

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



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY



Durchmesserbestimmung – Stand der Technik

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



Freigelegte Probesäulen

Thermisches Berechnungsmodell - Gliederung

Thermochemisches Rechenmodell zur Durchmesserbestimmung von DSV-Säulen

- Begriff “Thermochemisches Rechenmodell”
- Theoretische Grundlagen
 - Physikalische Grundlagen
 - Zementhydratation
 - Thermische Eigenschaften (Boden, DSV-Säule)
- Rechenmodell
- 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**

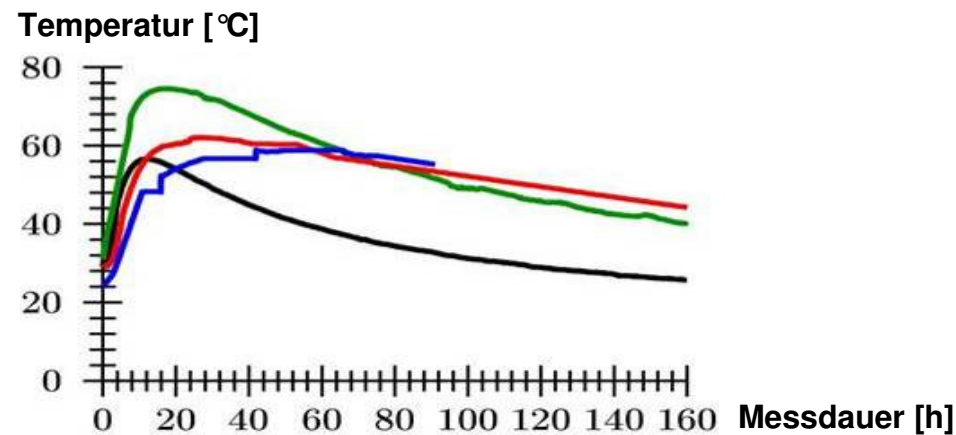
„Rechnungsmodell“

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

→ **Berechnungsergebnis:
Säulendurchmesser und Zementgehalt**

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

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

Temperatur-
änderung
Wärmequelle
Zementhydratation
Wärmestromvektor
"Wärmefluss"

$$\rho c \dot{T} + l_{\xi} \dot{\xi} = -\operatorname{div} \mathbf{q}$$

Begriff

Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

Wärmequelle - Zementhydratation

Begriff

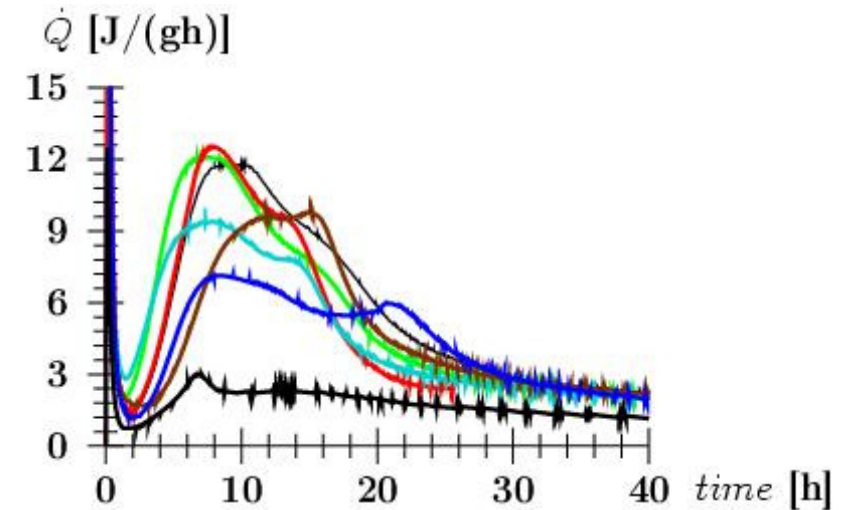
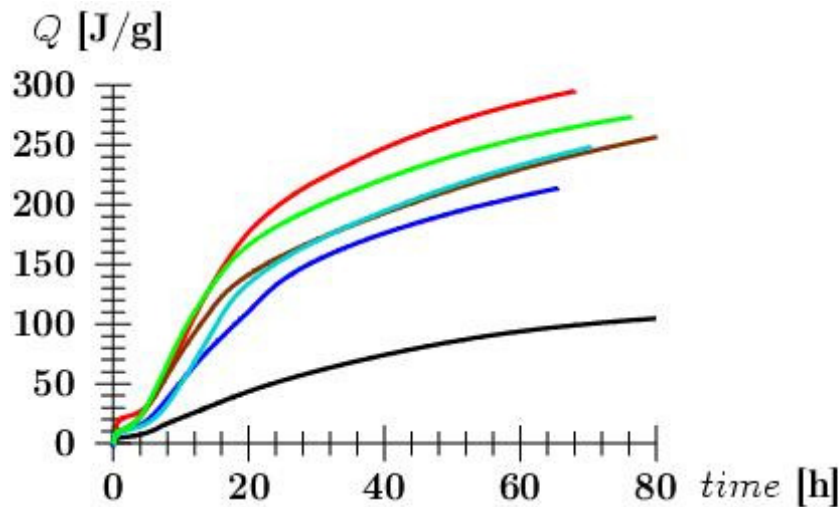
Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse



