

Frischbetonkühlung mit Binäreis oder Binärschnee¹

Kunstschnee zur Frischbetonkühlung – von der „Piste“ ins Betonwerk

Professor Dr. Ing. Joachim Paul²

Technische Universität Dänemark, Fachbereich Maschinenbau, Lyngby, Dänemark

Vorwort

Dieser Beitrag stellt Überlegungen zur temperaturgesteuerten Frischbetonherstellung mit Binäreis oder Binärschnee dar. Ausgangspunkt sind Angaben, die von Herrn Frank Huber zur Verfügung gestellt [1] und hier verarbeitet wurden. Für die Mitwirkung an diesem Manuskript gebührt Herrn Frank Huber et al. großer Dank.

1 Was ist Binäreis bzw. Binärschnee?

In Kurzform ist Binäreis „flüssiges Eis“ und Binärschnee ist die hoch konzentrierte Variante des Binäreises mit veritablen Schnee-Eigenschaften. Die Bilder 1 und 2 zeigen Erscheinungsformen von Binäreis mit seinen „flüssigen“ Eigenschaften.



Bild 1: Binäreis – „ozapft is“



Bild 2: Binäreis = „flüssiges Eis“

Der Binärschnee weist Eigenschaften natürlichen Schnees auf (Bilder 3 und 4). Dazu wird Binäreis aufkonzentriert und kann sogar als freifallender Schnee dargestellt werden (Bild 3). Dieser Binärschnee kann bei jeder Umgebungstemperatur hergestellt werden. Eine sehr



Bild 3: Frei fallender Binärschnee



Bild 4: „Binärschneehaufen“

große Anlage für die Kühlung eines Bergwerkes in Botswana erzeugt 2.700 Tonnen Binärschnee bei Außentemperaturen bis 50 °C.

Binäreis und Binärschnee werden aus Wasser und einem Additiv hergestellt. Dabei entstehen kleinste Eiskristalle im Mikrometer-Bereich. Für die Betonkühlung sind verschiedene unkorrosive und preiswerte Additive verfügbar, die allerdings mit einschlägigen Betonfachleuten im Rahmen bestehender Normen abgeklärt werden müssen. Je nach Konzentration des Binäreises und der Prozessführung beträgt der Additivanteil zwischen <1 % und 3 %.

Die Haupteigenschaften des Binäreises können folgendermassen beschrieben werden:

- sehr hohe Energiedichte („viele kWh Kälteenergie in einem kg“)
- sehr gute Speicherbarkeit (relativ einfache Behälter)
- gute Pumpfähigkeit als flüssiges Binäreis
- enorme Kühlleistung

¹ Vortragsmanuskript für die Veranstaltung „Temperatursteuerung von Beton in Theorie und Praxis“ am 3. Februar 2005 beim „Expertenforum der Österreichischen Zementindustrie und des Forschungsinstitutes der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie“ in Wien/Österreich.

Binäreis und Binärschnee sind die eingetragenen Warenzeichen der INTEGRAL International GmbH in Flensburg/Deutschland; die Technologie ist durch zahlreiche nationale und internationale Patente geschützt.

² Fachbereich Maschinenbau, Sektion Energietechnik, Fachgebiet „Kältetechnik“; Email: jp@mek.dtu.dk

Binäreis wird heutzutage für viele Anwendungen im In- und Ausland eingesetzt: Raumkühlung und Klimatechnik, Lebensmittel-Schnellkühlung, Bergwerkskühlung, chemische und pharmazeutische Industrie, Kühlung von Fisch und Meeresfrüchten, Flugzeugkühlung, Supermärkte, Brauereien und Molkereien, Kühlhäuser, Fernkälte usw.

Die Binäreistechnik wurde national und international mit höchsten Preisen und Auszeichnungen bedacht und begeistert immer wieder ob seiner unerreichten Kühlgeschwindigkeit und gleichmäßigen Kühlung.

2 Betonkühlung

2.1 Ausgangswerte

1 m³ Beton wird „laut Lehrbuch“ aus 1.910 kg trockenem Gestein, 300 kg Zement und 190 kg Wasser hergestellt, wodurch sich ein Rohgewicht des verdichteten Frischbetons von

2.400 kg ergibt (Bild 5, linke Säule). Die Frischbetontemperatur soll dabei **27 °C** nicht überschreiten.

Da das Gestein im Normalfall jedoch nass ist, muss entsprechend weniger Wasser zugegeben werden. Dieses Zugabewasser hat eine typische Temperatur zwischen 12 und 14 °C (Grund- bzw. Brunnenwasser). Der Zement kann zwischen 70 und 100 °C warm sein, und das Gestein ist jahres- und tageszeitabhängig sowie strahlungsbedingt von unterschiedlicher Temperatur.

