



Dipl.-Ing. Karl HARTL

Staatlich befugter und beeideter Zivilingenieur für Bauwesen

Statische Berechnung + Konstruktive Planung

A-4030 Linz, Dallingerstraße 25

Tel 0732/ 372 372

Mobil 0699/17372372

www.hartl-statik.at

email: hartl.statik@aon.at

BERECHNUNG UND KONSTRUKTION VON MASCHINENFUNDAMENTEN IM HINBLICK AUF DIE EINHALTUNG KLEINSTER VERFORMUNGSGRENZEN

Linz, 10.11.2015

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgaben- und Problemstellung.....	2
2. Was ist zu konstruieren	3
2.1. Unterschied Hochbaufundament - Maschinenfundament	3
2.2. Planungs- und Herstellungsteam	3
3. Grundlagenermittlungen:	4
3.1. Art des Bauteiles:	4
3.2. Werkstoff: Maschinenbau - Betonbau	4
3.3. Herausfinden der Verformungsgrenzen.....	4
3.4. Schwingungssituation.....	4
3.5. Weitere Anforderungen	4
3.6. Baugrunderkundung	5
3.6.1. Verformungen	5
3.6.2. Übertragung von Schwingungen.	6
3.6.3. Allgemeinen.....	6
4. Berechnung der Fundamentkonstruktion	7
4.1. Verbessertes Untergrund:	7
4.2. Wanne:.....	8
4.2.1. Die Wannenzwände	8
4.2.2. Die Wannenzwischenplatte.....	8
4.3 Schwingungslagerung.....	9
4.4 Inneres Fundament	11
4.4.1 Berechnung des inneren Fundamentes	11
4.4.2 Risse freie Betonherstellung	12

1. Aufgaben- und Problemstellung

Der Statiker bekommt die Aufgabe ein Fundament für die Aufstellung einer Maschine zu konstruieren. Die Belastungsangaben kommen vom Maschinenbauer. Diese sind zunächst im Wesentlichen die Lotlast der Maschine und die Nutzlasten aus den Werkstücken.

Die Aufgabe erscheint relativ einfach. Man macht man einen ersten Überschlag und stellt fest, dass die Belastung auf die Baugrubensohle nicht viel größer sind, als die ursprüngliche Belastung durch den Boden im Ausgangszustand.

Aber dann kommen die Verformungsanforderungen vom Maschinenaufsteller. Die Verformungen sollen z.B. kleiner gleich 0.020mm sein und die Verdrehungen 0.005mm/m. Das sind ein paar my, also ein paar 1/1000mm!

Allgemein zur Vorstellung wie groß 1my ist:
Eine normale DIN A4 Seite ist 0.1mm dick, also =100my.
1/5 einer DIN A4 Seite sind also 20my.

Diesen Forderungen stehen entgegen:

- Die Ausgabegenauigkeit der normalen EDVprogramme welche im mm Bereich ist, höchstens im 1/10mm Bereich.
- Weiters die Verformungen durch den Baugrund. Die Baugrundeigenschaften sind schwer zu erfassen und haben, im Verhältnis zu den winzigen Verformungswerten, relativ große Schwankungsbreiten. Die Verformungswerte kann man seriöser Weise nur im cm Bereich, besten Falls im mm Bereich berechnen, wobei 1mm=1000my sind.
- Hinzu kommen noch die Schwind- und Kriechverformungen des Betons, deren Verformungen alleine auch wiederum um vielfaches höher sind, als die geforderten Grenzwerte.

Wie soll man das lösen?

2. Was ist zu konstruieren

2.1. Unterschied Hochbaufundament - Maschinenfundament

Hochbaufundament:

Bei einem normalen Fundament nimmt man die Regelbelastungen entsprechend den Normen und die Sonderbelastungen gemeinsam mit dem Bauherrn an. Dann werden die Lasten als Einwirkungen auf das Gebäudemodell gesetzt und über die Fundierung in den Baugrund abgeleitet. Hierbei funktioniert das Fundament nur als Übertragungseinheit der Lasten von oben, nach unten. Planer ist der Statiker und der Ausführende ist die Baufirma.

Maschinenbaufundament:

Beim Maschinenfundament sind die Anforderungen wesentlich komplexer.

Ein Maschinenfundament ist keine herkömmliche Betonkonstruktion mehr, sondern Teil einer Maschine.

