

# **Thermisches Berechnungsmodell zur Durchmesserbestimmung von Düsenstrahlsäulen**

**Dr. Klaus MEINHARD  
Univ.-Prof. Dr. Roman LACKNER  
Univ.-Doz. Dr. Dietmar ADAM**

Technische Universität Wien  
PORR Technobau und Umwelt AG – Abteilung Grundbau



## Durchmesserbestimmung – Stand der Technik

- Herstellen und Freilegen von Probesäulen (ÖN EN 12716)
- Pegelstangen – Erosion
- Schallpegelmessungen – Einsatz von Hydrofonen
- Faltschirmmethode
- Rücklaufanlayse
- Theoretische Ansätze – Energie / Erosion Düsenstrahl



Freigelegte Probesäulen

## Thermochemisches Rechenmodell zur Durchmesserbestimmung von DSV-Säulen

- Begriff "Thermochemisches Rechnungsmodell"
- Theoretische Grundlagen
  - Physikalische Grundlagen
  - Zementhydratation
  - Thermische Eigenschaften (Boden, DSV-Säule)
- Rechnungsmodell
- Benutzeroberfläche
- Anwendungsbeispiele
- Ergebnisse - Anwendungsgrenzen
- Ausblick

# Begriff „Thermochemisches Rechenmodell“

Begriff

Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

## „Thermochemisches“

- **Exotherme Abbindereaktion** zementhaltiger Bindemittel führt zu einem Temperaturanstieg in betonierten Bauteilen (z. B. DSV-Körper)
- Eine Temperaturerhöhung im Bauteil beschleunigt die chemische **Abbindereaktion** (Hydratation)

→ **Thermo-Chemische Kopplung**

## „Rechnungsmodell“

- Temperaturverlauf **gemessen** in der DSV-Säule wird mit
- numerisch **berechneten** Temperaturverläufen verglichen

→ **Berechnungsergebnis:**  
**Säulendurchmesser und Zementgehalt**

Begriff

Grundlagen

Modell

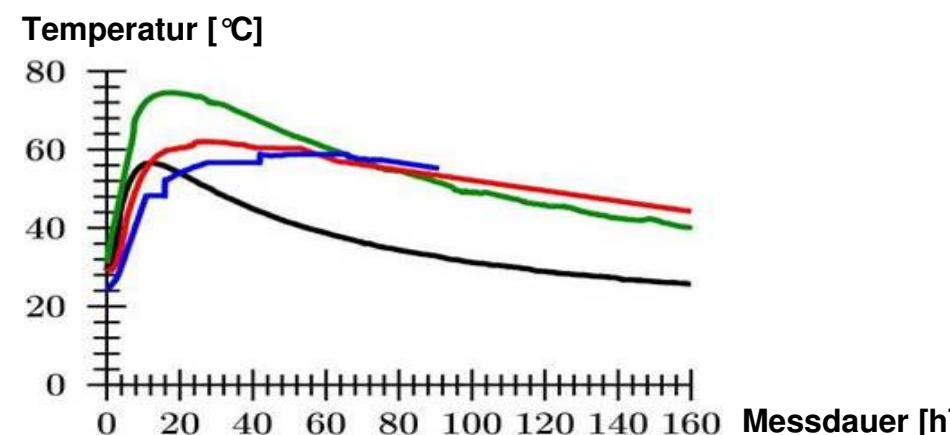
Software

Anwendung

Ergebnisse

## Typischer Temperaturverlauf in DSV-Säulen

- **Erwärmung** unmittelbar nach Herstellung (Zementhydratation)
- Erreichen einer **maximalen Temperatur** in der Säule
- **Abkühlung** nach Erreichen der maximalen Temperatur (Abfließen der Wärme in den anstehenden Boden)



→ Physikalischer Hintergrund

# Theoretische Grundlagen

Begriff

Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

## Typischer Temperaturverlauf in DSV-Säulen

- **Erwärmung** unmittelbar nach Herstellung (Zementhydratation)
- Erreichen einer **maximalen Temperatur** in der Säule
- **Abkühlung** nach Erreichen der maximalen Temperatur (Abfließen der Wärme in den anstehenden Boden)

## Erster Hauptsatz der Wärmelehre

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{l}_\xi \dot{\xi} = -\operatorname{div} \mathbf{q}$$