Als Stoffwerte wurden verwendet:

- spezifische Wärmekapazität

Wasser	4,19 kJ/kgK
Gestein	1,00 kJ/kgK
Zement	1,00 kJ/kgK
Beton	1,14 kJ/kgK
- Schmelzenthalpie³ von

Binäreis (100 %)	333 kJ/kg
------------------	-----------

Bild 5: Herstellung von 1 m³ oder 2.400 kg Beton aus trockenem (linke Säule) und nassem (drei rechten Säulen) Gestein

Trockenes Gestein	Nasses Gestein (anhaftendes Wasser mit Gesteinstemperatur)		
	2,1 % Feuchtigkeit	3,3 % Feuchtigkeit	4,5 % Feuchtigkeit
300 kg Zement 85 °C	300 kg Zement 85 °C	300 kg Zement 85 °C	300 kg Zement 85 °C
190 kg Wasser, 12,8 °C	150 kg Wasser, 12,8 °C	125 kg Wasser, 12,8 °C	100 kg Wasser, 12,8 °C
1.910 kg Gestein 20 °C trocken	am Gestein anhaftendes Wasser 40 kg, 20 °C 1.910 kg Gestein 20 °C trocken	am Gestein anhaftendes Wasser 65 kg, 20 °C 1.910 kg Gestein 20 °C trocken	am Gestein anhaftendes Wasser 90 kg, 20 °C 1.910 kg Gestein 20 °C trocken
Frischbeton-Temperatur 27,0 °C	Frischbeton-Temperatur 27,4 °C	Frischbeton-Temperatur 27,7 °C	Frischbeton-Temperatur 28,0 °C

} Gestein OHNE anhaftendes Wasser (links) / Gestein MIT anhaftendem Wasser (rechts)

³ Der Begriff „Schmelzenthalpie“ oder auch „Schmelzwärme“ beschreibt ganz allgemein den gespeicherten Energieinhalt eines schmelz- oder gefrierfähigen Stoffes. Bei Eis ist die Schmelzenthalpie die Wärme, welche z. B. dem Beton entzogen wird, indem das Eis vollständig in Wasser (d. h. „geschmolzenes Eis“) umgewandelt wird und somit den Beton abkühlt. Diese Schmelzenthalpie soll möglichst hoch sein, um mit wenig Eis bzw. Wasser dem Beton viel Wärme zu entziehen. Dabei haben wir Glück: Wasser hat den höchsten Wert nach dem giftigen Ammoniak (Ammoniak wäre allerdings –78 °C kalt!). **Um 1 kg Eis zu schmelzen, benötigt man genau so viel Wärme, als ob man 1 kg Wasser von 0 °C auf 80 °C erhitzen würde.** Für die Betonkühlung ist Eis daher „mächtig gewaltig“ (häufig verwendetes Zitat in den dänischen Filmen „Die Olsen Bande ...“ –Tipp: seeeeehr sehenswert!).

Sofern nicht anders vermerkt, wurden folgende Werte als **Betriebsbedingungen** verarbeitet:

- Frischbetontemperatur konstant 27 °C
- Zement-Temperatur zwischen 70-100 °C, gewählt 85 °C

Sofern das Gestein nass war, wurde davon ausgegangen, dass der anhaftende Wasseranteil am Gestein dieselbe Temperatur wie das Gestein selbst hat. Wie man sehen wird, erhöht diese Tatsache den Eisbedarf zusätzlich.

Exotherme Reaktionswärme des Frischbetons wurde in den Berechnungen vernachlässigt, zur Kompensation der Reaktionswärme wird allerdings zusätzliche Kühlung benötigt.

2.2 Ergebnisse

Um den Einfluss der Temperatur von Gestein und Zement aufzuzeigen, da dieser sich auf den Kühlbedarf auswirkt, wurde ein Ausgangsfall herangezogen, welcher unter typischen Bedingungen genau 27 °C Frischbetontemperatur – noch ohne Kühlung – ergibt (Tafel 1):

Jedwelche höhere Temperatur von Gestein (Sommer!), Zement oder Kaltwasser benötigt zusätzliche Kühlung, wenn man die Obergrenze der Frischbetontemperatur von 27 °C einhalten muss.

Um sommerliche Bedingungen zu studieren, wurden folgende Parameter verändert:

- Gesteinstemperatur von 20->50 °C
- Zement-Temperatur von 20-100 °C
- Zugabewassermenge von 100-190 l/m³ daraus resultierend die am Gestein „anhaftende“ Wassermenge von 0-90 l/m³

Um das Hauptergebnis vorwegzunehmen: Es ist unter sommerlichen Bedingungen (Ge-

steinstemperatur 25 °C) nicht möglich, eine Frischbetontemperatur von 27 °C unter praxisüblichen Umständen einzustellen. Dafür ist die Temperatur des Zugabewasser einfach nicht ausreichend niedrig und es wird Binäreis oder Binärschnee benötigt.

a) Einfluss der Zement-Temperatur

Man erkennt aus den Bildern 6 und 7, dass nur einmal, nämlich beim Idealfall „trockenes Gestein“ und einer niedrigen Zement-Temperatur von 50 °C, die Temperatur des Zugabewassers ausreicht. Jegliche höhere Zement-Temperatur sowie nasses Gestein lassen die Temperatur des Frischbetons über die geforderten 27 °C ansteigen. Es kann temperaturregulierend nur mit einer Absenkung der Zugabewassertemperatur bzw. mit der Verwendung von Binäreis oder Binärschnee eingegriffen werden.

b) Einfluss der Gesteinstemperatur

Der Einfluss der Gesteinstemperatur ist weitaus bedeutender als die Temperatur des Zementes (siehe. Absatz d in diesem Kapitel). Daher ist auf jeden Fall anzuraten, das Gestein – wo und wie auch immer – kalt zu halten oder sogar zu kühlen. Letzteres kann beispielsweise durch Verdunstungskühlung (z. B. Besprühen mit Wasser) erfolgen. Eine Beschattung des Gesteins ist auf jeden Fall (zusätzlich) hilfreich, sofern der Betriebsablauf nicht gestört wird.