Das Ganze ist wie bei einem Bagger, welcher aus einem Ober- und einem Unterwagen besteht. Der Oberwagen ist die Maschine, welche der Maschinenbauer liefert und montiert und der Unterwagen ist das Betonfundament von der Baufirma.

Eine CNC Maschine kann z.B. alleine noch kein Werkstück bearbeiten, da die Werkstückhalterung oder der Verschwabwagen als 2. Maschine am Fundament befestigt ist.

Das Werkstück auf der Halterung soll nun vom Fräskopf auf der gegenüberliegenden Maschine auf z.B. auf 10my genau bearbeitet werden. Die Verbindung der beiden Maschinen ist aber nur der Beton des Fundamentes. Daraus ergeben sich diese hohen Genauigkeitsanforderungen.

2.2. Planungs- und Herstellungsteam

Der Planer ist hier nicht mehr der Statiker alleine, sondern ein ganzes Team, wobei hier der Statiker zusätzlich die Funktion des Teamkoordinators hat.

Das Planungsteam besteht im Minimum aus

- dem Bauherrn,
- dem Statiker,
- dem Maschinenbauer,
- dem Bodengutachter
- dem Dynamiker.

Das ausführende Team aus

- der Bodenerkundungsfirma,
- der Baufirma,
- dem Betonhersteller,
- der Stahlbaufirma,
- dem Elektriker,
- dem Installateur und
- der Beschichtungsfirma.

3. Grundlagenermittlungen:

3.1. Art des Bauteiles:

Man konstruiert einen Maschinenbauteil in Beton.

3.2. Werkstoff: Maschinenbau - Betonbau

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Maschinenbauer und dem Betonbauer sind die verwendeten Werkstoffe.

Der Maschinenbauer verwendet im Metall mit seinen bekannten idealen Eigenschaften.

Es hat eine hohe Festigkeit und im Gebrauchsbereich in jeder Richtung lineare Stoffgesetze.

Der Bauingenieur arbeitet mit Beton und Baugrund.

Dieses Material hat geringere Festigkeiten und nicht lineare Stoffgesetze. Die Eigenschaften sind viel schwieriger zu messen, haben eine größere Schwankungsbreite. Zu den nicht linearen Verformungen kommen noch die plastischen Langzeiteffekte hinzu.

3.3. Herausfinden der Verformungsgrenzen

welche von Seiten des Maschinenbauers einzuhalten sind.

Dies ist eine der ersten Aufgaben des Bauingenieurs.

Das hört sich selbstverständlich und einfach an, ist es aber nicht.

In der Regel ist es jedes mal eine ziemliche organisatorische und mathematische Herausforderung.

Festzulegen sind die maximalen elastischen Verformungen und die maximalen Starrkörperverformungen und diese wieder bezogen nach der Zeitdauer als Kurzeit- und Langzeitverformung.

Es ist genau festzulegen, welche Lasten wie und wo bei den einzelnen Prüfschritten aufgebracht werden und was, mit welchen Geräten, genau gemessen wird.

3.4. Schwingungssituation

Weiters sind Festlegungen bezüglich des Schwingungseintrages und des Schwingungsaustrages aus dem Fundament zu vereinbaren.

(Schwinggeschwindigkeit und der Schwingbeschleunigung, etc.)

3.5. Weitere Anforderungen

Weiters sind alle anderen Rahmenbedingungen wie die Geometrie des Fundamentes, Einbauteile, einzubauende Stahlkonstruktionen, Nachbarbauteile und Nachbarwirkungen usw. abzuklären.

3.6. Baugrunderkundung

Diese besteht aus 2 Teilen.

- 1.) Der Erkundungen zur Berechnung der Tragfähigkeit und Fundamentverformungen und
- 2.) den Erkundungen zur Berechnung der Schwingungsausbreitungen bzw. den Schwingungseintragungen aus der Umgebung in das Fundament.

3.6.1. Verformungen

Für die Verformungsberechnung ist, ein „normales“ Bodengutachten, welches für ein übliches Hochbaufundamente ausreichend ist, nicht ausreichend.

Sondierungen:

Anzahl der Sondierungsaufschlüsse:

Im absoluten Minimum sind 3 Sondierungen erforderlich, da erst 3 Punkte eine Ebene aufspannen. Es sind aber 4 Punkte erforderlich, da man erst hier mögliche Sonderergebnisse oder Ausreißer erkennen kann.