*Wärmequelle*

*Temperaturänderung*

*Zementhydratation*

*Wärmestromvektor  
"Wärmefluss"*

# Theoretische Grundlagen

Begriff

Grundlagen

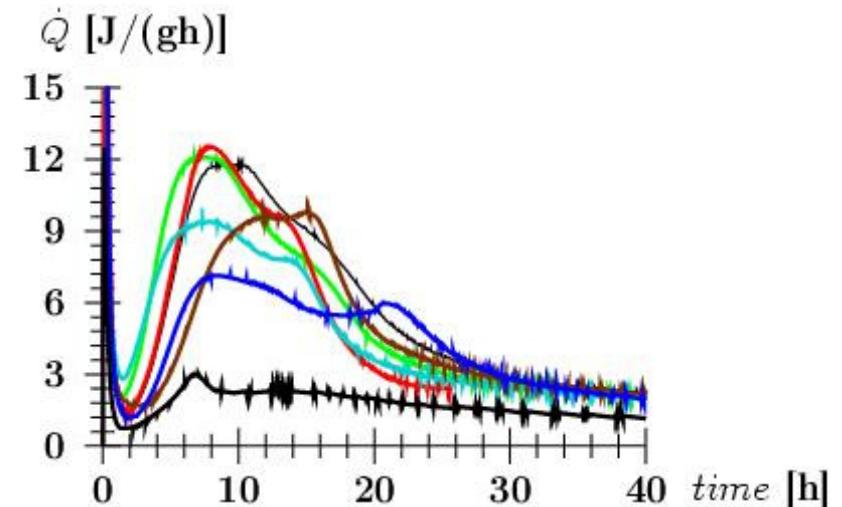
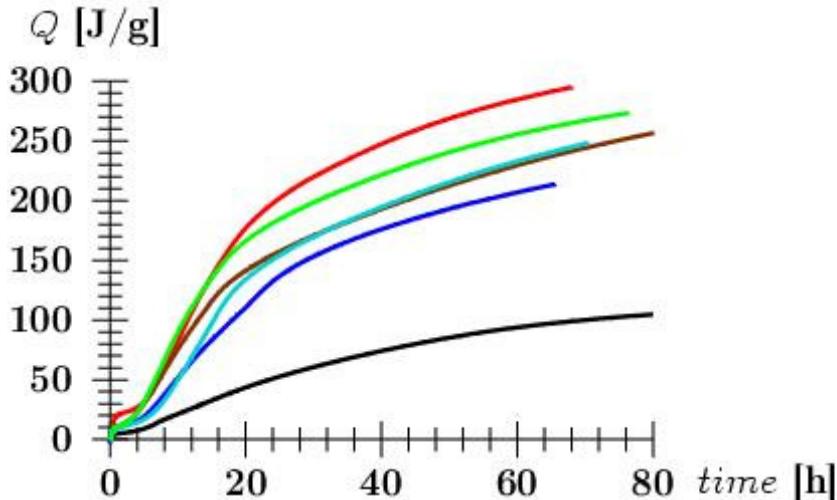
Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

## Wärmequelle - Zementhydratation



Hydratationseigenschaften: zeitliche Entwicklung der während des Abbindevorganges freigesetzten Wärme

- Kalorimeterversuche
- Hydratationsmodelle (Einphasenmodell - Mehrphasenmodell)