Bei der Gesteinstemperatur müssen wir zwischen trockenem und nassem Gestein unterscheiden (vgl. Bild 5). Um das Ergebnis vorwegzunehmen: Es wäre aus kältetechnischer Sicht wegen der geringeren Kühlleistung und den damit verbundenen geringeren Anschaffungs- und Betriebskosten besser, das Gestein trocken vorliegen zu haben, was in der österreichischen Praxis jedoch kaum vorkommen wird. Trockenes Gestein kann man allenfalls in heißen und trockenen Ländern (Wüstengebiete) voraussetzen.

In Bild 8 sind die benötigten Kühlmedien für trockenes Gestein grafisch dargestellt. Basierend auf dem Ausgangsfall (Tafel 1) wird die Gesteinstemperatur variiert. Man kann in Bild 8 auch erkennen, dass bis 25 °C Gesteinstemperatur eine Wasserkühlung (theoretisch) ausreichen würde, wenn man Eiswasser mit 0 °C einsetzen könnte.

Tafel 1: Ausgangsfall bevor Kühlung notwendig wird

Gesteinstemperatur	20	°C
Gesteinsmasse (trocken)	1.910	kg/m ³
Zement-Temperatur	85	°C
Zementmasse	300	kg/m ³
Grundwassertemperatur	12,8	°C
gesamte Wassermenge	190	l/m ³
Betonmasse	2.400	kg
Betonvolumen (verdichtet)	1,0	m ³
Frischbetontemperatur	27,0	°C

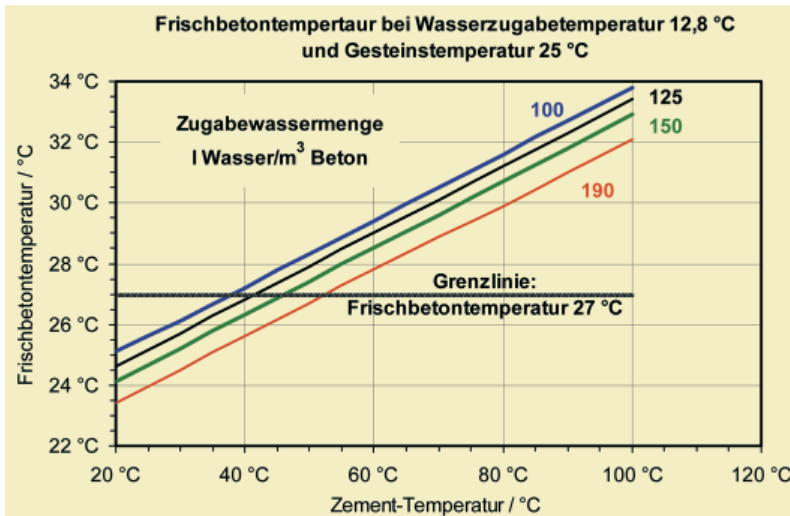


Bild 6: Frischbetontemperatur ohne Kühlung bei Variation der Zement-Temperatur und der Zugabewassermenge bei 12,8 °C Wassertemperatur (Gesteinstemperatur 25 °C)

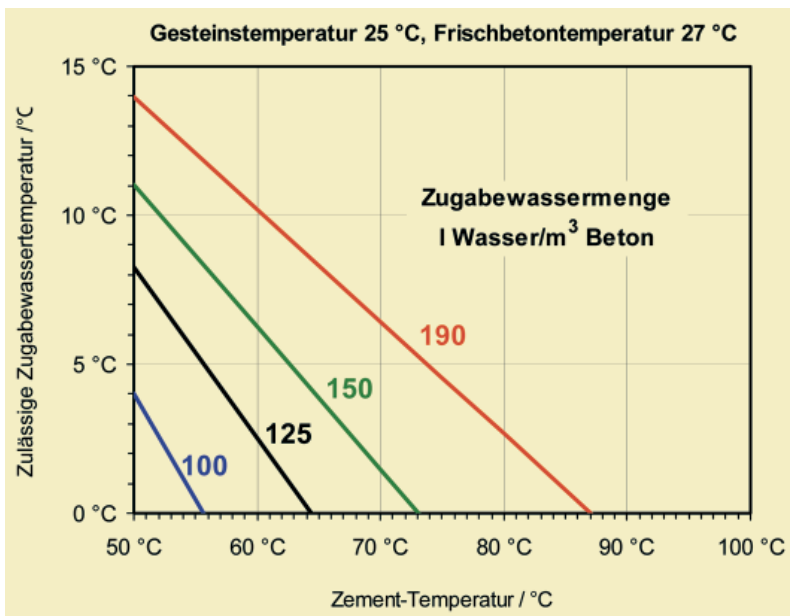


Bild 7: Einfluss der Zement-Temperatur auf die zulässige Wassertemperatur bei einer Frischbetontemperatur von 27 °C und variablen Zugabewassermengen (Gestein 25 °C)

