



Transkript: Structural Health Monitoring

Takeaways:

- Structural Health Monitoring (SHM) ermöglicht eine dauerhafte Überwachung des Zustands von Bauwerken.
- Probabilistische Ansätze sind wichtig, um Unsicherheiten in den Messungen und Modellen zu berücksichtigen.
- SHM kann zu einer nachhaltigeren Bauindustrie beitragen, indem es gezielte Instandhaltungsmaßnahmen ermöglicht und Abfall reduziert. Structural Health Monitoring (SHM) ermöglicht die genaue Messung von Eigenschaften wie dem E-Modul, um den Bau und die Verstärkung von Bauwerken zu optimieren.
- SHM kann dazu beitragen, Probleme in Bauwerken frühzeitig zu erkennen und die Sicherheit zu gewährleisten.

Johannes (00:00.032)

Heute reden wir über Structural Health Monitoring. Dabei reden wir mit Yves Roland. Yves kommt aus Luxemburg. Er hat einen Doktorat gemacht und einen Postdoc an der EPFL zum Thema datengestützte Risikoanalyse erdbebenbeschädigter Gebäude.

Danach war er Senior Scientific Assistant an der ETH Zürich bei Professor Hatzi im Department Structural Mechanics and Monitoring. Und heute ist er CTO und Co -Founder von dem Startup Irmus, die auch Structural Health Monitoring anbieten für Bauwerke wie Brückengebäude, Infrastruktur und so weiter. Willkommen Yves!

Yves (00:50.458)

Vielen Dank für die Einladung. Ich freue mich darauf, mich mit dir über das Potenzial und auch die Perspektiven von der SHM zu unterhalten.

Johannes (01:00.525)

SHM steht jetzt in weiter Folge für Structural Health Monitoring. Es sind generell viele englische Begriffe dabei, die wir versuchen auf Deutsch zu übersetzen. Genau, das ein bisschen in Verbindung zu setzen zu den letzten Folgen, da haben wir geredet bei ConcreteLy einerseits mit einem Brückeninspektor und andererseits mit der Gebietsseinheit 6 in der Schweiz, die den Betrieb und Unterhalt der Nationalstraßen machen.

Yves (01:12.186)

So gut wie möglich.

Johannes (01:30.796)

möchte ich ein bisschen ausholen. Und zwar beim Betrieb und Unterhalt von Nationalstraßen, also jetzt speziell Straßeninfrastruktur. Da ist einerseits eben die Gebiets -Einheit, die macht für den Betrieb den Winterdienst, auch Reinigung, Grünpflege, auch ein bisschen technischen Dienst. Das heißt, sie schauen sich auch die Bauwerke ein bisschen an, ob irgendwo Abplatzungen sind von Beton und bemerken das.

Aber die größeren Inspektionen kommen dann eigentlich in regelmäßigen Abständen normalerweise in der Schweiz alle fünf Jahre von Ingenieuren, den Brückeninspektoren, das sind eigentlich Ingenieurbüros und die schauen sich die Bauwerke auch visuell an auf Armlänge. Dazu ist ein bisschen mehr Aufwand notwendig natürlich. Sie gehen auch zum Teil in die Bauwerke rein. Wir haben gesagt, auch in der letzten Folge, vorletzten Folge genau,

dass es da ein paar Grenzen gibt, was da möglich ist durch die visuelle Inspektion. Das ist zum Beispiel die Chlorid -induzierte Korrosion, die nicht sichtbar ist von außen, das heißt der Stahl kann drinnen korrodieren, ohne dass man am Beton an der Oberfläche etwas sieht. Dann gibt es natürlich auch schwer erreichbare Stellen, Brückenpfeiler, wo man mit Hebebühnen nicht so einfach hinkommt. Dann feuchte Stellen, da haben wir gesagt in der vorletzten Folge,

dass Wasser eigentlich der größte Feind des Bauwerks ist. Aber das sieht man natürlich auch nur, wenn es gerade geregnet hat oder generell feucht ist. Und dann zum Beispiel auch die Arbeitssicherheit bei diesen Inspektionen, die oft bei laufendem Verkehr vorkommen müssen und so weiter. Heute wollen wir da weit ins Detail gehen. Nach solchen Visuellinspektionen, wenn es notwendig ist, tut ein Brückeninspektor

labortechnische Untersuchungen beantragen. Da geht man mehr ins Detail und schaut sich das Bauwerk an. Da kommen auch sehr viele Sensoren zum Einsatz. Bevor wir jetzt genauer weiter eingehen in SHM, möchte ich vielleicht einen Überblick geben in diese labortechnischen Untersuchungen, speziell die, die mit Sensoren ablaufen.

Johannes (03:56.169)

Die teilt man in zerstörungsfreie, also non -destructive testing methods und zerstörerische Methoden. Könntest du uns da vielleicht einen kleinen Überblick geben, Yves?