Mögliche Sondierverfahren:

Schwere Rammsonde DPH,
Drucksonde CPT oder
seismische Drucksonde SCPTu.

Kernbohrungen:

Hier ist ebenfalls von mindestens einer Rotationskernbohrung mit der obigen Tiefe auszugehen. Aus den gleichen statistischen Überlegungen sind aber auch hier 2 Bohrungen zur Absicherung erforderlich. Wobei im Verhältnis zu den Gesamtkosten der Maschine und des Fundamentes, die Kosten für die 2. Bohrung, nicht erheblich sind.

Tiefe der erforderlichen Erkundungen:

Diese sind in jedem Fall bis in den relativ unnachgiebigen Untergrund, wie dem Schlier oder Fels, mit 2 bis 3m Einbindetiefe zu führen, damit man nicht Gefahr läuft, dass die Erkundungen beim Antreffen einer harten Zwischenschichte vorzeitig abgebrochen werden. Zunächst kann man von einer Mindestuntersuchungstiefe von der 2-3fachen Fundamentbreite ausgehen. Bei einem üblichen Fundament mit 8-10m Breite sind dies mindestens 20m.

Durchführung der Kernbohrungen:

Rotationskernbohrung mit durchgehender Kerngewinnung und normgemäßer Lagerung der Probeentnahmen. Weiters sind in den Bohrungen alle 2-3m Standard Penetration Tests (SPT) zur Feststellung der Lagerungsdichte und der Ableitung der Korrelation von Scherwellengeschwindigkeiten feststellen. Die Wasserverhältnisse sind zu dokumentieren. Bohrdurchmesser in Lockermassen DN150mm, im Fels 100mm.

Auf Grund der Untersuchungen gibt dann der Bodenfachmann neben den üblichen Bodenkennwerten, die Steifemoduli bei einer Erstbelastung und der wiederholten Belastung des Bodens an.

3.6.2. Übertragung von Schwingungen.

Hier sind auf Grund der Untersuchungen vom Bodengutachter die dynamischen Kennwerte des Bodens, wie der dynamische Emodul und die Wellengeschwindigkeiten des Bodens zu ermitteln.

Diese gelten allerdings nur für den untersuchten Bereich des Fundamentes. Daher muss man in Abstimmung mit der Aufgabenstellung in bestimmten Abständen vom Fundament weitere Bodenaufschlüsse durchführen, um Aussagen über den Eintrag oder die Fortpflanzung von Schwingungen treffen zu können.

3.6.3. Allgemeinen

ist die vertikale Zusatzbelastung auf den Boden durch ein Maschinenfundament nur eine relativ geringe. Für die richtige Berechnung der Verformungen ist aber die Ermittlung der Bodenkennwerte wie der Steifemoduli, der Emoduli, der Querdehnzahlen, das Verhalten bei Wiederbelastung, das Impedanzverhältnis der Bodenschichten und die Eigenfrequenz der Lockergesteinsüberdeckung sehr wichtig.

Die Angabe von kleineren, scheinbar auf der „sicheren Seite liegenden Werten“, Bodenkennwerten, kann bei der Prognoseberechnung für die Verformungsberechnungen zu unwirtschaftlichen Ergebnissen führen.

Bei Schwingungsberechnungen, gibt es auf Grund möglicher Resonanzen keine sichere Seite und die Berechnungsergebnisse können komplett unbrauchbar werden.

4. Berechnung der Fundamentkonstruktion

Nach dem man alle Vorerhebungen und Angaben gesammelt hat, kann man mit der Konstruktion und der Berechnung starten.

Wobei hier immer von einem Präzisionsfundament ausgegangen wird, welches sich in der Regel aus folgenden Haupt-Konstruktionselementen zusammensetzt:

- der Maschine, welche auf dem Inneren Fundamentblock montiert wird
- dem **Inneren Fundamentblock**
- der **Schwingungsdämpfung**
- der **Fundamentwanne**
- dem **verbesserten Untergrund**
- dem steifen Untergrund

Nebenkonstruktionsbauteile wie eine Baugrubensicherung, diverse Sauberkeits- und Zwischenschichten, Dichtbänder, Einbauteile auch aufwändigerer Art, Beschichtungen, etc. sind hier noch nicht aufgezählt.

Man kann nun all diese Hauptbauteile in ein gesamtes EDV Modell eingeben und berechnen oder in mehreren Teilsystemen. Der Unterschied im Ergebnis ist Minimal. Zur leichteren Erklärung der Funktionen der einzelnen Bauteile, wird der Ablauf der an Hand der Berechnung mit Teilsystemen erklärt.