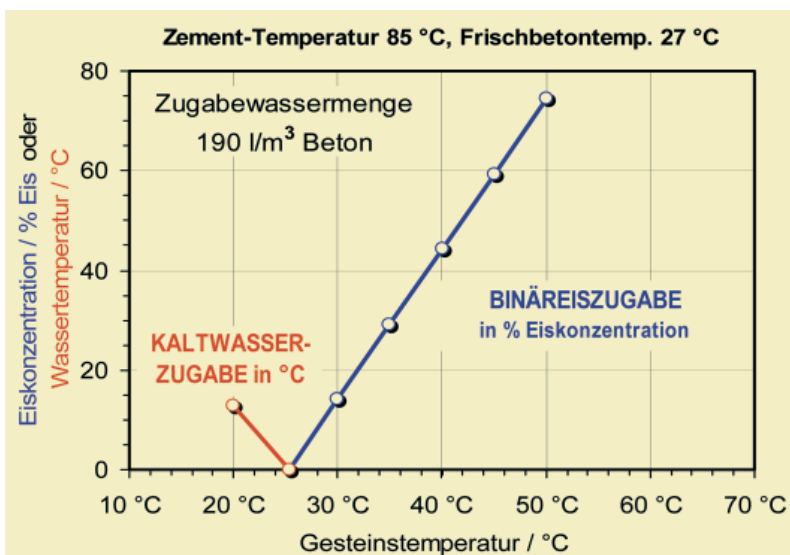


Bild 8: Erforderliche Wassertemperatur (linke rote Linie) und benötigte Binäreiskonzentration (rechte blaue Linie) bei 190 l Wasserzugabe als Funktion der Gesteinstemperatur bei 85 °C Zement-Temperatur (Basis: Ausgangsfall, vgl. Tafel 1)

Tafel 2: Benötigte Eiskonzentration und Eiskristallmasse bei trockenem und nassem Gestein zur Aufrechterhaltung von 27 °C Frischbetontemperatur (farblich hervorgehobenes Feld: siehe Kapitel 3 als gewähltes Beispiel)

Wasserzugabe	Zuschlagstoffe bei 85 °C Zement-Temp.	Wasserzugabe in Form von						
		Kaltwasser	0 °C Eiswasser	Binäreis: Angegeben ist die Eiskonzentration in „% Eis“				
190 l/m ³	Gesteinstemp.	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C
	Zugabe	13 °C	0 °C	14 %	29 %	44 %	59 %	75 %
	Eiskristallmasse	-	-	27 kg	55 kg	84 kg	113 kg	142 kg
150 l/m ³	Gesteinstemp.	20 °C	23 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	
	Zugabe	11 °C	0 °C	28 %	49 %	70 %	90 %	
	Eiskristallmasse	-	-	42 kg	73 kg	104 kg	135 kg	
125 l/m ³	Gesteinstemp.	20 °C	22 °C	30 °C	35 °C	40 °C		
	Zugabe	9 °C	0 °C	41 %	67 %	94 %		
	Eiskristallmasse	-	-	51 kg	84 kg	117 kg		
100 l/m ³	Gesteinstemp.	20 °C	21 °C	30 °C	35 °C			
	Zugabe	6 °C	0 °C	61 %	95 %			
	Eiskristallmasse	-	-	61 kg	95 kg			

Darüber hinausgehende Gesteinstemperaturen erfordern Binäreis und schließlich Binärschnee. In Bild 8 ist dargestellt, wie hoch die Eiskonzentration bei Zugabe von 190 kg Wasser zu sein hat, um 27 °C Frischbetontemperatur sicherzustellen.

Als Binäreis wird das pumpfähige „flüssige“ Eis bezeichnet, welches eine Eiskonzentration von max. 55 % aufweist. Darüber hinausgehende Eiskonzentrationen sind entweder weniger oder gar nicht mehr pumpbar, dafür aber ggf. pneumatisch förderbar (vgl. Bild 16). Ab ca. 75 % Eiskonzentration erhalten wir Binärschnee, zuerst als „nassen Schnee“, ab ca. 85 % als immer mehr „trockenen Schnee“.

Wenden wir uns nun dem **nassem Gestein** zu. Wiederum wird der Ausgangsfall (Tafel 1) herangezogen. Variiert wird dieses Mal die zugeführte Wassermenge, die um so niedriger ist, je nasser das Gestein ist. Gleichzeitig wird die realistische Annahme getroffen, dass die Temperatur des anhaftenden Wassers beim nassen Gestein dieselbe Temperatur wie jene des Gesteins aufweist. Damit verringert sich die Masse des kühlfähigen Zugabewassers bzw. des Binäreises oder Binärschnees, weshalb auch die benötigte Eiskonzentration ansteigt. In Tafel 2 und in Bild 9 sind die Verhältnisse für trockenes Gestein (190 l/m³) und nasses Gestein (100-150 l/m³) als Parameter dargestellt.

