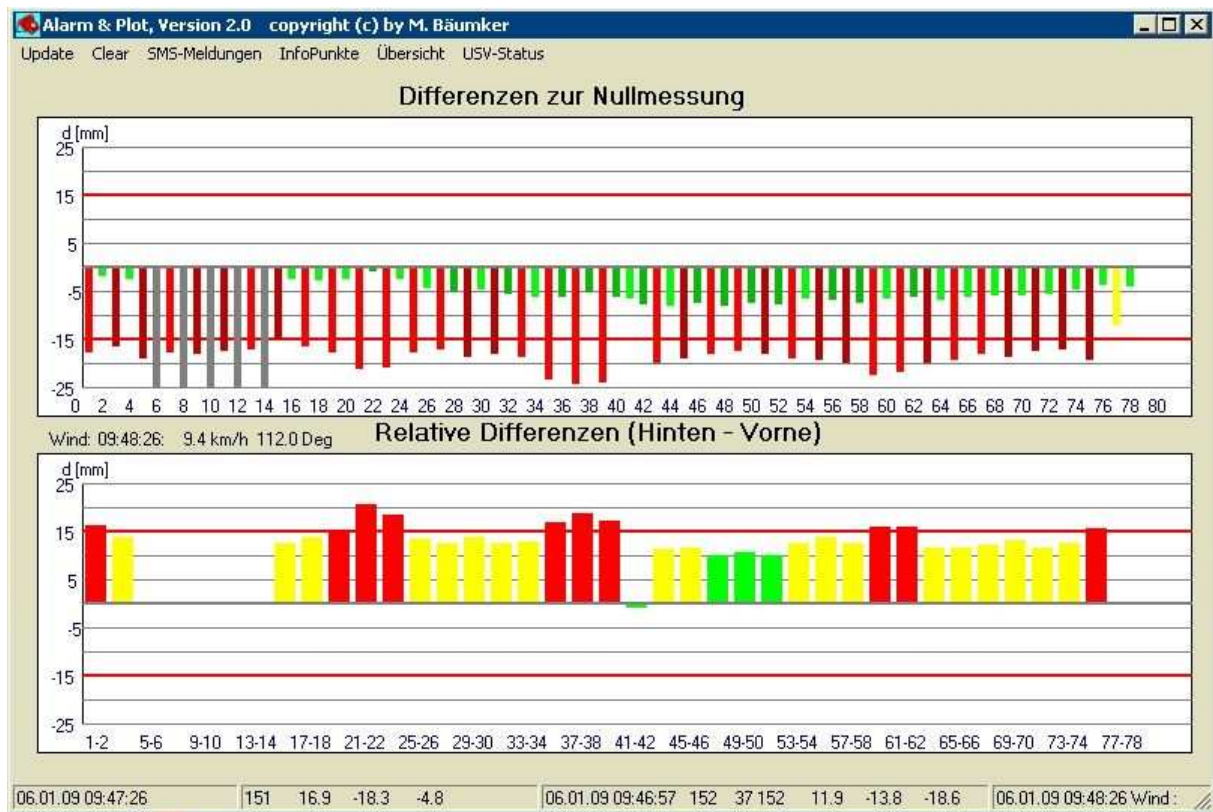


Abb. 12: Alarmmeldungen des Messsystems am 6.1.2009 aufgrund der Höhenänderungen durch die Schneelast auf dem Dach *rewirpowerSTADION*

5 Zusammenfassung

Von Mitte 2006 bis Ende 2008 wurden die 38 Spannbetonbinder des ca. 30 Jahre alten *rewirpowerSTADION* der Stadt Bochum saniert. Im Zuge der Sanierung wurde dort ein tachymetrisches Messsystem zur permanenten Überwachung der Höhe der vorderen und hinteren Binder installiert. Das Messsystem, das zusätzlich die Daten einer Wetterstation erfasst, liefert seit Ende Januar 2007 mit einer Genauigkeit von 0,5 mm – 2 mm Informationen über den von der relativen Feuchte, der Temperatur und des Luftdrucks zeitabhängigen Verlauf der Höhenkomponente. Mit Hilfe des daraus entwickelten Modells lassen sich mögliche Schäden der Spannbetonbinder bereits ab einer Größe von 10 mm sicher detektieren. Die Ergebnisse und die Modellberechnungen sind weiterhin ein wertvolles Hilfsmittel die statischen Berechnungen hinsichtlich der Verformung der Binder zu überprüfen und zu verfeinern.

Literatur

- Bäumker, Manfred (2009): Permanente Überwachung des *rewirpowerSTADIONs* des VFL Bochum. In: Proceedings 15. Internationale geodätische Woche, Obergurgl, 8.-13.2. 2009, ISBN 978-3-87907-485-3.
- Brown, Robert Grover (1997): Introduction to random signals and Kalman filtering: with MATLAB exercises and solutions / Robert Grover Brown, Patrick Y.C. Hwang. 3rd ed., 1997, John Wiley & Sons, Inc.