Yves (04:08.058)

Ja, gerne. Also die Zerstörerichtüberprüfung, wie sozusagen mit Bohrkernen oder alle anderen Methoden, wo man einen Teil der Brücke oder des Tragwerks herausnimmt und ins Labor schickt und es dort genauer zu analysieren. Entweder mit chemischen oder Röntgenstrahlen oder anderen Methoden, einen wirklichen Einblick in das Material zu bekommen. Die zerstörungsfreie Prüfung ist eigentlich dazu da,

direkt auf der Brücke einen besseren Einblick zu bekommen, wie der Zustand des Materials ist. Es gibt viele verschiedene Technologien, zum Beispiel Georadar, Potentialfeldmessung, Ultraschall, nur ein paar davon zu nennen. Das Ziel ist es zu verstehen, ob Prozesse das Material verschlechtern oder nicht. Du hast das Beispiel Korrosion genannt, das ist ein typisches Beispiel, wo man entweder in das

Material hinein sieht, zu verstehen, ob es Wasserinfiltration gibt oder nicht. Man kann aber auch mit anderen Technologien direkt verstehen, ob es Korrosionsprobleme gibt oder nicht. Grundsätzlich ist es bei der zerstörungsfreien Prüfung so, dass es einen ganz genauen Einblick in einen ganz bestimmten Zeitpunkt gibt. Das heißt, genau an der Stelle, wo wir die zerstörungsfreie Prüfung anwenden,

wissen wir ganz genau, wie der Zustand der Brücke ist. Das heißt entweder man muss das über die ganze Brücke wiederholen oder periodisch wiederholen, zu verstehen, wie sich das mit der Zeit und mit der Lokalisation verändert. Wie gesagt, das Ziel ist es zu verstehen, ob sich das Material, zum Beispiel die Bewehrung der Zustand, verschlechtert. Und vielleicht eine Analogie.

Mit der Humanmedizin zu wählen, also die zerstörungsfreie Prüfung, ist sozusagen wie ein Röntgenbild oder ein MRT. Das heißt, man hat auf diesem Punkt einen sehr genauen Einblick. Man sieht, ob irgendwas gebrochen oder irgendwie zerstört ist. Es ist sehr hochauflösend und sehr sinnvoll, wenn man genau weiß, wo man es anwenden sollte. Was es nicht gibt, und da kommen wir vielleicht später beim SRTM dazu, ist ein

Yves (06:30.138)

besseren Einblick, wie sich die Verschlechterung des Materials auf das globale Verhalten des Tragfächers auswirkt. Also es ist wirklich eher der Zustand des Materials.

Johannes (06:41.909)

Und so wie ich das verstanden habe, wird das dann meistens gemacht, wenn man eigentlich schon weiß, welches Bauteil man in Stand setzen möchte und dann herauszufinden, was genau gemacht werden soll. Das entscheidet dann zusammen wahrscheinlich der Ingenieur und das Prüflabor, welche Tests und wo die gemacht werden sollen. Weißt du was du fängst?

Yves (07:06.426)

Ja, ich glaube da gibt es verschiedene Anwendungsbeispiele. Zum Beispiel, wenn man weiß, dass eine Brücke instandgesetzt wird, kann man zum Beispiel das Gyora darwilen und die gesamte Fahrbahndecke einmal abfahren, zu wissen, wo genau es Probleme mit der Dauerhaftigkeit gibt, dann sozusagen das Projekt zu optimieren und zu verstehen, ob die Fahrbahndecke auch instandgesetzt werden muss oder nicht.

Wenn es ein bestimmtes Bauteil ist oder ein Element der Brücke, dann ist es eher der Ingenieur, der im Zweifel, weil man vielleicht Risse sieht und es ist nicht klar, kommt das jetzt von Korrosion, von AAR oder wie auch immer, kann man diese zerstörungsfreie Prüfung als zusätzliche Informationsquelle wählen, genau zu wissen, was in dem Material vor sich geht.

Eines der großen Dilemmas der Bauingenieurin ist, dass wir nicht in die Brücke hinein sind können. Die Zerstörungsprüfung gibt ein bisschen Einblick, dieses Dilemma zu überbrücken.

Johannes (08:17.813)

Mhm.

Johannes (08:21.315)

Und was glaube ich da auch sehr beliebt ist, ist die Potentialfeldmessung. Da hast du ja auch einen Einblick in eine größere Fläche vom Bauwerk. Aber sonst ist natürlich da eine große Bandbreite an Messmethoden, was man machen kann. Was natürlich jetzt wahrscheinlich auch nicht immer einfach ist zu entscheiden, wie du auch gesagt hast, wo wird geprüft und mit welcher Methode.

und dann natürlich auch die Ergebnisse auszuwerten, wenn man unterschiedliche Ergebnisse hat, weil ja betont es ja heterogen ist.

Yves (08:56.332)

Genau, vielleicht könnte ich da auf das NTEC Projekt hinweisen, was genau darauf abzielt. Das NTEC Projekt ist von der Astra in die Wege geleitet worden und es gibt einen Überblick über alle derzeit zur Verfügung stehenden Methoden der zerstörungsfreien Prüfung und auch von SHM, ein bisschen zu verstehen, bei welcher Gefährdung oder bei welcher Fragestellung, welche Technologie sinnvoll ist und auch...