Hydratationseigenschaften: zeitliche Entwicklung der während des Abbindevorganges freigesetzten Wärme

- Kalorimeterversuche
- Hydratationsmodelle (Einphasenmodell - Mehrphasenmodell)

Thermische Eigenschaften (Boden, DSV-Säule)

Begriff

Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

Wärmespeicherkapazität C_{eff} [kJ/(m³K)]

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

p Boden-, Zementpartikel

w Wasser

a Luftporen

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

- Trockendichte
- Feuchtdichte
- Kornform, Korngrößenverteilung
- Mineralogie

Methode der Finiten Elemente

Begriff

Grundlagen

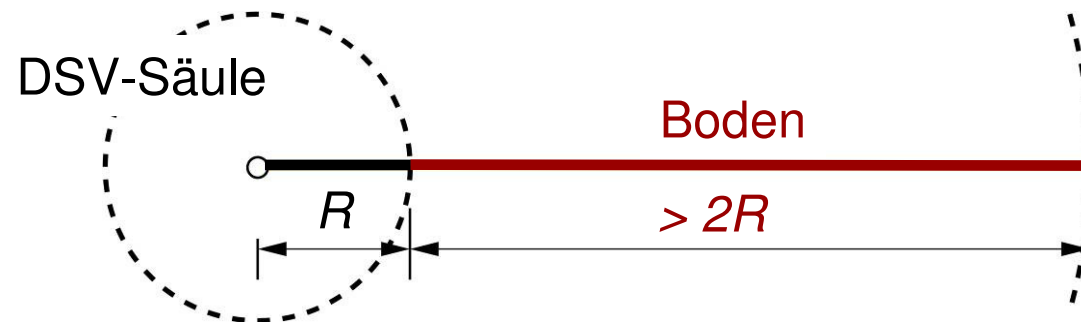
Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

■ Rotationssymmetrische Berechnung: FE-Netz



Eingabewerte DSV-Körper

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

Eingabewerte Boden

- Bodentemperatur T_B
- Trockendichte ρ_d
- Rohdichte ρ
- thermische Parameter C_{eff} , k_{eff}

Parameterstudie (numerische Berechnung)

