

# Prädiktive Reife – Eine neue Ära der Betonhärtung

■ Bertrand Delforge, JB Concrete, Frankreich  
April Kraft, Kraft Curing Systems, Kraft Curing Systems GmbH, Deutschland

Seit Jahrzehnten steht Kraft Curing mit an der Spitze der Innovation im Bereich der Betonhärtung. Die Einführung neuer Zemente - mit verschiedenen Füllstoffen (latent hydraulisch und inert), die Portlandklinker teilweise ersetzen, um den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Zements zu verringern - veranlasst Hersteller von Betonfertig- und Spannbetonteilen, sich zu fragen, wann ihre Produkte ausgeschalt oder die Vorspannung gelöst werden kann, ohne die Produktqualität zu gefährden. Als Antwort auf diese Problemstellungen markierte die Einführung der Match-Cure-Technologie durch Kraft Curing im vergangenen Jahr einen weiteren Meilenstein in der Qualitätskontrolle für die Produktion von Fertig- und Spannbetonteilen.

Das System ist als umfassendes Frühfestigkeitsüberwachungssystem konzipiert. Match-Cure ermöglicht es Herstellern, sicherzustellen, dass das frisch gegossene Betonelement die erforderliche Festigkeit erreicht hat, bevor es ausgeschalt oder die Vorspannung gelöst wird. Diese Erkennung des frühestmöglichen Zeitpunkts dafür reduziert

Energie- und Arbeitskosten und gewährleistet gleichzeitig Sicherheit und Produktqualität.

Prüfzylinder oder -würfel, die beim Gießen eines Fertig- oder Spannbetonteils hergestellt werden, werden in eine isolierte Match-Cure-Klimakammer gelegt. Diese ermöglicht eine präzise Messung und Steuerung der Probentemperatur, die der InnenTemperatur des tatsächlichen Betonelements entspricht.

Steigt die Temperatur des Betonelements (durch Hydratation oder ein beschleunigtes Härtungssystem), erwärmt eine Heizeinheit im Match-Cure-Gehäuse die Probe. Sinkt die Temperatur des Betonelements (z. B. durch Wind oder eine beschädigte Abdeckung), kühlte ein Lüfter die Probe auf mindestens Umgebungstemperatur. Für Regionen mit strengen Wintern ist ein Kühlssystem optional erhältlich.

Temperatursensoren - wahlweise kabelgebunden oder drahtlos - messen kontinuierlich die Härtungsbedingungen des



Integration von Match-Cure in das AutoCure-Ökosystem von Kraft Curing, um doppelte Steuerungs- und Überwachungssysteme zu vermeiden und Kosten zu sparen.



Match-Cure-Klimakammern für insgesamt fünf Produktionsbereiche/-betten/-formen/-tische

Betonelements und der Probe. Diese Daten werden an das AutoCure®-Steuersystem übermittelt. Wenn die Temperatur des Elements höher als die der Probe ist, wird das Heizsystem aktiviert, um sie anzulegen. Sinkt die Temperatur des Elements, reagiert das System mit Kühlung oder Belüftung.

Zur Qualitätssicherung zeichnet das System VaporWare V2® unabhängig alle Klimadaten auf - einschließlich Chargennummern, Elementbeschreibungen und Zeitstempeln - und erstellt ein vollständiges, prüfbares Protokoll des Betonelements und der Prüfkörper in der Match-Cure-Kammer.

Mit Match-Cure erhalten Hersteller eine präzise Simulation der realen Härtungsbedingungen ihrer Elemente. Bevor das reale Betonelement ausgeschalt oder entspannt wird, kann die Probe aus der Match-Cure-Kammer entnommen und auf Druckfestigkeit geprüft werden, um festzustellen, ob der Beton ausreichend Festigkeit erreicht hat.

### Match-Cure Ultra

Kraft Curing hat die Technologie weiterentwickelt und Match-Cure Ultra entwickelt - ein System zur prädiktiven Reifesteuerung.