ökonomisch sind macht, also ob falsche, welchem Risiko für die Brücke, welcher Größe der Brücke und bei welcher Gefährdung.

Johannes (09:33.149)

Okay, das wird jetzt publiziert oder? Ich werde schauen, dass ich das in den Podcast beschrieb oder auf meiner Homepage verlinke.

Yves (09:38.49)

Es sollte Ende des Monats publiziert werden.

Johannes (09:42.433)

Ich bin schon sehr gespannt darauf. Weil generell diese Technologien, auch Structural Health Monitoring gibt es ja schon recht lange. Die meisten Messmethoden sind nichts Neues. Wo es jetzt ein bisschen fehlt, ist an der Umsetzung eines Satz Pilotprojekte, aber auch wie man das dann in die Breite bekommt. Deswegen finde ich solche Forschungsprojekte, wo man diese verschiedenen Technologien analysiert, sehr sinnvoll.

Was ist da, kannst du schon sagen, was die allgemeine Erkenntnis ist? Oder habt ihr da wirklich erstellen können eine Liste je nach Bauteil und Schadensart, was die beste Technologie ist? Oder was erwartet man sich in dem Report?

Yves (10:24.282)

Genau, es ist genau dies. Also die Pro -Typ von Bauelementen, also sagen wir jetzt mal ein Beispiel an einer Brücke wäre das zum Beispiel die Fahrbanddecke, vielleicht Schrägseile oder das Auflagersystem. Pro -Bauteil und Gefährdung, weil es gibt halt nicht immer die gleichen Sensoren, die alle Typen von Gefährdungen abbilden, speziell bei der...

zerstörungsfreien Prüfung. Das heißt, ist die Fragestellung oder die Gefährdung jetzt eher Korrosion, eher Rissbildung, eher Materialermüdung und so weiter. Das heißt, basierend auf der Gefährdung und dem Bauteil gibt es eine Abschätzung der Kosten und des Nutzens jeder Messtechnologien. Und da kommt auch noch dazu wie

wie schwer die Konsequenzen werden, falls es zu einem Kollaps kommt eines bestimmten Bauteils. Das heißt, je größer die Konsequenzen, desto eher kann man eine teurere Methode wählen.

Johannes (11:31.327)

Und den Einfluss auf den Verkehr wird auch berücksichtigt, wenn jetzt etwas in Stand gesetzt werden muss.

Yves (11:39.642)

Ja, ich glaube bei der genauen Bewertung von NTEC nein, aber grundsätzlich sollte man das auch in, also es gibt sozusagen die Nebenkosten von Verkehrssperrung, Sicherheitsmaßnahmen und so weiter, die sollte man schon, also die wurden indirekt mit einbezogen, aber nicht genau schiffriert.

Johannes (11:59.39)

Okay, sehr interessant. Dann kommen wir jetzt zum SHM, Structural Health Monitoring. Kannst du uns erklären, was da die Grenze ist, ab wann sind die Methoden Structural Health Monitoring und was es genau ist?

Yves (12:16.442)

Ja, also SHM, ich würde es jetzt mal auf Deutsch übersetzen als eine Art Dauerüberwachung des Tragwerkszustands, unterscheidet sich grundsätzlich in zwei Punkten von der zerstörungsfreien Prüfung. Erstens ist die Überwachung permanent, also es ist nicht nur einmal oder periodisch, es ist wirklich zu jedem Zeitpunkt sind die Sensoren auf der Brücke und messen dauerhaft.

Und es gibt eine eher globale Einschätzung über den Zustand des Tragwerks. Also nicht lokal. In einem Punkt gibt es hier Probleme mit Korrosion, sondern grundsätzlich, wie verhält sich das Tragwerk? Verhält es sich gleich wie noch vor drei Wochen oder gibt es eine Änderung, die vielleicht darauf hinweist, dass es einen Schaden gibt? Also das Ziel ist, den Schaden frühzeitig zu erkennen, sodass Risiken von Einstürzen oder von anderen Problemen reduziert werden.

und dadurch auch das Erhaltungsmanagement optimiert werden kann.

Johannes (13:14.776)

Das heißt, es gibt ja auch viele Sensoren, die zwar dauerhaft messen, das sind die, die meistens dann in den Beton eingebettet werden, Beton - oder Korrosionseigenschaften zu messen, aber die zählen dann offiziell nicht zu Structural Half -Mode Drawing, weil sie sehr lokale Aufnahmen machen.

die man dann kombinieren muss, versus Technologien, die globale Einschätzungen machen, wie du gesagt hast. Könntest du uns einen Überblick geben, was für Technologien da eingesetzt werden?

Yves (13:50.926)

Bei SHM ist es schon so, dass wir grundsätzlich Sensoren wählen, die ein globales Verhalten abbilden. Das heißt, es werden z .B. phasenoptische Sensoren, die die Dehnungen über längere Strecken messen, Dehnmessstreifen, die die Dehnungen eher lokal messen, und Beschleunigungssensoren, die die Schwingungen der Brücke messen.