Begriff

Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

## Thermische Eigenschaften (Boden, DSV-Säule)

- **Wärmespeicherkapazität  $C_{eff}$  [kJ/(m<sup>3</sup>K)]**

$$C_{eff} = f_p C_p + (1 - f_p - f_a) C_w + f_a C_a$$

p .... Boden-, Zementpartikel

w .... Wasser

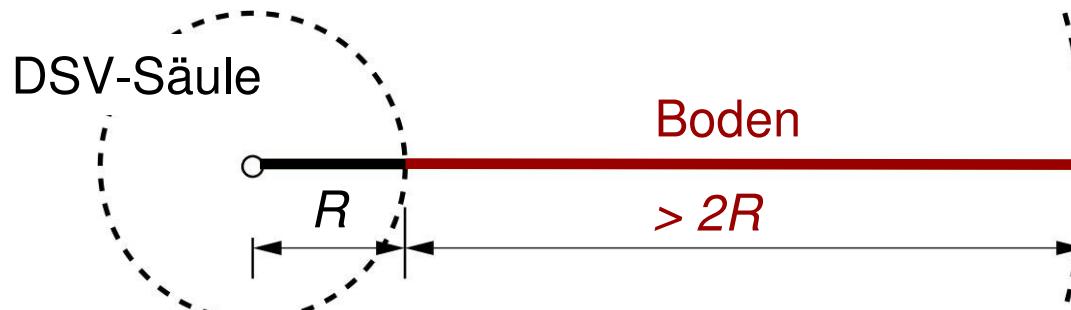
a .... Luftporen

- **Wärmeleitfähigkeit  $k_{eff}$  [kJ/(mhK)] / [W/(mK)]**

- Trockendichte
- Feuchtdichte
- Kornform, Korngrößenverteilung
- Mineralogie

## Methode der Finiten Elemente

### ■ Rotationssymmetrische Berechnung: FE-Netz



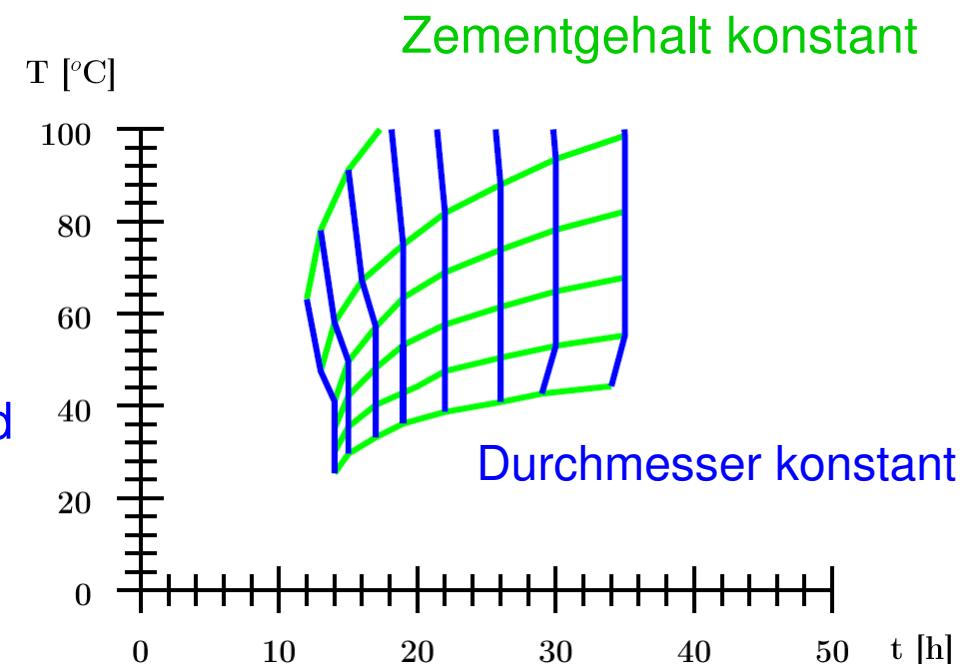
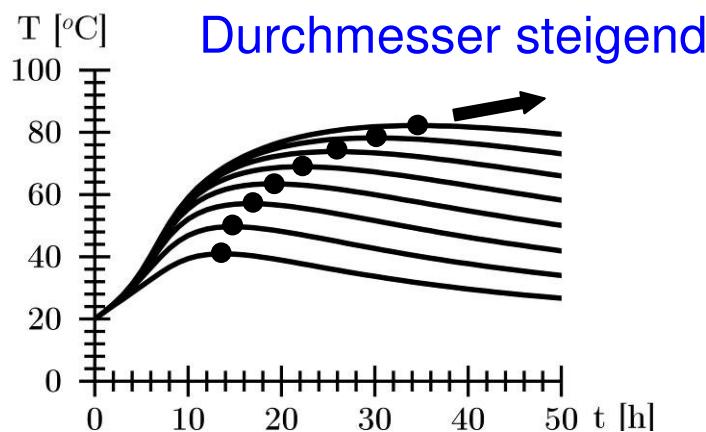
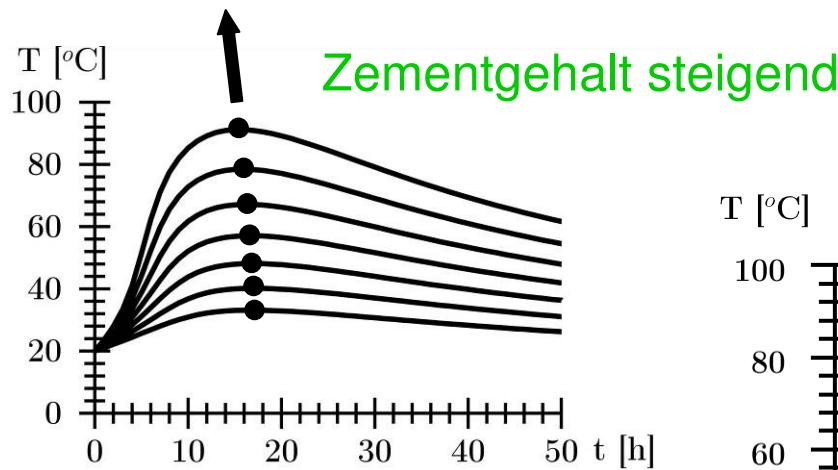
#### Eingabewerte DSV-Körper

- Anfangstemperatur  $T_0$
- Wärmeentwicklung Bindemittel
- Radius  $R$ , Zementgehalt  $s$
- thermische Parameter  $c_{\text{eff}}(s)$ ,  $k_{\text{eff}}(s)$
- Rohdichte  $\rho_{\text{DSV}}$  ( $s$ )

#### Eingabewerte Boden

- Bodentemperatur  $T_B$
- Trockendichte  $\rho_d$
- Rohdichte  $\rho$
- thermische Parameter  $C_{\text{eff}}$ ,  $k_{\text{eff}}$

## Parameterstudie (numerische Berechnung)



## Benutzeroberfläche

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
Software  
Anwendung  
Ergebnisse



# Benutzeroberfläche

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
**Software**  
Anwendung  
Ergebnisse

## Eingabefeld: Messung, Allgemeines

Thermisches Berechnungsmodell zur Reichweitenermittlung von Düsenstrahlsäulen

Neues Testofile importieren      Vorhandenes Testofile importieren

Baustelle

Name:	Südtirolerplatz Objekt 326
Ausführende Firma:	PORR AG, Abteilung Grundbau
Datum:	06.07.2007
Säulennummer:	41

Ausgangstemperaturen der Messung:

Bodentemperatur [°C]:	10
Säulentemperatur zu Beginn der Messung [°C]:	20
Temperatur im Mischer [°C]:	17
Einbaudauer [h]:	1

Herstellungsparameter

DSV - Verfahren:	DUPLEX
Suspensionsdurchfluss [l/min]:	250
Suspensionsdruck [bar]:	400
Rotation [U/min]:	8
Ziehzeit [cm/min]:	15

Säulengeometrie:

DSV - OK [m]	192
Einbautiefe Thermoelement [m]	189
DSV - UK [m]:	185.8

Anmerkung:

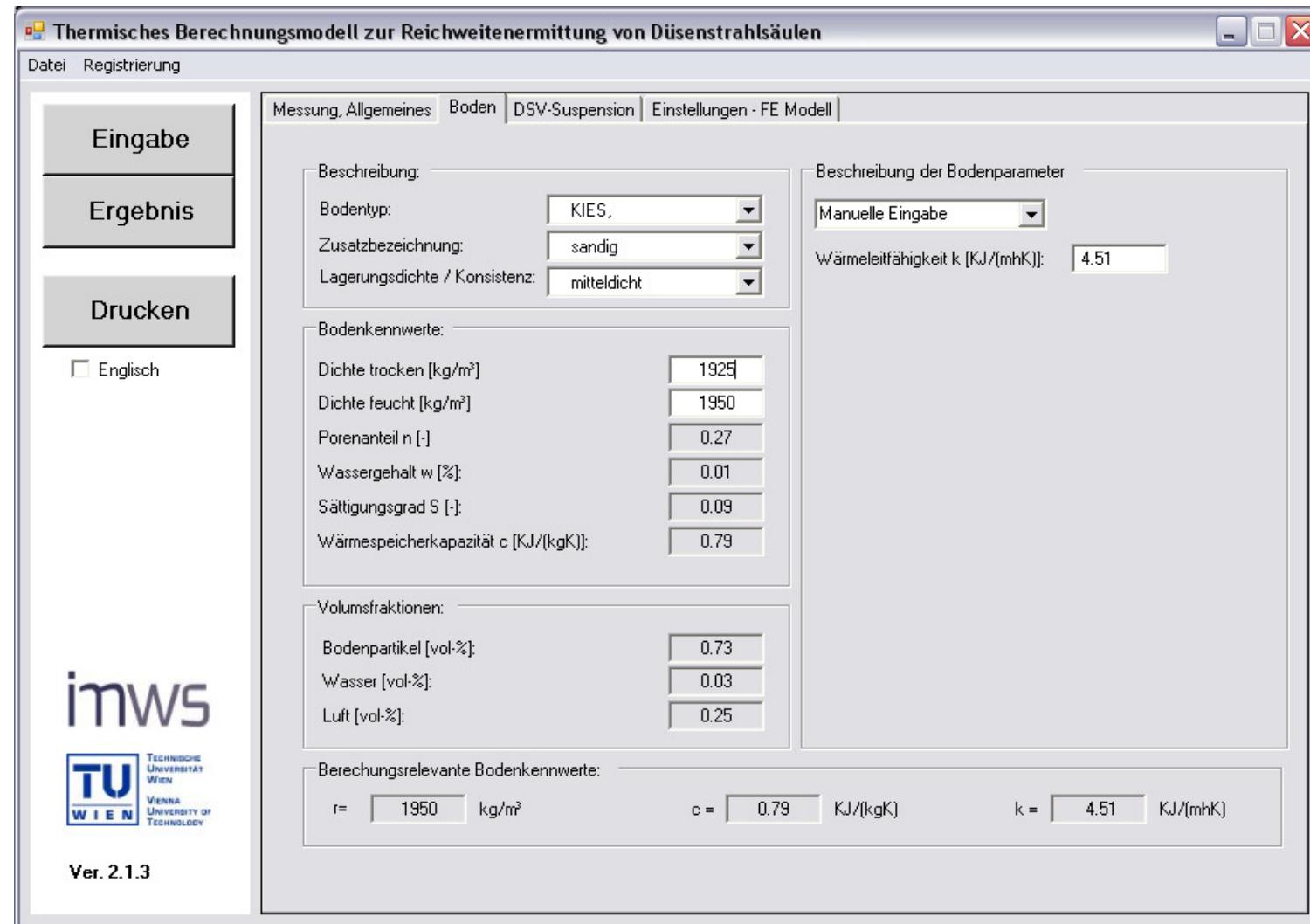
imws  
TU  
WIEN  
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
VIENNA  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY

Ver. 2.1.3

# Benutzeroberfläche

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
**Software**  
Anwendung  
Ergebnisse

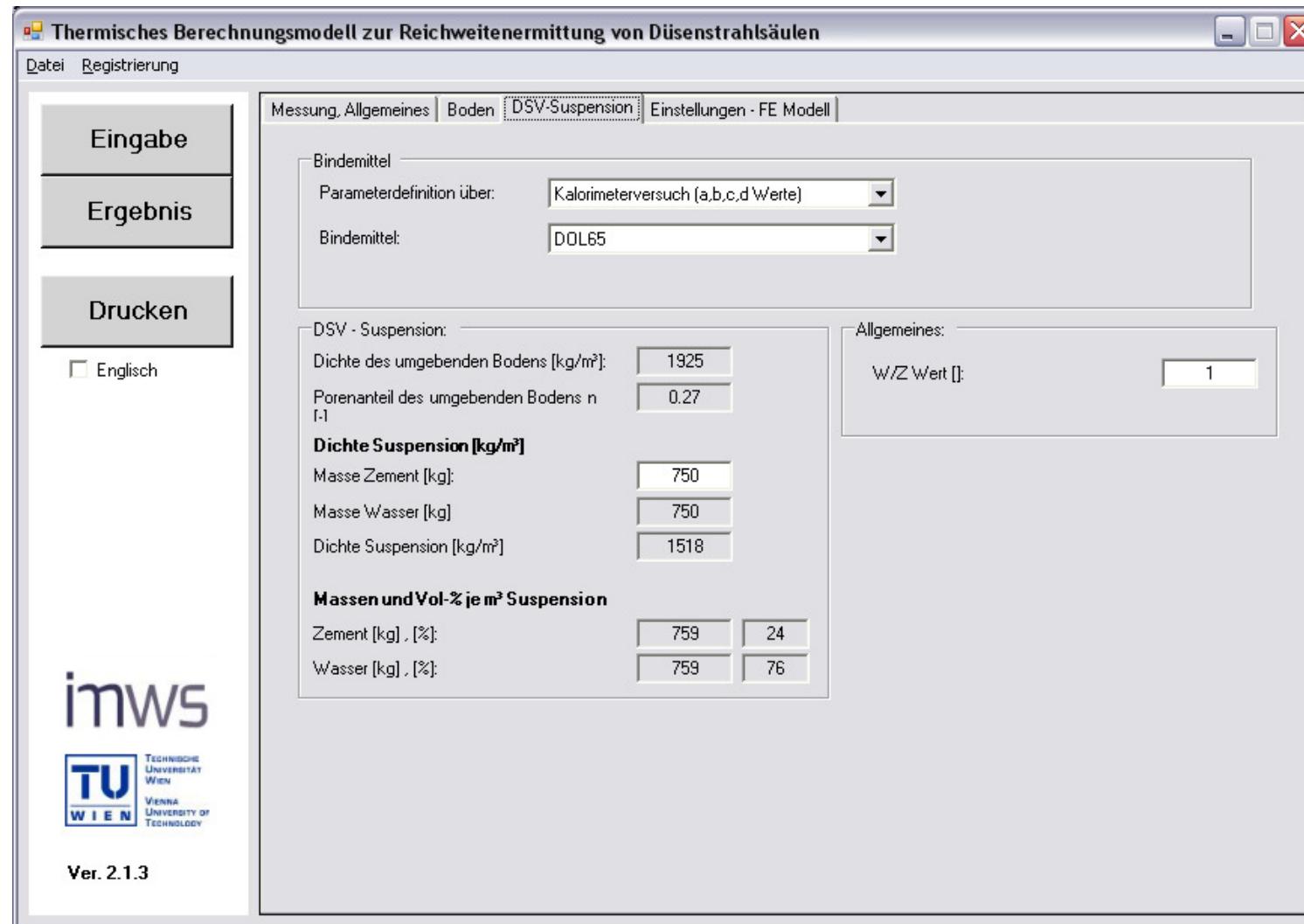
## Eingabefeld: Boden



# Benutzeroberfläche

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
**Software**  
Anwendung  
Ergebnisse