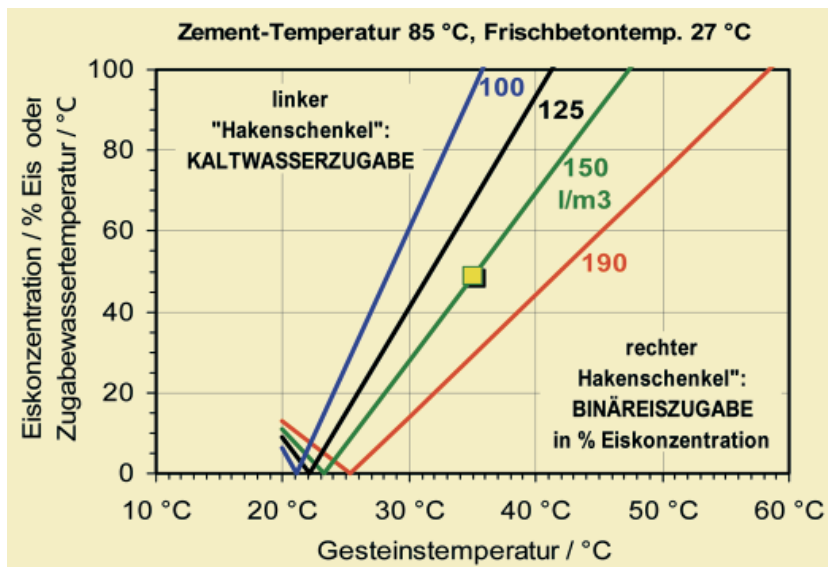


Bild 9: Benötigte Wassertemperatur bzw. Eiskonzentration als Funktion der Gesteinstemperatur und der Zugabewassermenge bei trockenem (190 l/m³) und bei nassem Gestein (100-150 l/m³) (rechteckiger Punkt bei 150 l/m³ Beton: siehe Kapitel 3 als gewähltes Beispiel)

Der Zusammenhang zwischen Eiskonzentration und Eiskristallmasse ergibt sich aus der Forderung, dass Eiskristalle nur in der zugeführten „Zugabewassermenge“ in Form von Binäreis oder Binärschnee enthalten sein können.

c) Benötigte Eismenge

Sobald die Kühlung mit Binäreis bzw. Binärschnee notwendig wird, ist damit auch die Masse des flüssigen Eises bzw. Schnees gemäß den Erfordernissen der Betonherstellung festgelegt (trockenes Gestein: 190 kg/m³;

nasses Gestein 100-150 kg/m³). Es wird nur die Eiskristallmasse im Fluid variiert. Diese ist in Bild 10 grafisch dargestellt.

Wie man schon in Tafel 2 feststellen kann, liegt die Obergrenze bei 100 % Eiskristallmasse (festes Eis). Dies bedeutet, dass bei nassem Gestein bei 40 °C Gesteinstemperatur (100 l/m³) bzw. 47 °C Gesteinstemperatur (150 l/m³) „Schluss ist“. Trockenes Gestein kann laut Tafel 2 hingegen bei 58 °C warm sein.

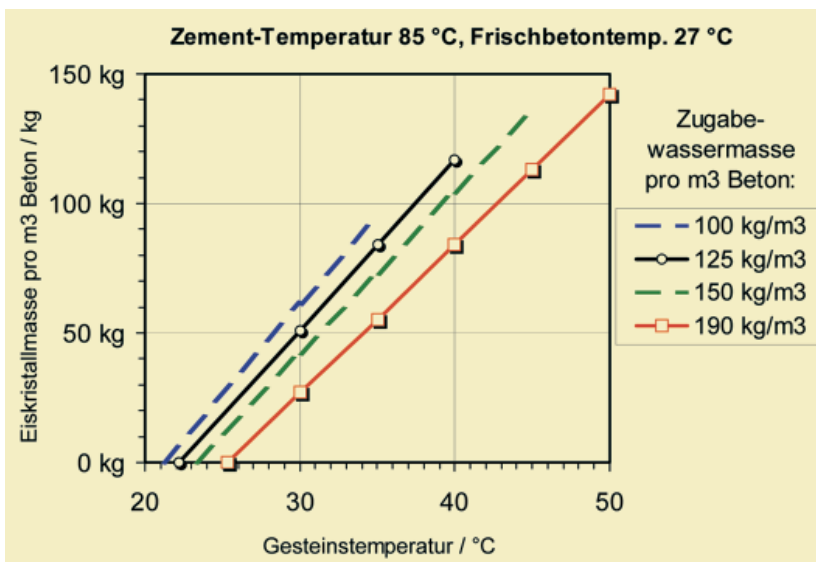


Bild 10 (vgl. Tafel 2): Benötigte Eiskristallmasse bei trockenem (190 l/m³) und nassem Gestein (100-150 kg/m³) als Funktion der Wassermenge und der Gesteinstemperatur