4.1. Verbesserter Untergrund:

Diese Schichte ist unten durch den steifen Untergrund und oben durch die Unterkante der Wannensbodenplatte begrenzt.

Die Steifigkeit der Schichte errechnet sich durch die angegeben Steifemoduli der Baugrunderkundung und den festgestellten Schichtdicken.

Natürliche Böden alleine, auch mit guten Steifemoduli, sind jedoch im Allgemeinen viel zu weich, um die Verformungen in den Griff zu bekommen.

Weiters verändern natürliche Böden durch ständige Schwingungseintragungen aus der auf dem Fundament montierten und arbeitenden Maschine und anderen Einwirkungen ihre Lagerungsdichte und Eigenschaften.

Sie werden quasi nach verdichtet, mit den einhergehenden Verformungen.

Man hätte einen sich ständig und unkontrolliert ändernden Werkstoff.

Bei solchen Fundamenten müssen die Maschinen in kürzeren Zeitabständen nachjustiert werden als bei besser Fundierten.

Das heißt die Zwischenschichte ist durch entsprechende Maßnahmen auf eine höhere und garantierte Steifigkeit zu heben.

Weiters sollen dadurch möglichst gleichförmige und dynamisch stabile Untergrundverhältnisse geschaffen werden.

Diese Maßnahmen können sein:

Eine Bodenverbesserung: durch eine Bodenverdichtung mit oder ohne Eintrag von Fremdmaterial. Ich vermute aber, dass dies nur bei einfachen Anforderungen gelingt und bei Präzisionsfundamenten nicht ausreichend ist.

Bodenvermörtelung: mit DSVsäulen oder Art verwandten Methoden wie z.B. Mixed in Place Verfahren = Zement stabilisierte Bodensäulen.

Pfähle: Großbohrpfahlgruppen oder große Brunnenfundamente.

Es errechnet sich dann eine durchschnittliche Steifigkeit der Bodenschichte, mit Mitwirkung des Bodens zwischen den Verstärkungselementen. Der Boden hat hierbei meist nur mehr einen kleinen Anteil an der Tragwirkung.

4.2 Wanne:

Die Wanne besteht aus der Bodenplatte und den Wänden.

Zunächst erscheint die Wanne für die Verformungsberechnung nicht wesentlich zu sein.

4.2.1. Die Wannenzwände

dienen zur Aufnahme der horizontalen Erddruckkräfte von Außen nach Innen bei der Hinterfüllung der Wände und zur Aufnahme der horizontalen Kräfte durch den Frischbetondruck beim Betonieren des inneren Fundamentblockes, von Innen nach Außen. Diese Beanspruchungen sind für die Fundamentverformung kaum relevant. Weiters dienen die Wände als ebene Fläche zum Befestigen der lotrechten Schwingungsdämpfung.

4.2.2. Die Wannenzwände

dient als Fundament für die Wannenzwände und als Verbindungsplatte zwischen dem verbesserten Untergrund mit seinen Säulenraster und dem inneren Fundamentblock. Weiters als ebener Untergrund zur Aufnahme der horizontalen Schwingungsdämpfung.

Die Dicke der Bodenplatte

sollte mindestens so sein, dass sie die Schnittkräfte durch die Sohldruckspannung des Bodensylomerlagers, im Zustand I, mit einem kleinen Sicherheitsabstand, aufnehmen kann. Ansonst ist diese zu weich und man hat Schwierigkeiten mit der Einhaltung der Verformungen, unabhängig von dem Rechenmehraufwand, welcher dann durch die nicht mehr linearen Berechnungen erforderlich ist.

Die Bettungszahl k in kN/m^3 ,

auf der dann das „Innere Fundament“ in der nächsten Berechnung aufliegt, errechnet sich aus der Verformung von 3 gekoppelten Federn.

Die erste Feder ist der Zusammendrückung der verbesserten Zwischenschichte, die Zweite Feder die Biegesteifigkeit der Wannenzwände, also die mittlere Durchbiegung der mittleren der Wannenzwände. Die dritte Feder ist Zusammendrückung des Sylomerlagers. Die Koppelung der Feder zu einer gemeinsamen Feder ist der Bettungsmodul für die Berechnung des inneren Fundamentes.