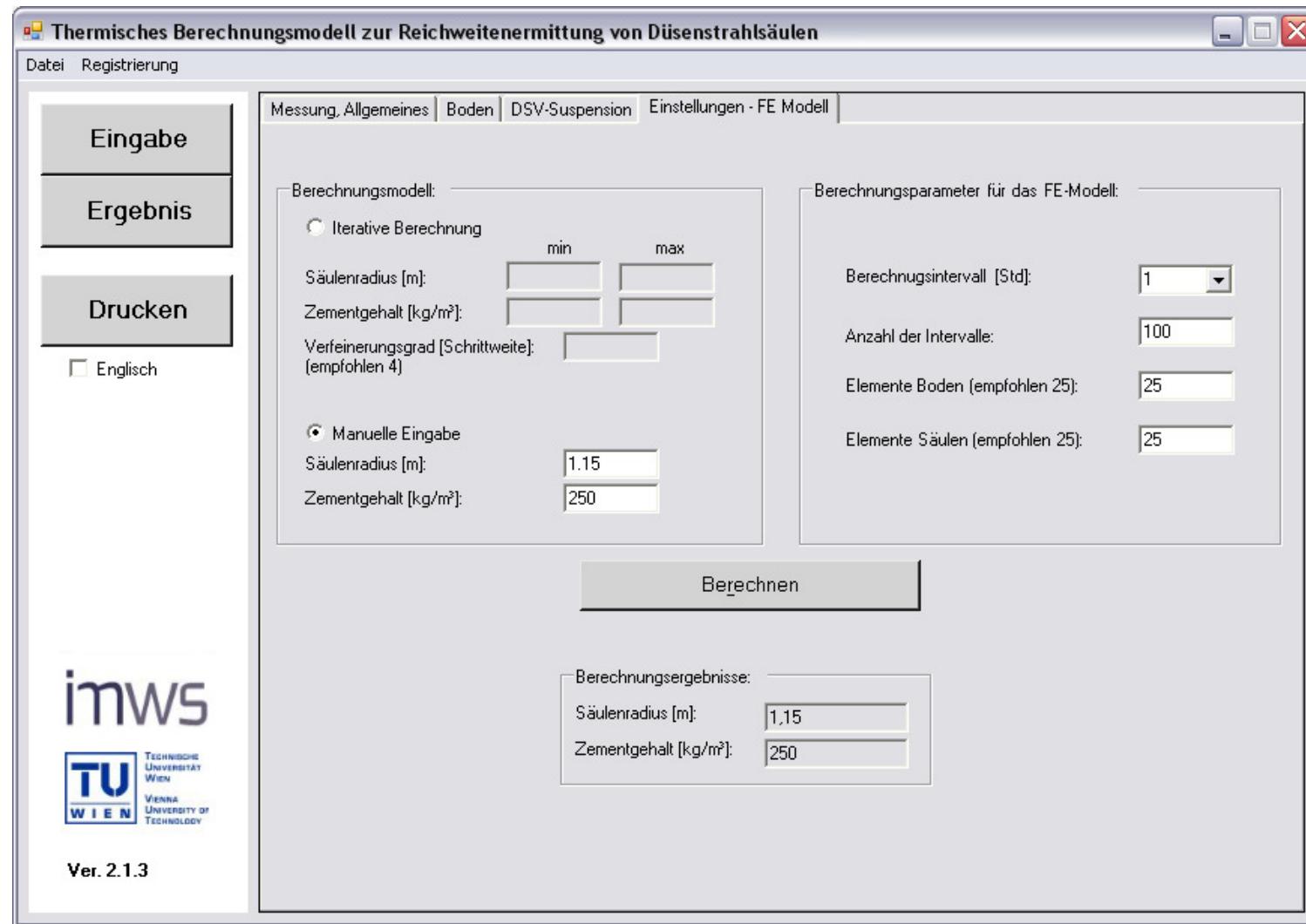
## Eingabefeld: DSV-Suspension



# Benutzeroberfläche

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
**Software**  
Anwendung  
Ergebnisse