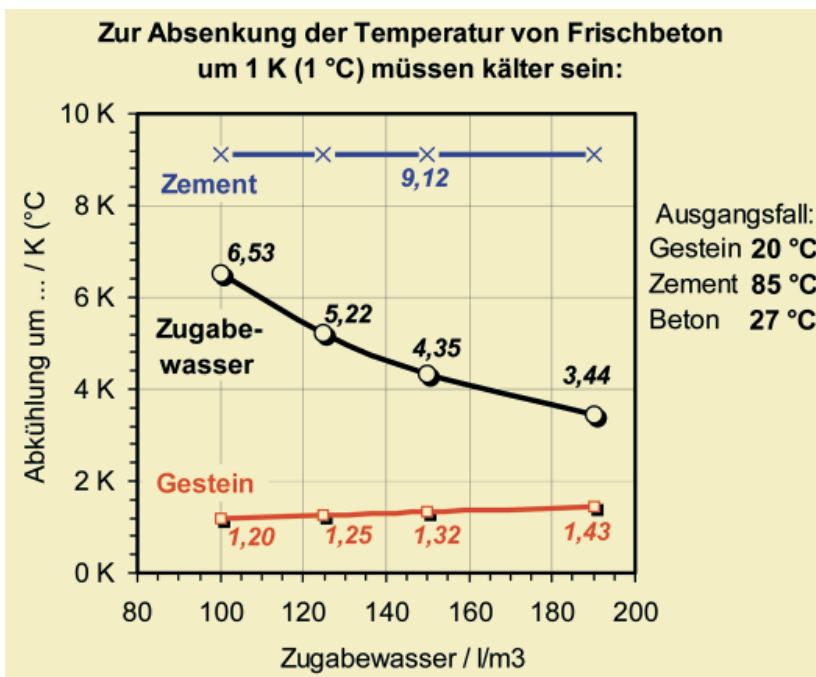


Bild 11: Abkühlung der Betonbestandteile (jeder Bestandteil getrennt für sich), um die Frischbetontemperatur bei der Herstellung um 1 K (1 °C) abzusenkten

d) Quantifizierung des Einflusses der Temperaturen von Zement, Gestein und Wasser auf die Betontemperatur

Es gibt in der Betonindustrie „Faustzahlen“, die aussagen, um wieviel K (°C) die Betonbestandteile Wasser, Zement oder Gestein abgekühlt werden müssen, um den Frischbeton um 1 K (1 °C) kälter herzustellen. Diese lauten [1]:

Um Frischbeton um 1 K (1 °C) kälter herzustellen, muss nach den Faustzahlen

- Wasser um 4 K (4 °C) kälter sein oder
- Gestein um 2 K (2 °C) kälter sein oder
- Zement um 10 K (10 °C) kälter sein.

Bild 11 zeigt die genauen Werte als Funktion der Gesteinsnässe bzw. der Zugabewassermenge bei trockenem (190 l/m³) und bei nassem Gestein (100-150 l/m³).

Wie in den vorherigen Betrachtungen bereits festgestellt werden konnte, ist Gesteinsnässe aus kältetechnischer Sicht unerwünscht. Eine immer kleiner werdende Zugabewassermenge erfordert eine immer stärkere Abkühlung des Wassers und damit den frühzeitigeren Einsatz von Binäreis.

Die Zement-Temperatur reagiert überhaupt nicht auf die Gesteinsnässe. Die „Mischung“ aus Gestein, am Gestein anhaftendem Wasser und dem Zugabewasser konditioniert diese Bestandteile derart vor, dass der Einfluss der Zement-Temperatur konstant bleibt.

3 Benötigte Binäreis- und Schneemaschinen sowie anfallende Kosten

Die große Frage ist nun: Wie groß müssen die Binäreismaschinen sein und wieviel Energie wird benötigt? Die noch größere Frage nach dem Anschaffungspreis und den Jahresgesamtkosten bzw. die Beton-Mehrkosten kann vom Autor nicht abschließend beantwortet werden, da die örtlichen Voraussetzungen, die Ausführung sowie die Aufstellungsbedingungen derzeit (noch) nicht bekannt sind.

Die Frage nach den Kosten kann daher erst dann im Detail beantwortet werden, wenn die Schnittstellen und die Einzelheiten des Betriebs bekannt sind (Kontakt am Ende der Ausarbei-

tung). Dennoch wird angestrebt, nachfolgend eine Größenordnung aufzuzeigen.

Es wurde versucht, aus den gemachten Angaben zur Betonindustrie in Österreich [1] eine Auswertung zu erstellen. Diese ist in Tafel 3 und 4 zusammengefasst. Dabei wurden nur sogenannte „heiße“ Tage herangezogen, die mit 80 bzw. 100 Tagen/Jahr angesetzt wurden (der Autobahnbau ist etwas länger kalkuliert als Betonwerke).

Als erstes Beispiel wurde ein „mittlerer“ Fall angenommen, welcher in Tafel 2 durch ein farblich hervorgehobenes Feld gekennzeichnet ist. Es handelt sich dabei um die folgende Situation:

gewünschte	
Frischbetontemperatur	27 °C
Gesteinstemperatur	35 °C
Wasserzugabe	
(da „nasses Gestein“)	150 kg/m ³
somit am Gestein	
anhaftendes Wasser	40 kg
mit einer Temperatur von	35 °C
Kaltwassertemperatur	11 °C
Zement-Temperatur	85 °C
benötigte	
Binäreiskonzentration	49 % Eis
im Binäreis enthaltene	
Eiskristallmasse	73 kg Eis
	(in 150 kg
	Gesamtmasse)

Zur Überraschung des Autors sind die Binäreismaschinen sowie deren Energiebedarf relativ klein, wenn man die Betontonnagen betrachtet. Die Kälteleistungsspanne bei niedrigeren oder höheren Gesteinstemperaturen liegt im Bereich -75 % und +300 %, d. h. die Spanne ist ziemlich groß (vgl. Tafel 2, „Eiskristallmassen“).