Anstatt abzuwarten, wie sich Fertig- oder Spannbeton unter bestimmten Bedingungen verhält, können Hersteller nun



Ein großer Monitor zeigt für jeden Produktionstisch bzw. jede Form den aktuellen Fertigstellungsgrad (%) und die vorraussichtliche Fertigstellungszeit an. Farbige Umrandungen in Grün, Gelb oder Rot zeigen den aktuellen Härtungsstatus jedes Produktionsbereichs.

exakt vorhersagen und steuern, wann das Produkt die erforderliche Festigkeit erreicht.

Mit Kraft Curing's Match-Cure Ultra können Betonhersteller Härtungsparameter (Temperatur, Dauer der Vorerwärmung, Aufheiz- und Haltephasen) festlegen, um die Zieldruckfestig-



MASTERS OF BLENDING  
**KNIELE**

THE ART OF MIXING  
Made in Germany

*Simply the best*

Web:



Catalogue:



Movie:



keit zu erreichen, die das sichere Ausschalen oder Entspannen ermöglicht. Dies bedeutet den Übergang von reaktiver Überwachung zu proaktiver, datenbasierter Produktionssteuerung!

Das Fundament von Match-Cure Ultra liegt in der prädiktiven Reifemessung – einer Methode zur Bewertung des Hydratationsfortschritts im Beton. Während der Zement hydratisiert, wird Wärme freigesetzt. Durch Temperaturmessung mittels Thermoelementen im Betonelement wird der Hydrationsgrad quantifiziert und in einen Reifeindex umgerechnet.

Dieser Index spiegelt das „äquivalente Alter“ des Betons wider – also die Zeit, die das Material benötigt hätte, um unter Standardbedingungen (typischerweise 20 °C) dieselbe Festigkeit zu erreichen. Mit Hilfe des Arrhenius-Gesetzes berücksichtigt das System die Beschleunigung der Hydratation bei höheren Temperaturen und deren Verlangsamung bei niedrigeren Temperaturen.

Das Ergebnis ist ein kontinuierliches Bild der Festigkeitsentwicklung im Inneren des Betonelements – ohne Zerstörung eines Prüfkörpers in jeder Phase.

Die prädiktive Reife ist besonders in der frühen Erhärungsphase wertvoll und erfordert eine bestimmte Ausrüstung:

Sensoren zur Erfassung der Temperaturdaten, Speichergeräte zur Aufzeichnung und Software zur Berechnung der Festigkeitsentwicklung.