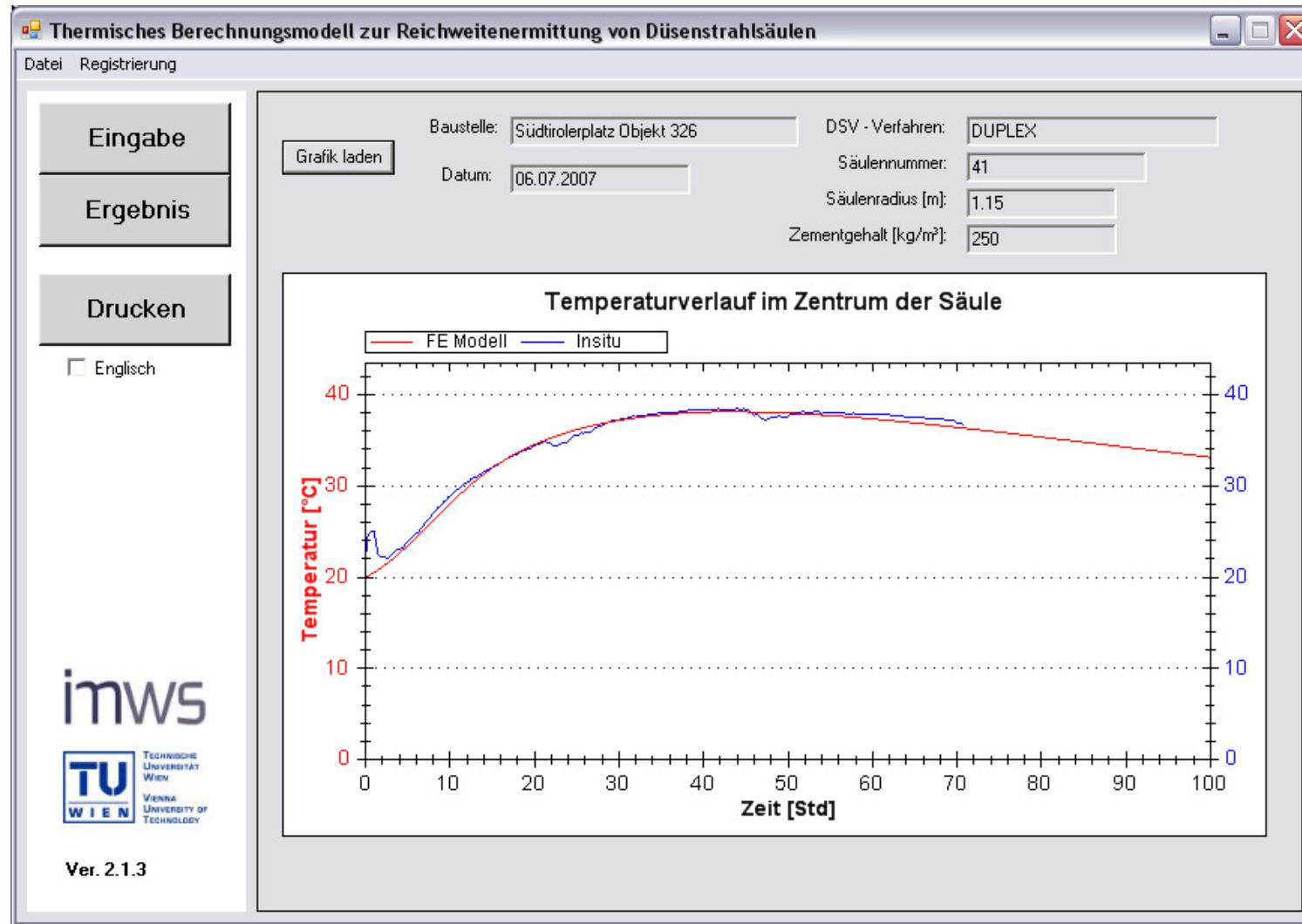
## Eingabefeld: Einstellungen FE-Modell



# Benutzeroberfläche

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
**Software**  
Anwendung  
Ergebnisse