Das gewählte Beispiel mit nassem Gestein (150 l/m³), 35 °C Gesteinstemperatur und 85 °C Zement-Temperatur bei einer Frischbetontemperatur von 27 °C dürfte aber österreichische Verhältnisse gut treffen. Man muss berücksichtigen, dass nasses Gestein bei hoher Temperatur durch Verdunstung des anhaftenden Wassers teilweise abtrocknet, wobei die Verdunstung die Temperatur und die anhaftende Wassermenge und somit die Kälteleistung drastisch reduziert.

Als zweites Beispiel wurde – für sonst unveränderte Bedingungen – eine Frischbetontempe-

ratur von 22 °C angenommen. Es handelt sich dabei um die folgende Situation:

gewünschte Frischbetontemperatur	22 °C
Gesteinstemperatur	35 °C
Wasserzugabe (da „nasses Gestein“)	150 kg/m ³
somit am Gestein anhaftendes Wasser	40 kg
mit einer Temperatur von	35 °C
Kaltwassertemperatur	11 °C
Zement-Temperatur	85 °C

benötigte Binäreiskonzentration im Binäreis enthaltene Eiskristallmasse	76 % Eis 114 kg Eis (in 150 kg Gesamtmasse)
--	---

Der zusätzliche Kühlaufwand für eine Frischbetontemperatur von 22 °C verglichen mit einer Frischbetontemperatur von 27 °C (Basisfall) beträgt ca. 40 %. Wie man in den Tafeln 5 und 6 erkennen wird, wirkt sich der Kälte-Mehrbedarf in ca. 30 % höheren Einheitspreisen aus.

Tafel 3: Abschätzung der Kälteleistung und des Energiebedarfs für verschiedene Bereiche der Frischbetonkühlung und einer Frischbetontemperatur von 27 °C

TRANSPORTBETON ÖSTERREICH Frischbetontemperatur 27 °C		Betonkühlung für ...			
		Autobahnbau	Betonwerke		Österreich gesamt
		ländlich	Stadt		
typische Produktion	Einheit	3.000 m³/d	30.000 m³/a	50.000 m³/a	11.000.000 m³/a
Volllast-Produktionstage, davon „heiße“ Tag	d/a d/a	– 100	250 80	250 80	250 80
Volllast-Tagesproduktion	m ³ /d	3.000	120	200	44.000
Eiskristallmenge	to/d	219	9	15	3.212
tägliche Kältearbeit	kWh/d	28.000	1.130	1.190	415.000
tägliche Betriebsdauer der Binäreismaschinen	h/d	20	20	20	20
installierte Kälteleistung der Binäreismaschinen	kW	1.400	60	100	20.000
Elektroenergiebedarf der Binäreismaschinen	kWel	570	25	40	8.300
Jahresstrombedarf für die Binäreiskühlung	MWhel/a	1.150	35	60	13.000

Tafel 4: Abschätzung der Kälteleistung und des Energiebedarfs für verschiedene Bereiche der Frischbetonkühlung und einer Frischbetontemperatur von 22 °C

TRANSPORTBETON ÖSTERREICH Frischbetontemperatur 22 °C		Betonkühlung für ...			
		Autobahnbau	Betonwerke		Österreich gesamt
		ländlich	Stadt		
typische Produktion	Einheit	3.000 m³/d	30.000 m³/a	50.000 m³/a	11.000.000 m³/a
Volllast-Produktionstage, davon „heiße“ Tag	d/a d/a	– 100	250 80	250 80	250 80
Volllast-Tagesproduktion	m ³ /d	3.000	120	200	44.000
Eiskristallmenge	to/d	342	14	23	5.016
tägliche Kältearbeit	kWh/d	40.000	1.600	2.650	580.000
tägliche Betriebsdauer der Binäreismaschinen	h/d	20	20	20	20
installierte Kälteleistung der Binäreismaschinen	kW	2.000	80	135	29.000
Elektroenergiebedarf der Binäreismaschinen	kWel	790	32	55	11.600
Jahresstrombedarf für die Binäreiskühlung	MWhel/a	1.600	50	85	19.000

Kostenabschätzung

Diese Kostenabschätzung ist dafür gedacht, eine Größenordnung aufzuzeigen. Die Ansätze sind a) pessimistisch, b) „komplett“ und c) mit Annahmen versehen, die noch nicht verifiziert werden konnten. Die Schwankungsbreite hängt davon ab, ob das gewählte Beispiel zutreffend, die Jahresbetriebsdauer korrekt angesetzt ist, und ob der Strom- und Leistungspreis sowie

die Abschreibung (10 Jahre, 10 % Zins) zutreffen, usw. Der Autor bittet daher, das Ergebnis in Tafel 5 für eine Frischbetontemperatur von 27 °C und die Ergebnisse für eine Frischbetontemperatur von 22 °C (Tafel 6) als „qualifiziert indikativ“ anzusehen.