Die Berechnung von k ist für jeden Bereich, jeder Änderung der Bodenfeder oder des Sylomerlagers durchzuführen.

4.3 Schwingungslagerung

Die Berechnung der Schwingungslagerung ist ein eigenes umfassendes Thema.

Es sind hier dynamische Berechnungen durchzuführen, damit einerseits möglichst geringe Schwingungen aus dem Fundament ausgetragen und andererseits keine Störschwingungen von außen eingetragen werden. Störschwingungen von außen können Schwingungen von Maschinen aus der Nachbarschaft oder vom Hallenkran oder von Verkehrswegen wie Eisenbahnen oder von Straßen in der Umgebung sein.

Für die Dämpfung der Schwingungen gibt es verschiedene Modelle. Damit man gute Werte erhält, ist meist eine große Fundamentmasse und eine weiche Bettung erforderlich.

Und hier tut sich der erste scheinbare Widerspruch auf.

Wieso macht man auf der einen Seite den Untergrund relativ starr, wenn man als nächsten Schritt wieder eine weiche Schichte auflegt?

Da könnte man doch gleich die teure Untergrundverbesserung sein lassen.

Dies ist nicht ratsam bzw. nicht möglich weil:

1.) Man hätte einen nicht definierten Untergrund, bei welchem man nicht weiß wie er sich in Zukunft durch die Einwirkungen, wie der geänderten Belastung, den eingetragenen Schwingungen, auch wenn diese durch Schwingungslager stark reduziert sind und den sich natürlich änderndem Wassergehalt, verhalten wird.

2.) Die Zusammendrückung der Zwischenschichte ohne Verbesserung um ein Vielfaches höher wäre, als die elastische Zusammendrückung des Sylomerlagers durch die Nutzlasten der Werkstücke.

3.) Die Schwingungsdämpfung dann im Baugrund und in der Umgebung stattfände, wo sie nicht erwünscht ist, anstatt innerhalb der inneren Fundamentkonstruktion.

Zu den Verformungen:

Die extrem kleinen Verformungsgrenzen, gelten meist als Kurzzeitverformungsdifferenz infolge der verschiedenen Nutzlastfälle und für die Bearbeitung eines Werkstückes. Es sind dadurch Langzeitverformungen infolge von Kriechen und Schwinden von untergeordneter Bedeutung.

Zur Dimensionierung der Schwingungsdämpfung:

Allgemein gilt, dass es bei Schwingungen, wie schon erwähnt, keine sichere Seite gibt. Wenn man eine Dämpfungsmatte ohne Berechnung einbaut, kann es auch zur Verschlechterung oder im schlimmsten Fall zu Aufschaukelungen, auch Resonanz genannt, kommen.

Die erforderliche Weichheit der Sylomerschichte, steht nun im Widerspruch zu möglichst geringen Verformungen.

Je weicher die Sylomerschichte, umso dicker muss das Fundament sein ist.
Allerdings braucht ein schweres Fundament wieder eine Matte mit größerer Druckfestigkeit, also eine steifere Bettung. Das ist ein Spannungsfeld von gegensätzlichen Anforderungen.

Allgemein kann man aber feststellen, je schwerer und dicker das Fundament wird, umso leichter kann man Schwingungen und Verformungen beherrschen.

Dieses Bestreben wird aber durch 2 Schranken begrenzt.

1.) Je schwerer das Fundament wird umso, umso teurer und umso unwirtschaftlicher wird es und

2.) Je dicker das Fundament wird, umso schwieriger wird es, es den Beton Risse frei herzustellen.

Es gilt nun ein Optimum zwischen all den gegensätzlichen Anforderungen auf Grund mehrer Rechendurchläufe und Variationen zu finden.

4.4 Inneres Fundament

4.4.1 Berechnung des inneren Fundamentes

Nun sind wir beim eigentlichen Fundament angelangt.

Der Innere Fundamentblock ist im einfachsten Fall eine dicke Platte, welche auf unterschiedlichen elastischen Bettungen aufliegt.

Das EDV Plattenprogramm muss allerdings die Theorie der dicken Platten implementiert haben, damit die Ergebnisse brauchbar sind.

Programme, welche nur mit der Biegesteifigkeit der Platten rechnen sind nicht geeignet.

Am besten sind Programme, welche 3D-Volumskörper berechnen.

Die Berechnung des inneren Fundamentes ist, in erster Linie durch die Geometrie, also den Betonquerschnitten und dem Emodul des Betons bestimmt.