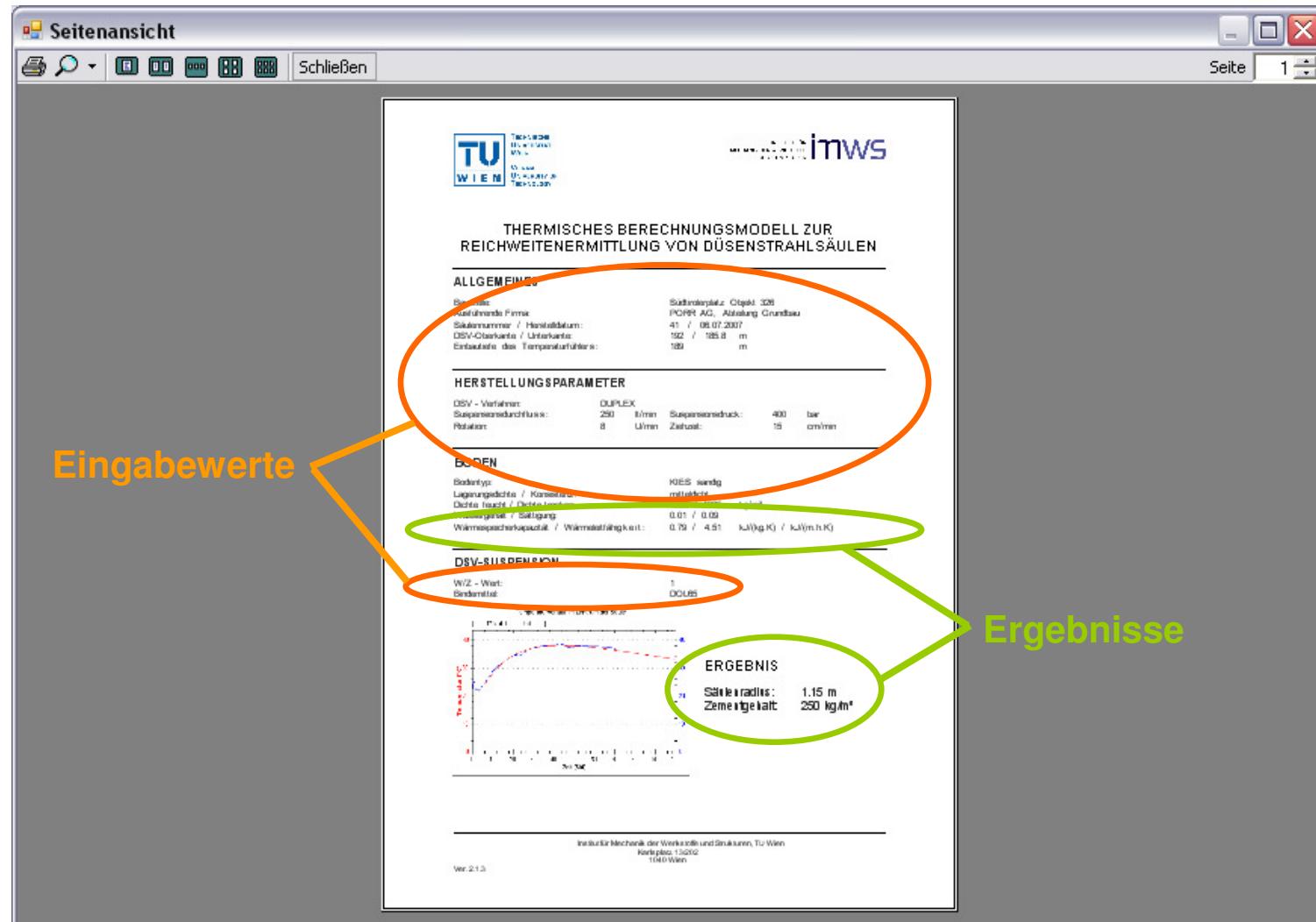
## Ergebnis



# Benutzeroberfläche

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
**Software**  
Anwendung  
Ergebnisse

## Ergebnis



## Praktische Anwendung

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
Software  
**Anwendung**  
Ergebnisse

### Einbau der Temperaturfühler vor Ort



Datenlogger Fa. TESTO, Anschluss von vier Temperaturfühlern möglich



Messspitze Temperaturfühler

## Praktische Anwendung

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
Software  
**Anwendung**  
Ergebnisse

### Einbau der Temperaturfühler vor Ort



Einbau der Temperaturfühler in die DSV-Säule



Eingebaute Temperaturfühler mit  
Datenlogger verbunden

# Praktische Anwendung

- Begriff
- Grundlagen
- Modell
- Software
- Anwendung**
- Ergebnisse

## Baustelle Ailecgasse, PORR AG

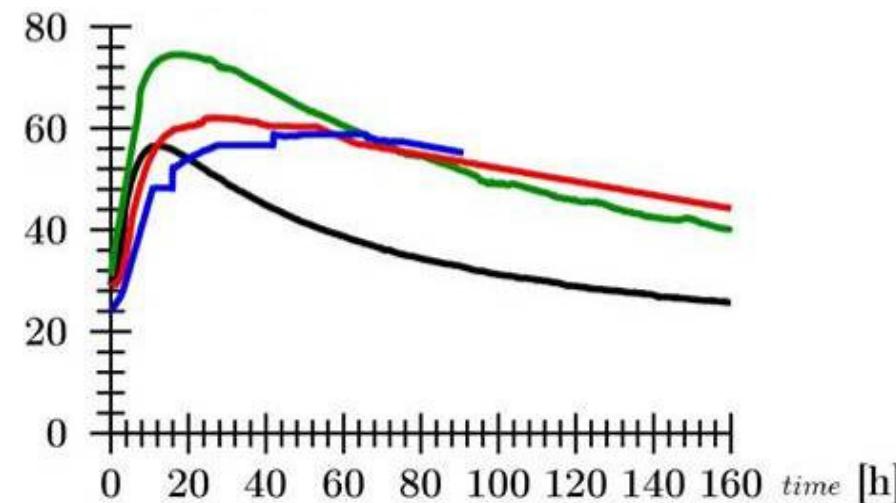


## Praktische Anwendung

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
Software  
Anwendung  
Ergebnisse

### Baustelle Ailecgasse, PORR AG

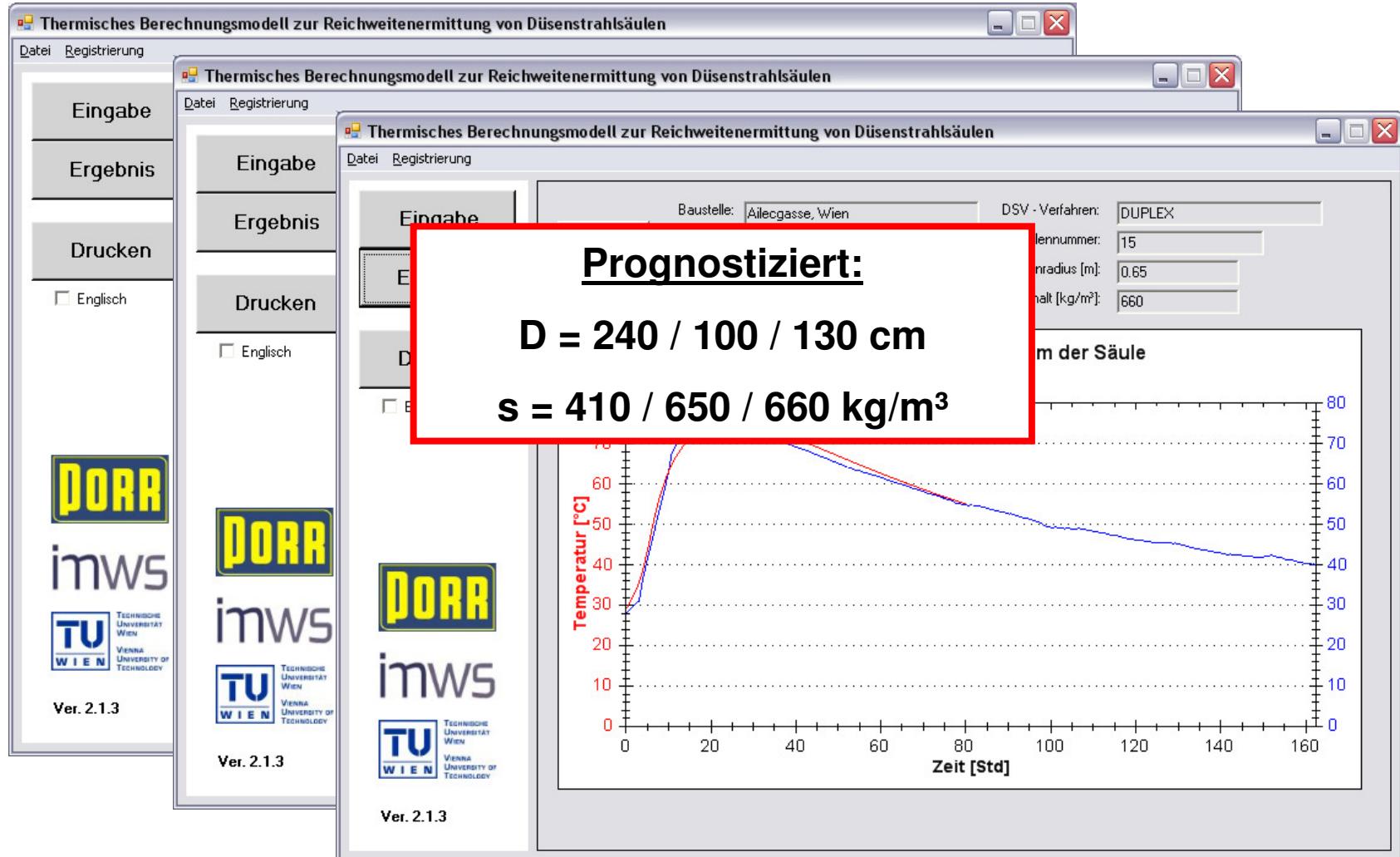
- **Temperaturfühler: 4**
- **Einbautiefe: 2,5 – 3,0 m**
- **Maximaltemperaturen erreicht nach ca. 12 – 60 h**
- **Duplex / Simplex**
- **Mehrphasenhydratationsmodell**