Johannes (13:52.603)

... bei SHM.

Johannes (14:19.235)

Kann man die irgendwie kategorisieren, wie man die einsetzt?

Yves (14:28.922)

Ja, es ist grundsätzlich nicht verkehrt, auch verschiedene Technologien miteinander zu verbinden. Das heißt, sagen wir mal, die Schwingungen, die wir messen, geben einen Aufschluss über das dynamische Verhalten. Also wenn der Verkehr über die Brücke rollt, wissen wir genau, wie stark das schwingt und mit welcher Frequenz, sozusagen ein Verständnis des Zustands der Brücke zu haben.

Schwingung ist eigentlich Accelerometer, Beschleuniger.

Yves (14:53.818)

Genau, ja. Also Schwingung ist sozusagen die Übersetzung von Vibrations. Also was wir genau messen mit diesen dynamischen Sensoren. Bei anderen Technologien wie die Phase -Optischen zum Beispiel kann es auch

sinnvoll sein, einen Lastversuch zu machen, also eine bekannte Last auf die Brücke zu stellen und zu sehen, wie sich die Brücke verhält.

Johannes (14:57.562)
Menschen.

Yves (15:24.09)

auch zu verstehen, wie gut unsere Rechenmodelle sind. Ich habe Erfahrungen mit sehr vielen Messungen an Brücken und grundsätzlich sind unsere Modelle sehr konservativ. Wenn wir eine Last von X haben, dann kommt das Resultat des Modells tendenziell zu groß bei den Verschiebungen und bei den Kräften, die auftauchen in der Brücke.

Das heißt, man kann diese Technologien vor allem, die Phase -Optischen und die Denmestreifen, auch dafür nutzen, zu verstehen, wie sich die Brücke verhält und wie das im Vergleich mit einem Rechenmodell ist, das zum Beispiel benutzt wird, eine Rückrechnung der Brücke zu machen, zu verstehen, was die Maximallaste ist oder was die Restnutzungsdauer der Ermüdung ist.

Johannes (16:10.327)

Und Rechenmodelle sind dann meistens so finite Elemente Modelle, oder? Dazu muss man natürlich dann auch genau die Dimensionen wissen von so einem Bauteil.

Yves (16:14.778)
Genau.

Yves (16:21.338)

Genau, also je mehr Informationen man hat von einer Brücke, also da kommt auch der digitale Zwilling sozusagen zur Verwendung, je mehr Informationen man über die Geometrie, das Material und so weiter an der Brücke hat, umso realistischer wird das Modell. Leider ist es bei bestehenden Bauwerken oft so, dass die Informationen recht limitiert sind, wodurch der Einsatz eines Modells dann...

Yves (16:46.618)

Wenn man jetzt nicht viel Aufwand betreibt, die Brücke genau zu kennen, sie modellieren zu können, dann ist die Qualität des Modells vielleicht fragwürdig. Das ist einer der Punkte, wo dann das klassische SHM, wo man einen Sensor installiert und über die Zeit versucht zu verstehen, wie sich das Verhalten vielleicht ändert, macht dann mehr Sinn, weil es

weniger von einem Modell abhängt, sondern mehr, wie sich das Verhalten über die Zeit verändert.

Johannes (17:17.31)

Wir können gleich übergehen, was gibt es da für Ansätze? Das eine was du gesagt hast ist ein Rechenmodell, das zu kalibrieren mit den Sensoren. Dazu muss man die Dimension alles genau wissen. In dem Fall reicht es aber, wenn man das einfach kalibriert und einmal misst.

Und dann ist ein Schritt weiter, wo man das eben, das ist dann klassisch Structural Health Monitoring verwendet, wo man das dann kontinuierlich misst. Da ist aber auch ein Rechenmodell sinnvoll oder wird das nicht immer verwendet für diese Messung.

Yves (17:56.09)

Es wird nicht immer verwendet, nein, es ist nicht zwingend notwendig. Wenn das Ziel wirklich ist, bei einer Brücke, wo man jetzt eine gute Idee hat, ob der Zustand noch tragbar ist oder nicht, wenn man dort Sensoren anbringt und nur über die Zeit versucht zu verstehen, ob der Zustand schlimmer wird, braucht man nicht unbedingt ein Modell. Wenn man aber noch zusätzliche...

Johannes (17:57.141)

Okay.

Yves (18:18.202)

Informationen aus den Messungen herausziehen will, ist das schon von Vorteil ein Modell zu haben. Also bei Brücken, wenn man SHM -Sensoren anbringt, kann man nicht nur den Zustand des Bauwerks kontrollieren, sondern man kann auch eine Idee haben über die Einwirkung des Verkehrs. Heutzutage nutzt man sehr viel WIM, also Way -in -Motion -Stationen, die Verkehrslasten zu verstehen.

Aber es gibt jetzt auch die Tensenz einen BWIM, also Bridgeway in Motion zu nutzen, wo man indirekt über Verformungen oder über Beschleunigungen die Verkehrslasten bestimmen kann, was sehr wichtig zum Beispiel bei Ermüdungsproblemen sein könnte. Und in dem Fall ist ein Modell sehr nützlich.