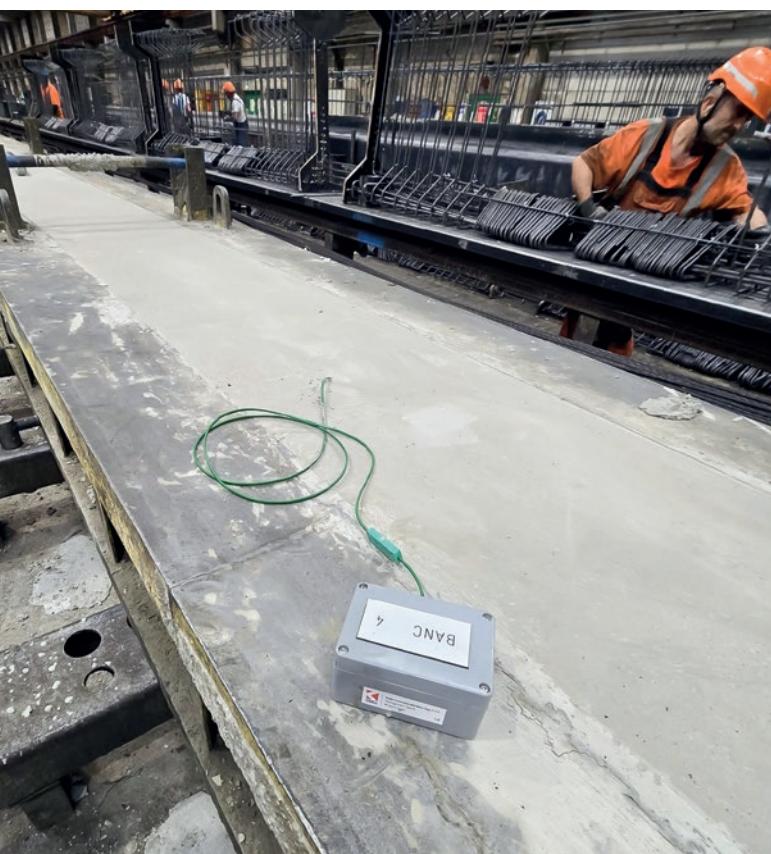
### Von der Messung zur Vorhersage

Während die herkömmliche Reifemessung den aktuellen Festigkeitszustand zeigt, hat Kraft Curing sie in ein Prognoseinstrument verwandelt.

Zunächst wird eine Kalibrierkurve erstellt: Prüfwürfel oder -zylinder einer bestimmten Betonmischung werden bei 20 °C unter Standardbedingungen gehärtet und in regelmäßigen Abständen auf Druckfestigkeit geprüft. Die Ergebnisse bilden ein Festigkeitszeitprofil.

Während der Produktion messen Sensoren im Betonelement die reale Temperaturentwicklung. Durch Umrechnung der Härtungshistorie in äquivalente Alter kann das System die aktuelle Position auf der Kalibrierkurve bestimmen und die Festigkeit zu jedem Zeitpunkt vorhersagen.

So müssen Hersteller nicht mehr auf die Ergebnisse der Betonprüfung warten, sondern wissen im Voraus, wann der Beton die gewünschten Eigenschaften erreicht.



Robuster, magnetischer, drahtloser Temperaturtransmitter (graues Gehäuse) mit Typ-K-Thermoelementkabel zur Messung der Innentemperatur des Betons



Ein drahtloser Repeater, der in der gesamten Anlage oder auf dem Werksgelände platziert wird, um eine ausreichende Signalstärke auf einer großen Fläche sicherzustellen. Thermoelementkabel zur Messung der Innentemperatur des Betons

## So funktioniert prädiktive Reife in der Praxis

Der Arbeitsablauf ist einfach, aber wirkungsvoll. Eine Reihe von Kalibrierproben wird mit der exakten Produktionsmischung hergestellt und bei 20 °C gelagert. Nach wenigen Stunden werden sie regelmäßig auf Druckfestigkeit geprüft, und die Ergebnisse in die Match-Cure-Ultra-Tabelle eingetragen. Nach 24 Stunden ist ein vollständiges Reifeprofil erstellt.

Dieses Profil wird Teil der „Reifebibliothek“ – einer Datenbank mit mischungsspezifischen Festigkeitskurven. Für alle künftigen Chargen derselben Rezeptur nutzt das Programm die gespeicherte Kurve und kombiniert sie mit den Echtzeit-Temperaturmessungen, um die Festigkeitsentwicklung vorherzusagen.

Gleichzeitig validieren Proben in der Match-Cure-Kammer diese Vorhersagen, da sie unter identischen Bedingungen aushärten. Wenn das Programm signalisiert, dass die Zielfestigkeit erreicht ist, wird eine einfache Druckprüfung der Proben durchgeführt, um die vorhergesagte Festigkeit zu bestätigen.

### Steuerung der Härtungsanlage durch prädiktive Kontrolle

Die Kombination von Match-Cure und AutoCure verwandelt die Reifeprognose in ein steuerbares Werksystem. Bediener



Isolierte Match-Cure-Klimakammer mit Prüfkörper und Messung der inneren Betontemperatur

können die Festigkeitsentwicklung in Echtzeit verfolgen und Warnungen erhalten, falls die Härtung von den Erwartungen abweicht – etwa durch Kälte, ungleiche Temperaturverteilung oder Störungen im System.