Die Bilder 12-16 zeigen typische Binäreismaschinen im Leistungsbereich für die o. a. Produktionsverhältnisse „Autobahnbau“ und „Betonwerke“.

Tafel 5: Investitions- und Jahresgesamtkostenabschätzung für 27 °C Frischbetontemperatur

Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für die Betonkühlung		Autobahnbau	ländliches Betonwerk	städtisches Betonwerk
typische Produktion		3.000 m ³ /d	30.000 m ³ /a	50.000 m ³ /a
1. LEISTUNGSDATEN				
jährliche Volllast-Produktionstage	d/a	160	250	250
jährl. Betonproduktion	m ³ /a	480.000	30.000	50.000
tägl. Betonproduktion	m ³ /d	3.000	120	200
tägl. Eiskristallmasse	to/d	220	9	15
„heiße“ Volllastproduktionstage	d/a	100	80	80
Betonmenge an heißen Tagen	m ³	300.000	9.600	16.000
install. Kälteleistung	kW	1.400	55	95
Strombedarf	kWh/a	570	25	40
Jahresstrombedarf	MWh/a	1.140	40	64
2. INVESTITIONSKOSTEN				
Investitionskosten	EURO	2.000.000	100.000	155.000
örtliche Vorarbeiten	EURO	150.000	15.000	20.000
Stromversorgung	EURO	100.000	0	0
gesamte Investition	EURO	2.250.000	115.000	175.000
3. ABSCHREIBUNGEN				
jährl. Abschreibung *)	EURO/a	365.000	19.000	28.000
4. BETRIEBSKOSTEN				
Wartung (ca. 5 % p. a.)	EURO/a	110.000	5.500	8.750
Stromkosten (0,15 €/kWh)	EURO/a	171.000	6.000	9.600
Leistungspreis (20 €/kW/m)	EURO/a	57.000	2.500	4.000
Gesamte Betriebskosten	EURO/a	338.000	14.000	22.350
5. JAHRESGESAMTKOSTEN				
Jahresgesamtkosten (Nr. 3 + 4)	EURO/a	703.000	33.000	50.350
6. MEHRKOSTEN DES BETONS				
nur für Beton an „heißen“ Tagen	EURO/m ³	2,34	3,44	3,15
bez. auf die Jahresproduktion	EURO/m ³	1,46	1,10	1,01

Tafel 6: Investitions- und Jahresgesamtkostenabschätzung für 22 °C Frischbetontemperatur

INVESTITIONSKOSTEN		Autobahnbau	ländliches Betonwerk	städtisches Betonwerk
Investitionskosten	EURO	2.600.000	130.000	200.000
örtliche Vorarbeiten	EURO	160.000	18.000	22.000
Stromversorgung	EURO	120.000	0	0
gesamte Investition	EURO	2.880.000	148.000	222.000
JAHRESGESAMTKOSTEN				
Jahresgesamtkosten (Nr. 3 + 4)	EURO/a	929.000	42.200	62.250
MEHRKOSTEN DES BETONS				
nur für Beton an „heißen“ Tagen	EURO/m ³	3,10	4,40	4,08
bez. auf die Jahresproduktion	EURO/m ³	1,94	1,41	1,31



*Bild 12: Mittelgroße Binäreismaschine
(z. B. 8 Stück für den Autobahnbau
mit 3.000 m³/d)*



*Bild 13: Kleine Binäreis-
maschine (z. B. für ein
„ländliches“ Betonwerk mit
30.000 m³/a)*



*Bild 14: Kleine Binäreismaschine
(z. B. für ein „städtisches“ Betonwerk mit
50.000 m³/a)*

*Bild 15: Binärschnee erzeugt aus Binäreis
am Austritt des Schnee-Erzeugers.*





Bild 16: Verblasen von Binärschnee (pneumatische Förderung) in einem Pinguin-Gehege

4 Ausblick

Binäreis und Binärschnee eignen sich sehr gut zur Betonkühlung. Die benötigten Eis- bzw. Schneemaschinen sind überraschend klein. Wichtig ist die Regelung der benötigten Eis- bzw. Schneemenge sowie deren Konzentration, damit Kühlung und Wassermenge zusammenpassen! Es gibt zwar bereits Messgeräte, welche die Eiskonzentration im laufenden Betrieb messen können, unerforscht ist allerdings die zugehörige Regelung, für die es noch Entwicklungsbedarf gibt. Diese Aufgabe ist durch Entwicklungsarbeit lösbar. Hinsichtlich des Additives muss eine geeignete Substanz ausgesucht werden, welche die Normen und Anforderungen

der Industrie sowie deren Kunden erfüllen. Damit wären zwei Felder definiert, die einer Lösung zugeführt werden müssen.

Referenzen

[1] Huber F.: Persönliche Mitteilungen (2005)

Luftbild der Technischen Universität Dänemark mit Blick über den Öresund nach Schweden (Kälteinstitut im gelben Kreis)