Johannes (19:07.572)

Okay, also zum Beweben, das sind einfach Sensoren, die messen, wie viel Lasten LKW, PKW, Gütertransport und so weiter über die Fahrbahn oder über das Bauteil fahren.

Yves (19:21.594)

Ganz genau und die geben die Information pro Achse, also wie ist die Last eines LKWs über die verschiedenen Achsen verteilt.

Johannes (19:26.451)

Achsenlast. Nur noch darauf zurückzukommen zu der Einteilung von Structural Health Monitoring, dass es kontinuierlich über Zeit misst und dann auch eine globale Einschätzung gibt. Aber z .B. den Messstreifen sind ja auch sehr lokale Messmethoden. Also wenn man das phasenoptisch sieht, dann kannst du eigentlich eine

eine optische Faser über das ganze Bauteil verteilen und misst dort die Dehnungen durch optische Signale. Und Beschleuniger, die verteilst du aufs Bauwerk und koppelst sie eigentlich, der Information rauszuziehen. Aber für mich sind Dehnstreifen sehr kleine lokale Sensoren, die man zum Beispiel über Risse gibt.

Wie werden die dann verwendet, globale Einschätzungen zu bekommen? Ist das wie beim Accelerometer?

Yves (20:24.506)

Ja, man würde nicht nur einen Dehnmessstreifen nutzen, sondern eine Reihe von Dehnmessstreifen. Es ist daher eher global, weil die Dehnungen sich aus der Steifigkeit der gesamten Brücke ergeben. Also wenn die Auflagersituation eher...

eingespannt oder nicht eingespannt ist, hat das einen Einfluss auf die Dehnungen an einem anderen Punkt der Brücke. Das heißt, es gibt trotz allem eine globale Information zu der Brücke. Es ist, wie du ganz richtig gesagt hast, etwas lokaler, weil es aus sehr vielen Gründen eine...

etwas Lokales messen kann, was vielleicht nicht gewollt ist. Sagen wir mal, man bringt die Denmaßstreifen direkt auf der Bewehrung an. Da kann es schon ausreichen, dass man die Bewehrung freizulegen den Beton etwas aufkratzt, dass das Lokal sich dann anders verhält als der Rest der Brücke. Das heißt, es bleiben lokale Sensoren, die Denmaßstreifen, man muss recht vorsichtig sein, wie man...

Yves (21:32.154)

wie man diese Daten nutzt. Der Vorteil hier bei den Beschleunigungssensoren ist, dass die Informationen, die sie geben, sind eher Eigenfrequenzen und Modalformen, die wirklich einen globalen Zustand der Brücke oder der Kurzblatt abbilden.

Johannes (21:46.624)

Okay. Ja. Und den Mestreifen, die messen eigentlich elektrisch die Ladung von den Metallblättchen oder Kabel, das da in einer Zickzack - oder Rastform appliziert wird, sehr lokal, oder? Und vielleicht noch weiter die Beschleuniger, also Accelerator oder Beschleuniger, die messen die Ladung, also zum Beispiel die...

Änderung der Kapazität zwischen zwei Elektroden, oder?

Yves (22:17.818)

Genau, also all diese Technologien sind eher indirekt. Also all deine Informationen sind korrekt. Bei den Messstreifen ist es die elektrische Spannung, die sich wechselt durch die Dehnung. Bei Beschleunigung gibt es verschiedene Typen, aber bei den MAM Sensoren ist es wirklich so, dass die elektrische Kapazität sich ändert. Und auch bei Faseroptischen Sensoren misst man eher die Refraktion oder die...

Yves (22:48.09)

die Schnelligkeit des Lichts und so weiter. Es sind immer indirekte Messungen.

Johannes (22:52.558)

Okay, verstehe. Okay, gehen wir dann weiter. Man hat diese Sensoren appliziert. In einem Fall hat man das Rechmodell, im anderen misst man es über die Zeit. Aber wie geht man mit diesen Daten die Messsignalen? Sind das eigentlich probabilistische Kurven, die man dann rauskriegt? Oder die man dann erstellt aus den Daten?

und wie wandelt man die in Informationen, die man dann wirklich verwenden kann als Indikatoren.

Yves (23:27.93)

Genau, es hängt ja auch etwas von den Sensoren ab, aber grundsätzlich versucht man Indikatoren zu haben, die den Zustand der Brücke abbilden. Also sagen wir mal im Falle von den Messstreifen, wenn man das kombiniert mit einer Kamera zum Beispiel, zu verstehen, wie viele Lasten zu jedem Zeitpunkt auf der Brücke sind, dann kann man eine probabilistische Einschätzung davon kriegen, wie reagiert die Brücke auf Lasten. Es ist ähnlich bei den...