**Marktführer im Bereich der Mischtechnologie. Schnell, gleichmäßig, zuverlässig. Weltweite Referenzen.**

**THE MIXING SOLUTION**



**MAO**  
Doppelwellenmischer mit bis zu 9 m<sup>3</sup> Festbetonausstoß



**MAO C**  
Doppelwellen-Durchlaufmischer von 80 bis 500 m<sup>3</sup>/Stunde



**Große Auswahl an Zubehör**



Spannbetonfertigung mit Match-Cure-Klimakammern

So wird die Produktionsplanung verlässlicher: Teams wissen genau, wann Formen ausgeschalt oder Spannbetonteile freigegeben werden können, und können Personal entsprechend einplanen.

Ebenso kann das System den Härtungsprozess selbst optimieren, indem es die Profile automatisch anpasst. Es verhindert sowohl eine zu geringe Härtung, die strukturelle Risiken birgt, als auch eine zu hohe Härtung, die Zeit und Energie verschwendet. Das Ergebnis sind ein geringerer Energieverbrauch, kürzere Zyklen und weniger Planungsfehler.

Für zusätzliche Sicherheit kann nach Erreichen der prognostizierten Reife eine Probe getestet werden. So entstehen zusätzliche Datenpunkte für die Reifedatenbank, wodurch die zukünftigen Prognosen noch präziser werden.

### Die Vorteile der prädiktiven Reife

Die Vorteile erstrecken sich über die gesamte Produktionskette. Die Qualität kann steigen, da jedes Element überprüft wird. Zeitersparnis entsteht, weil keine Sicherheitszuschläge mehr nötig sind – das Handeln erfolgt genau dann, wenn der Beton bereit ist.

Auch die Energieeffizienz verbessert sich, da Heizsysteme oder Dampfgeneratoren nur so lange laufen wie nötig.

Aus Managementsicht kann die prädiktive Reife eine bessere Planung und Koordination ermöglichen. Wenn im Voraus bekannt ist, wann Produkte fertig sind, können Personal- und Logistikprozesse optimal aufeinander abgestimmt werden – Leerlaufzeiten und Engpässe werden minimiert. Das Resultat: ein reibungsloser Arbeitsablauf, geringere Kosten und mehr Zuverlässigkeit bei Lieferterminen.

### Schlussfolgerung: Sicherheit statt Unsicherheit

Die prädiktive Reife ist nicht nur eine technische Neuerung – sie kann grundlegend die Steuerung der Produktion verän-

dern. Indem sie es Herstellern ermöglicht, genau zu entscheiden, wann ihre Produkte fertig sind, und die Härtungsbedingungen automatisch anzupassen, verschiebt Kraft Curing die Kontrolle von Unsicherheit zu Gewissheit. Diese Entwicklung steht nicht nur für schnellere Produktionszyklen oder geringere Energiekosten, sondern dafür, dass die Betonhärtung vom erfahrungsbasierten Handeln zu einer datenbasierten Wissenschaft wird. ■



Kraft Curing ermöglicht allen Lesern der BWI den kostenlosen Download dieses Artikels im pdf-Format. Besuchen Sie die Webseite [www.cpi-worldwide.com/channels/kraft\\_curing](http://www.cpi-worldwide.com/channels/kraft_curing) oder scannen Sie den QR-Code mit Ihrem Smartphone ein, um direkt auf diese Webseite zu gelangen.



### WEITERE INFORMATIONEN



[www.jbconcrete.fr](http://www.jbconcrete.fr)



Kraft Curing Systems GmbH

Mühlenberg 2

49699 Lindern, Deutschland

T +49 5957 96120

[info@kraftcuring.com](mailto:info@kraftcuring.com)

[www.kraftcuring.com](http://www.kraftcuring.com)