Auf Grund der geforderten kleinen Verformungen sind relativ große Betonquerschnitte erforderlich. Die Zug- und Druckspannungen im Beton durch die äußeren Kräfte des Maschinenoberteiles, sind auch bei scheinbar großen Lastangaben, relativ gering. Die Spannungen bleiben weit innerhalb des Zustandes I.

Man denkt sich, sehr gut, alles Zustand I, keine nicht lineare Berechnung, alles perfekt. Wäre da nicht die Voraussetzung, damit die Berechnungen auch wirklich stimmen, ein rissfreier Beton.

Ein Haarriss genügt und die Verformung ist um ein mehrfaches größer als berechnet.

Die Biegesteifigkeit im Zustand I ist $E \cdot J = E_{\text{modul}} \cdot B \cdot H^3 / 12$.

Bei einem Riss fallen ca. 2/3 des Querschnittes aus. Auch mit Berücksichtigung der Bewehrung fällt die punktuelle Biegesteifigkeit auf ca. 1/5 des ursprünglichen Wertes. Selbst wenn man eine kräftige Bewehrung einlegt und mitrechnet, ändert dies kaum etwas.

Mit erhöhter Bewehrung kann man diesen Fehlbetrag weder technisch, noch wirtschaftlich, ausgleichen. Der Beton alleine muss das Trägheitsmoment garantieren und dazu rissfrei hergestellt werden und bleiben.

Das heißt, bei der Betonherstellung muss man auch Haarrisse an der Oberfläche vermeiden, da diese infolge der dynamischen Beanspruchung und der Kerbwirkung, der Ausgang für spätere Trennrisse durch das innere Fundament sein können. Das Fundament hätte dann ebenfalls wieder erhöhte Verformungen.

Es stellt sich daher das nächste Problem:

Wie stelle ich einen sehr dicken Betonbauteil rissfrei her?

4.4.2 Risse freie Betonherstellung

Hier die üblichen Regeln und Empfehlungen zu befolgen ist gut, aber bei Dicken von 2-3m oder 5m, weitem nicht ausreichend. Alle bisherigen Vorarbeiten und Berechnungen wären hinfällig, wenn es zu Rissen kommt.

Wie entstehen Risse?

Risse entstehen immer dann, wenn die Zugspannungen zum Zeitpunkt i größer sind, als die vorhandenen Zugbruch-Spannungen des Betons zum selben Zeitpunkt i .

Beim Brennen des Zementes wird Wärme eingetragen und chemisch gespeichert. Beim Abbinden des Betons wird diese Wärme wieder frei. Abgegeben wird die Wärme an den Oberflächen des Betonblockes. Daher wird der Betonblock an den Oberflächen eine geringere Temperatur haben, als im Inneren. Es kommt dadurch zu Zugspannungen an der Oberfläche.

Damit man eine Prognoserechnung erstellen kann, wie weit man am Zeitpunkt i , von der Rissgefahr entfernt ist, muss man ausrechnen, wie groß die vorhandene Zugspannung im Beton infolge der Temperaturunterschiede, gegenüber der Betonzugbruch-Spannung, zum Zeitpunkt i , ist.

Dazu benötigt man über den Erhärungszeitraum:
den gemessenen Temperaturverlauf im Fundament,
die Entwicklung der Zug- und Druckmoduli
die Entwicklung der Bruchzug- und Druckspannungen
die Entwicklung des α, t Wertes des Betons.

Kennt man all diese Werte, bzw. deren Entwicklungskurven, so kann man die maximale zulässige Temperaturdifferenz zwischen dem Fundamentinneren und der Fundamentoberfläche berechnen, damit es zu keinem Riss kommt.

Auf Grund dieser Erkenntnisse kann man dann Maßnahmen planen, damit die jeweilige Temperaturdifferenz, zum Zeitpunkt i , innerhalb des zulässigen Bereiches bleibt.

Je geringer diese Differenz, umso kleiner die Rissgefahr.

Um die Differenzen klein zu halten gibt es eine Anzahl von verschiedenen Maßnahmen wie der Betonrezeptur, Zementart, Zusatzstoffe, Wassergehalt, Frischbetoneinbautemperatur, Betoneinbringplan, Wärmedämmung, Heizung, Kühlung, usw.

Diese Technik ist aber wie der Schwingungsberechnung ein eigenes, sehr umfassendes, Thema.

Dipl.-Ing. Karl Hartl