Beschleunigungsmessern, wo man halt jede zehn Sekunden ungefähr eine Modalanalyse der Brücke durchführen kann, zu verstehen, wie sich das verändert. Wieso man das probabilistisch macht, ist, weil es viele Einflüsse gibt, die wir nicht modellieren und auch nicht kontrollieren. Also zum Beispiel die Feuchtigkeit, die Temperatur, die Sonneneinstrahlung, die vielleicht mehr auf dem Oberdeck ist und weniger auf dem Unterdeck. All dies hat einen Einfluss.

den wir grundsätzlich nicht messen und deshalb eher statistisch abbilden mit probabilistischen Methoden.

Johannes (24:34.124)

Okay. Und da hatten wir nochmal eine Folge, ich glaube, das war die zweite Folge, über die quantitative Risikoanalyse im Bauwesen. Und da hat Paul -Rimo Wagner gemeint, dass Ingenieure oft ein bisschen eine Schwierigkeit haben mit probabilistischen Ansätzen, mit denen zu rechnen.

weil sie ja gewohnt sind aus Normen klare Grenzwerte zu bekommen oder Sicherheitsbeiwerte. Dabei ist es ja eigentlich auch so, dass diese Sicherheitsbeiwerte in den Normen auch aus probabilistischen Messungen kommen, wo man halt sehr viel Sicherheit noch dazu gegeben hat.

Jetzt bei den Sensoren kommen die Werte auch wieder aus probabilistischen Messungen. Ich setze hier auch die Herausforderungen bei Ingenieuren, dann mit diesen Werten umzugehen.

Yves (25:31.994)

Ja, ich kann da was Paul Remo gesagt hat bestätigen. Es ist nicht immer einfach, Ingenieure davon zu überzeugen, das probabilistisch anzugehen. Aber dadurch, dass wir das messen und die Messausgabe probabilistisch ist, haben diese Messungen, vor allem wenn man sie mit einem Modell verbindet.

erst ihre volle Wirkung, wenn man die ganze Analyse probabilistisch durchführt. Also sozusagen eine Risikoanalyse mit den Einwirkungen, mit dem Materialzustand und alles probabilistisch abbildet. Wir haben das durchaus mit Engineerpartnern durchgeführt. Es ist nicht unmöglich, aber es braucht etwas Überzeugung grundsätzlich. Was ich dazu fügen würde, ist...

Was uns entgegenkommt ist, dass beide die Eurocodes und auch die SEA, vor allem die SEA für die bestehenden Bauwerke, es uns erlauben probabilistische Ansätze zu wählen und in diesem Fall auch etwas näher an die Grenzen zu gehen. Also nicht mehr diese sehr sehr konservativen Sicherheitsbeiwerte zu wählen, sondern diese etwas zu reduzieren, weil man halt mehr Informationen hat, die auf Daten basieren. Es ist nicht, dass wir das jetzt...

mit mehr Risiko anders annehmen, sondern wir haben eine Grundlage, verschiedene Werte genauer zu bestimmen und dadurch können wir die Sicherheitsbewertung etwas reduzieren.

Johannes (26:55.956)

Das heißt, es ist wahrscheinlich ein bisschen aufwendiger, das zu rechnen oder zumindest neu für Ingenieure. Dafür ist das, was dann rauskommt, ich weiß nicht, wie schlank das Bauwerk ist oder wie teuer, hat dann große Vorteile. Also die Ingenieure können dann bessere Produkte anbieten bzw. der Kunde kriegt mehr Leistung.

Kannst du da Beispiele nennen, wo ihr das anwendet?

Yves (27:28.378)

Ja, es gibt mehrere Beispiele. Ein Beispiel, das jetzt etwas weniger für Kunstbauten ist, sondern eher Gebäude, ist die Erdbebenüberprüfung, die grundsätzlich auch bei Brücken interessant ist, aber wir eher bei Gebäuden jetzt durchführen. Wenn man das probabilistisch betrachtet und halt auch die Daten der Messungen hat, kann man sehr, sehr viel einsparen bei wie viel gemacht werden müsste, die ...

für Neubauten zu erreichen.

Johannes (27:58.087)

Also bei Ausbauten oder bei bestehenden Gebäuden oder?.

Yves (28:02.426)

Oft bei Ausbauten genau oder auch bei bestehenden Gebäuden, wo aus irgendwelchen Gründen jetzt eine Erdbebenüberprüfung anfällt und man nicht genau weiß, wie sicher dieses Gebäude ist. Ein wichtiger Punkt dabei ist, wie du ganz richtig gesagt hast, dass es für den Ingenieur etwas mehr Arbeit hat, auch etwas mehr Studium der Mathematik, aber das für den Kunden rechnet es sich fast immer. Also in einigen Fällen...

muss man trotzdem noch eine Intervention durchführen, aber in dem Fall weiß man auch ganz genau, wo es notwendig ist, weil man halt die Messungen des Gebäudes hat. Das heißt, man muss jetzt nicht alles ertüchtigen, sondern nur dort, wo es notwendig ist. Oder teilweise kann man auch rechnerisch nachweisen, dass eine Ertüchtigung nicht notwendig ist, wo man das mit all den Sicherheitsbewertungen sonst nicht auch zeigen könnte. Das heißt...