# Praktische Anwendung

Begriff  
 Grundlagen  
 Modell  
 Software  
**Anwendung**  
 Ergebnisse

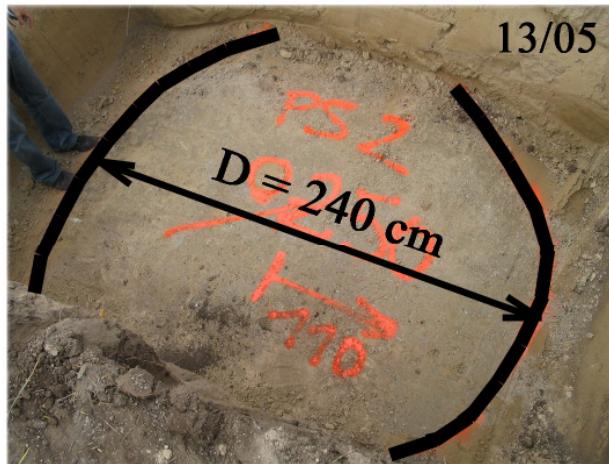
## Baustelle Ailecgasse, PORR AG



## Praktische Anwendung

Begriff  
Grundlagen  
Modell  
Software  
Anwendung  
Ergebnisse

### Baustelle Ailecgasse, PORR AG



**Prognostiziert:**

$D = 240 / 100 / 130 \text{ cm}$

$s = 410 / 650 / 660 \text{ kg/m}^3$



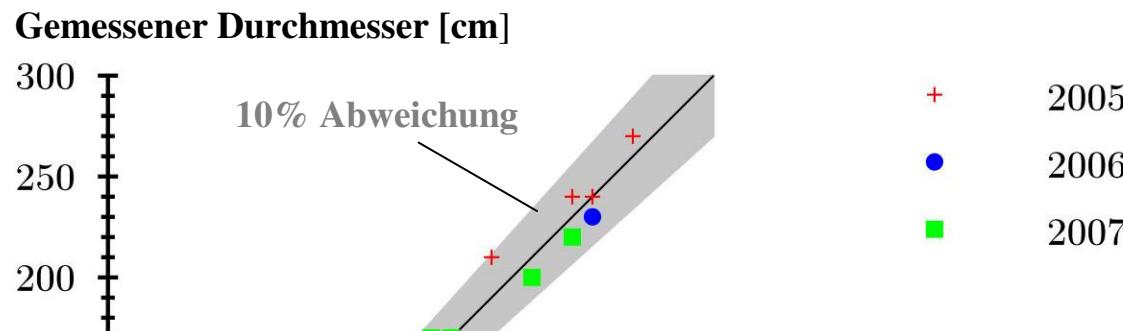
$\Delta < 10 \%$



**in-situ Durchmesser:**

$D = 240 / 110 / 145 \text{ cm}$

## Baustellenergebnisse - Anwendungsgrenzen



- Probesäulen: > 60 Stk
- Einbautiefen: bis 16 m
- $80 < D < 270$  cm

### Abweichungen

- bei 2/3 der Säulen: <5%
- bei 1/3 der Säulen: 5-12%

- Hydratationswärme Bindemittel < 150 J/g
- Fließendes Grundwasser
- Beeinflussung durch Nachbarsäulen

# Thermisches Berechnungsmodell

## Zusammenfassung

- Anwendbarkeit in der Baupraxis durch sehr gute **Übereinstimmung** mit tatsächlichem Säulendurchmesser und **Benutzeroberfläche** möglich
- Einbau **mehrerer Temperaturfühler** gleichzeitig (Durchmesservariation DSV-Säule)
- Information über den **Zementgehalt** in der Säule

## Wirtschaftliche Vorteile ...

- Einfacher Einbau in **Bauwerkssäule**
- Durchmesserbestimmung in **tiefliegenden Bodenschichten**
- Geringe Kosten der **Messeinrichtung**