Yves (28:57.434)

Grundsätzlich ist es für die Ingenieure gut. Sie haben mehr Arbeit, sie werden eher belohnt für ihre Aufgaben und für ihre Dienste. Und es ist auch nachhaltiger. Ich glaube in der Schweiz gibt es pro Sekunde irgendwas wie 500 Kilo Abfall aus der Bauindustrie. Und wenn wir das irgendwie reduzieren können, indem wir nur ertüchtigen, falls es notwendig ist, glaube ich, ist das auch ein wichtiger Punkt für die Nachhaltigkeit der Bauindustrie.

Johannes (29:27.553)

Also im Detail heißt das dann zum Beispiel, man hat ein bestehendes Gebäude und man weiß das E -Modul nicht genau und muss dann einen recht hohen Sicherheitsbeiwert dazugeben, dann vielleicht noch ein, zwei Stöcke drüber zu bauen oder irgendwas anzubauen. Und wenn man jetzt den Storm verwendet, kann man den E -Modul genau bemessen, also das E -Modul oder auch irgendwelche Kräfte, Steifigkeit.

und kann dadurch wahrscheinlich dann Stockwerke draufbauen, ohne wirklich das ganze Bauwerk drunter auszubauen und zu verstärken, was man dann mit den Sicherheitsbewertungen, wo man im Modul nicht weiß, machen müsste. Habe ich das verstanden? Richtig.

Yves (30:16.154)

Genau, ja. Das habe ich vielleicht auch. Genau wie etwas vermessen zu sagen, wir können es sehr viel genauer wissen, als es der Fall wäre, wenn man das nur abschätzen muss. Wie vorher gesagt, es bleibt probabilistisch. Das heißt, wir können jetzt nicht sagen, die Steifigkeit dieses Gebäudes ist x, sondern eher es hat eine Verteilung.

Yves (30:37.658)

x mit plus minus 5 Prozent, wo es, wenn man nur die Werte der Fachliteratur anwenden würde, wäre es eine Streuung für Mauerwerk, zum Beispiel von 2 bis 8 Gigapascal. Das heißt, es wird sehr viel genauer, aber es wird jetzt nicht ein präziser Wert, das wäre vermessen.

Johannes (30:54.923)

Im Endeffekt kriegt man dann zwei Kurven, wo dann normal verteilt und einer ist die Einwirkung, das andere ist der Widerstand und die dürfen sich dann nur ganz leicht überschneiden oder? 95 % Quartil oder?

Yves (31:13.082)

Ja, sogar etwas weniger. Grundsätzlich gibt uns die Überleitung einen Ausschluss darüber, wie groß die Versagenswahrscheinlichkeit ist. Und die sollte pro Jahr nicht höher als ein paar Prozent sein, das noch akzeptieren zu können.

Johannes (31:29.978)

Okay, verstehe. Könnt ihr vielleicht, vielleicht kommen wir kurz zu ihr, Mos. Was bietet ihr euren Kunden an? Das, was wir gerade gesprochen haben oder andere Sachen.

Yves (31:44.602)

Genau, wir bieten verschiedene Dienste und Produkte an, die alle mit Monitoring zu tun haben. Also das kann entweder, was wir einen Schnelltest nennen, also entweder eine kurze Messung eines Gebäudes, einer Brücke und so weiter, in einem größeren Portfolio von Tragwerken zu verstehen, welche in diesem Moment eher kritisch ist.

Yves (32:13.562)

ist grundsätzlich nur auf Daten basiert. Das heißt, wir vergleichen die verschiedenen Strukturen eines Portfolios und verstehen welche in einem besseren und welchen in einem schlechteren Zustand sind. Dann gibt es die, sagt man mal, einen etwas vertiefteren Health Checkup, wo wir immer noch eine kurze Messung machen, das dann aber... mit einem Modell verbinden, genau die Analyse zu machen, die wir jetzt besprochen haben. Also eine Risikoanalyse, wo wir die Einwirkungen mit dem Widerstand vergleichen. Das machen wir grundsätzlich zusammen mit Ingenieurpartnern, weil die halt das Know-how haben, auch die Strukturen zu modellieren.

Yves (32:55.866)

Und dann ist die nächste Stufe, ist wirklich sozusagen die Intensivstation, wo wir die Struktur dauerhaft messen, also eher das SSE -Charm im klassischen Sinne. Aber teilweise, was auch noch zusammen mit Modellen, auch Grenzwerte zu kennen, abfangen, ein Alarm notwendig ist. Also sagen wir mal, wenn wir Sensoren auf einer Brücke haben, wenn unsere Indikatoren unter einen gewissen Wert fallen, würden wir einen Alarm geben, damit die Nutzer... vielleicht umgeleitet werden können zum Beispiel.

Johannes (33:26.48)

Aber den Grenzwert für einen Alarm entscheidet der Ingenieur. Oder macht jeder das?

Yves (33:31.61)

Genau, analog wie zu dem anderen Produkt ist es der Ingenieur, der genau die Fachkenntnis hat, zu wissen, welcher Grenzwert, der in diesem Fall auch dann probabilistisch definiert wird, aber ab falsch im Grenzwert kann das eine Gefahr für die Sicherheit des Tragwerks sein. Und dann gibt es noch das, sagen wir mal, das große Ziel in der Zukunft wäre etwas wie die Smartwatch. Also...

Yves (33:57.85)

an ganz vielen Brücken ein paar wenige kosteneffiziente Sensoren anbringen, dauerhaft die verschiedenen Brücken auch miteinander vergleichen zu können und zu sehen, wann und wo eine Brücke sich nicht so verhält

wie vorgesehen. Und auch schnell reagieren zu können im Fall von außergewöhnlichen Einwirkungen. Also es könnte sein, dass ein Lastwagen gegen einen Pfeiler

Yves (34:22.938)

fährt oder ein Schiff in Baltimore oder auch ein kleines Erdbeben im Wallis oder eine Erdrutschung. Alle außergewöhnlichen Einwirkungen, die man nachher dann in Theorie, die eine visuelle Inspektion machen würde, zu verstehen, ob es Einflüsse oder Schäden gibt oder nicht.

Johannes (34:44.242)

Wie lange halten diese Sensoren? Muss man die dann wechseln regelmäßig?

Yves (34:49.938)

Die Hoffnung ist, dass die Sensoren weniger lange halten als die Bauwerke. In fast allen Fällen ist das so. Die Sensoren halten ein paar Jahre, während die Bauwerke für 50 oder 100 Jahre gebaut werden. Das heißt, wir als Irrmosp bieten die Sensoren mit Garantie an. Das heißt, wenn die Sensoren aus irgendwelchen Gründen nicht mehr funktionieren, ersetzen wir die Sensoren. Also unser Ziel ist es, die Sensoren zu bieten.

ist es grundsätzlich, kosteneffektive Sensoren mit intelligenten Algorithmen zu verbinden. Das heißt, unser Ziel ist es, die Messungen zu interpretieren und in einer Form aufzuzeigen, die verständlich und klar ist. Und die Sensoren sind für uns eher Mittel zum Zweck. Das heißt, wir produzieren sie teilweise auch bei uns, sie kostengünstig herstellen zu können und falls ein Sensor irgendwann nicht mehr funktioniert, ersetzen wir ihn auf unsere Kosten senken.

Johannes (35:45.404)

Das heißt, das macht aber vielleicht mehr Sinn eher gegen Ende in der Lebensdauer oder du zu dir auch bei neuen Bauwerken schon einsetzen.

Yves (35:54.842)

Man könnte sie auch bei neuen Bauwerken einsetzen, weil es auch dort die Gefahr gibt, dass ein überladener Lastwagen über die Brücke fährt oder es ein Erdbeben gibt. Also in der etwas längerfristigen Zukunft würden die Sensoren auf allen Brücken Sinn machen. Jetzt konkret zu Beginn sind es eher die sehr, sehr vielen Brücken, die bald an ihr ...

Yves (36:20.826)

an die Ende ihres Lebenszyklus kommen, wo es darum geht zu verstehen, welche noch risikofrei weiter genutzt werden können, bei welchen sich eine Ertüchtigung oder einen Ersatzneubau empfehlen würde.

Yves (37:18.618)

Genau, also ich glaube, all dies auch die kurzfristigen Messungen, die man selbstverständlich periodisch wiederholen kann, aber all dies sind Schritte hin zu einer digitalen Identität einer Brücke oder eines digitalen Zwillings, der dann ...

kurz und übersichtlich all die Daten über eine Brücke hat und das Erhaltungsmanagement sehr viel objektiver und einfacher gestalten sollte.

Johannes (37:37.53)

Ja.

Johannes (37:46.217)

Was natürlich schwieriger ist im Infrastrukturbau, ich habe das Gefühl, bei einem Hochbau ist es klar, dass ein digitales Zwilling einfach ein 3D -Modell ist, wo man alle Informationen hat, auch was für Geräte installiert ist, die Geschichte, was so gemacht wurde, verschiedene Layers etc. Aber in der Infrastruktur muss man eigentlich mehr gezielt auch auf technische Werte eingehen. Und da können natürlich die Sensoren dann zu tun, Structural Health Monitoring, aber dann mehr auch vielleicht ein Rechenmodell. und im letzten Fall dann erst vielleicht ein 3D -Modell in besonderen Fällen. Und das zu entscheiden ist wahrscheinlich die große Herausforderung für Infrastrukturbesitzer, weswegen dieses NTEC -Projekt auch sehr interessant ist, denke ich. Danke sehr, Yves.

Dazu zur Structural Health Monitoring habe ich keine weiteren Fragen. Ich habe noch gehört, du hast Erfahrung zur Genor Brücke. Ich würde da gerne eine extra Folge daraus machen, eine Sonderfolge sagen wir, 10 -15 Minuten. Deswegen bedanke ich mich einmal, dass du heute hier warst. Es war sehr informativ. Ich wünsche euch viel Erfolg mit ihr, Mus. Und danke, ja.

Yves (39:01.242)

Danke dir.