Begriff

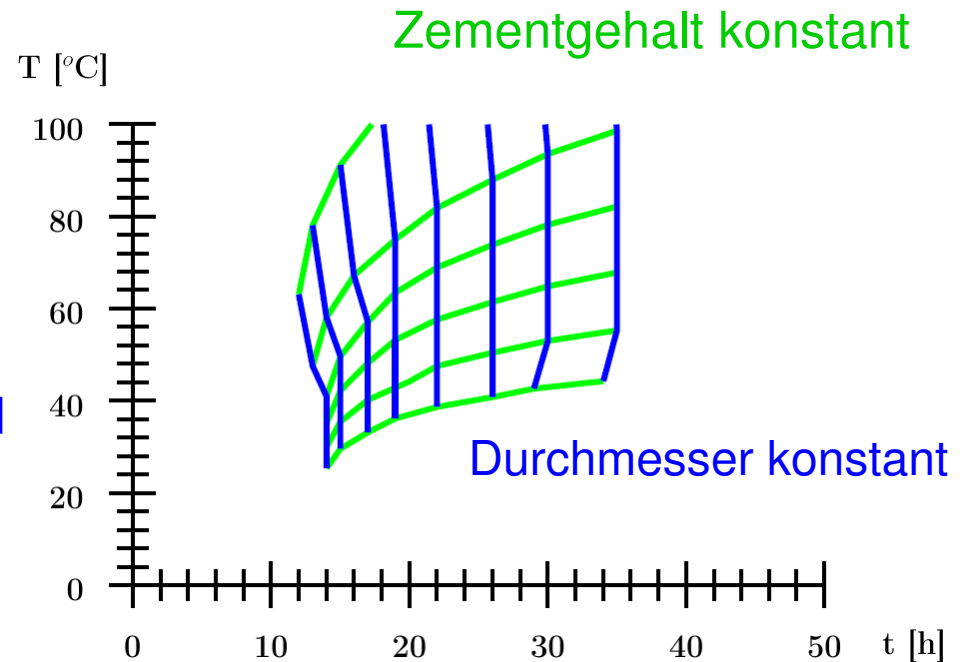
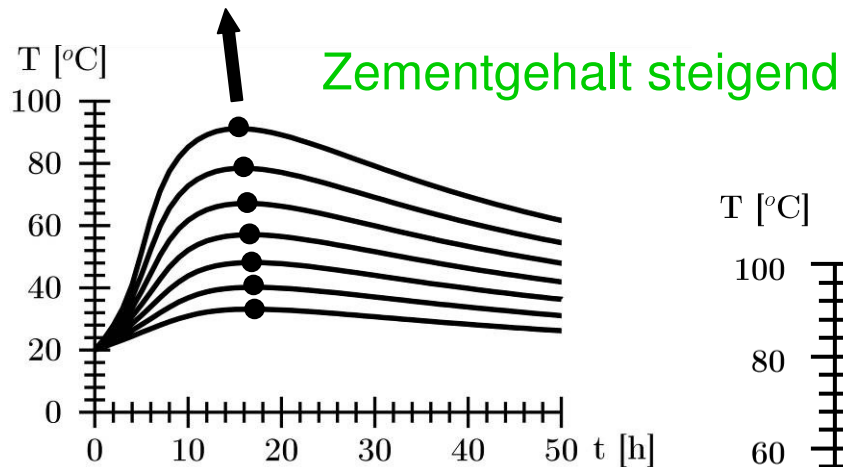
Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse



Begriff

Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse



Eingabefeld: Messung, Allgemeines

Thermisches Berechnungsmodell zur Reichweitenermittlung von Düsenstrahlsäulen

Datei Registrierung

Messung, Allgemeines | Boden | DSV-Suspension | Einstellungen - FE Modell

Neues Testfile importieren Vorhandenes Testfile 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 [lt/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:

inws
TU WIEN
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Ver. 2.1.3

Eingabefeld: Boden

Begriff

Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

Thermisches Berechnungsmodell zur Reichweitenermittlung von Düsenstrahlsäulen

Datei Registrierung

Messung, Allgemeines Boden DSV-Suspension Einstellungen - FE Modell

Eingabe

Ergebnis

Drucken

☐ Englisch

inws
TU WIEN
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Ver. 2.1.3

Beschreibung:

Bodentyp: KIES

Zusatzbezeichnung: sandig

Lagerungsdichte / Konsistenz: mitteldicht

Beschreibung der Bodenparameter

Manuelle Eingabe

Wärmeleitfähigkeit k [KJ/(mhK)]: 4.51

Bodenkennwerte:

Dichte trocken [kg/m³]: 1925

Dichte feucht [kg/m³]: 1950

Porenanteil n [-]: 0.27

Wassergehalt w [%]: 0.01

Sättigungsgrad S [-]: 0.09

Wärmespeicherkapazität c [KJ/(kgK)]: 0.79

Volumsfractionen:

Bodenpartikel [vol-%]: 0.73

Wasser [vol-%]: 0.03

Luft [vol-%]: 0.25

Berechnungsrelevante Bodenkenwerte:

r = 1950 kg/m³ c = 0.79 KJ/(kgK) k = 4.51 KJ/(mhK)

Eingabefeld: DSV-Suspension

Begriff

Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

Thermisches Berechnungsmodell zur Reichweitenermittlung von Düsenstrahlsäulen

Datei Registrierung

Messung, Allgemeines | Boden | **DSV-Suspension** | Einstellungen - FE Modell

Eingabe

Ergebnis

Drucken

☐ Englisch

Bindemittel

Parameterdefinition über: Kalorimeterversuch (a,b,c,d Werte)

Bindemittel: DOL65

DSV - Suspension:

Dichte des umgebenden Bodens [kg/m³]: 1925

Porenanteil des umgebenden Bodens n [-]: 0.27

Dichte Suspension [kg/m³]

Masse Zement [kg]: 750

Masse Wasser [kg]: 750

Dichte Suspension [kg/m³]: 1518

Massen und Vol-% je m³ Suspension

Zement [kg] , [%]: 759 24

Wasser [kg] , [%]: 759 76

Allgemeines:

W/Z Wert []: 1

inWS

TU WIEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Ver. 2.1.3

Eingabefeld: Einstellungen FE-Modell

Begriff

Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

Thermisches Berechnungsmodell zur Reichweitenermittlung von Düsenstrahlsäulen

Datei Registrierung

Messung, Allgemeines | Boden | DSV-Suspension | **Einstellungen - FE Modell**

Eingabe

Ergebnis

Drucken

☐ Englisch

Berechnungsmodell:

☐ Iterative Berechnung

min max

Säulenradius [m]:

Zementgehalt [kg/m³]:

Verfeinerungsgrad [Schrittweite]:
(empfohlen 4)

☒ Manuelle Eingabe

Säulenradius [m]:

Zementgehalt [kg/m³]:

Berechnungsparameter für das FE-Modell:

Berechnungsintervall [Std]:

Anzahl der Intervalle:

Elemente Boden (empfohlen 25):

Elemente Säulen (empfohlen 25):

Berechnen

Berechnungsergebnisse:

Säulenradius [m]:

Zementgehalt [kg/m³]:

inws
TU WIEN
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
VIENNA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Ver. 2.1.3

Begriff

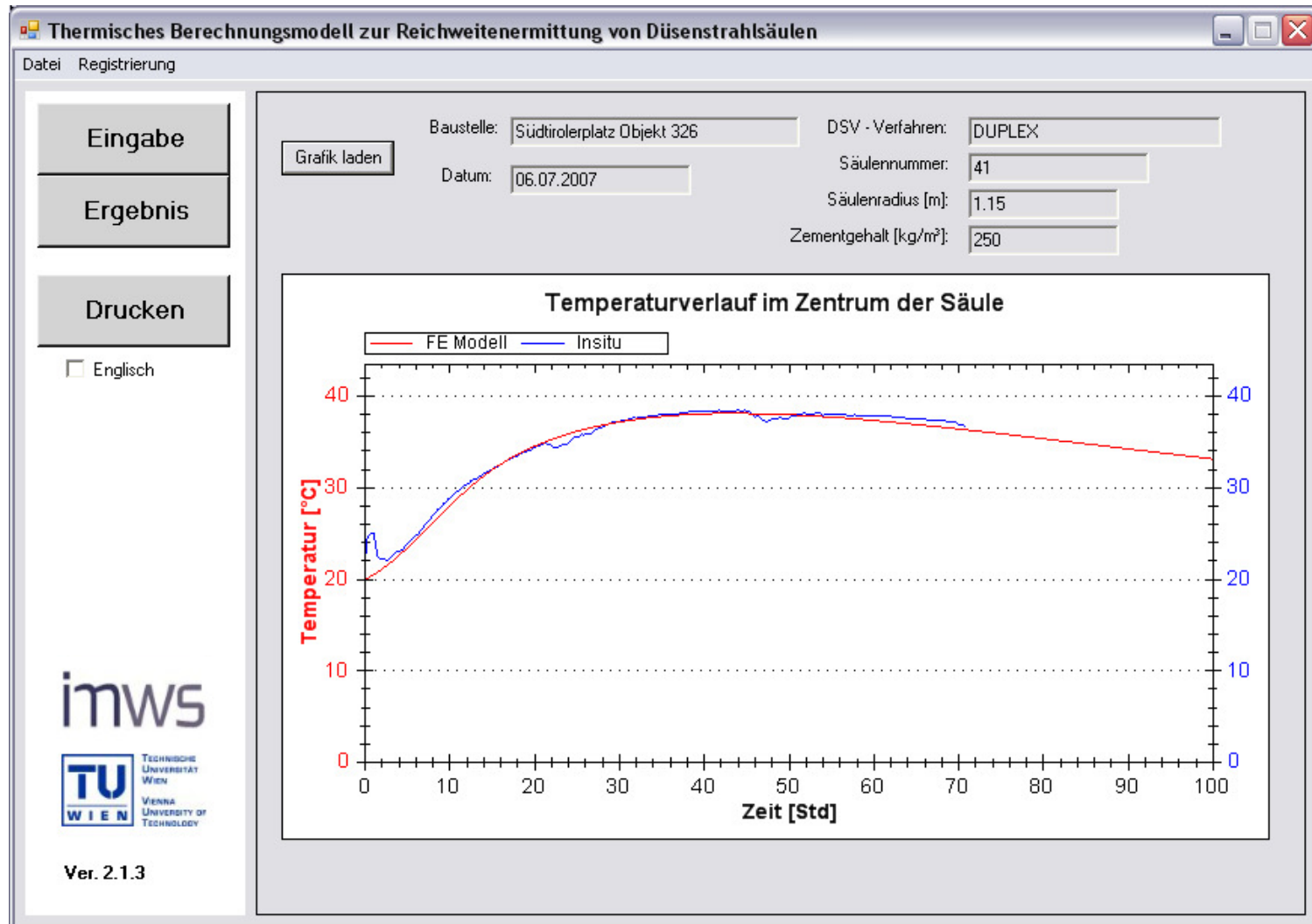
Grundlagen

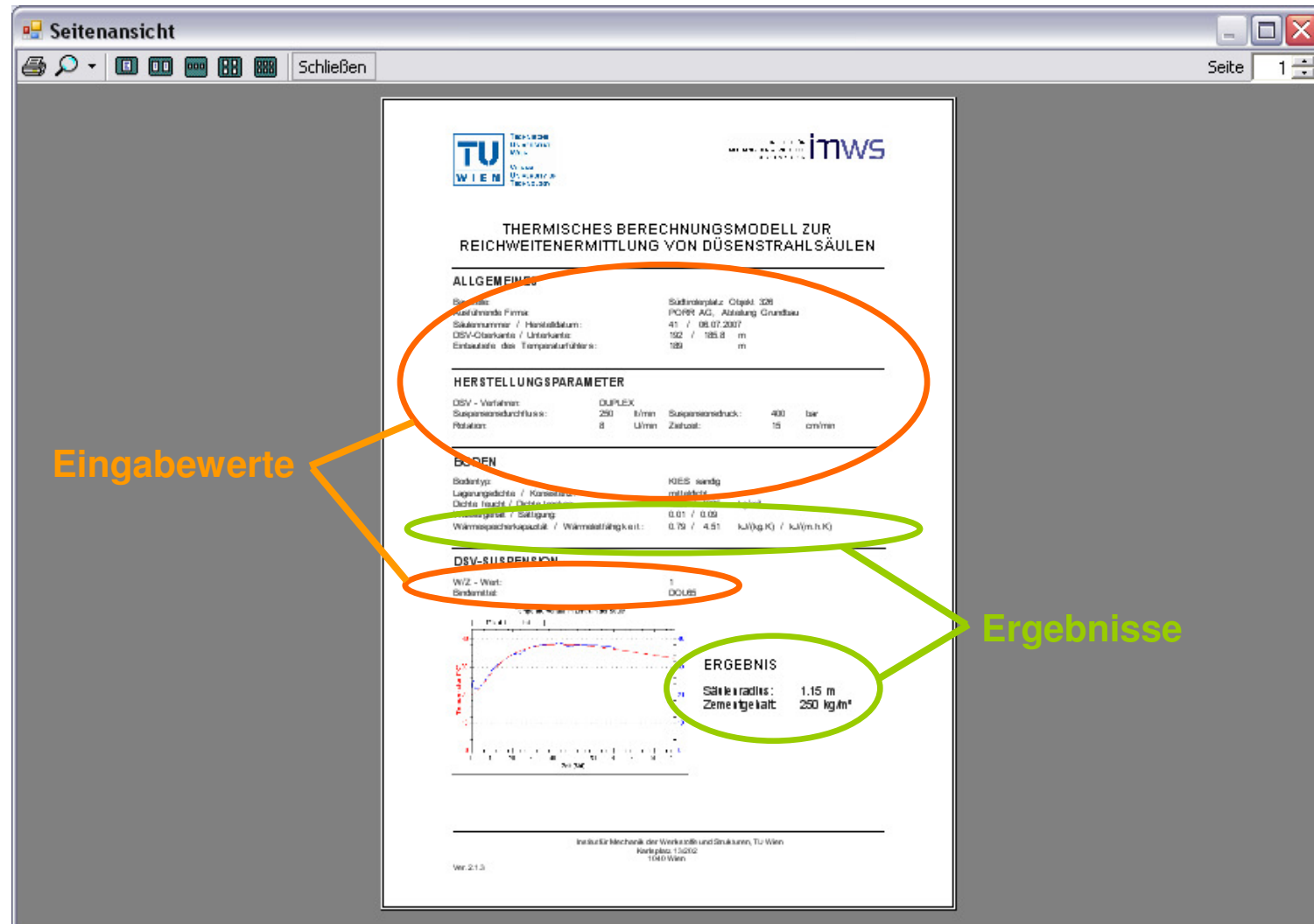
Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse





Begriff

Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

Einbau der Temperaturfühler vor Ort



Datenlogger Fa. TESTO, Anschluss von vier Temperaturfühlern möglich

Messspitze Temperaturfühler



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



Baustelle Ailecgasse, PORR AG

Begriff

Grundlagen

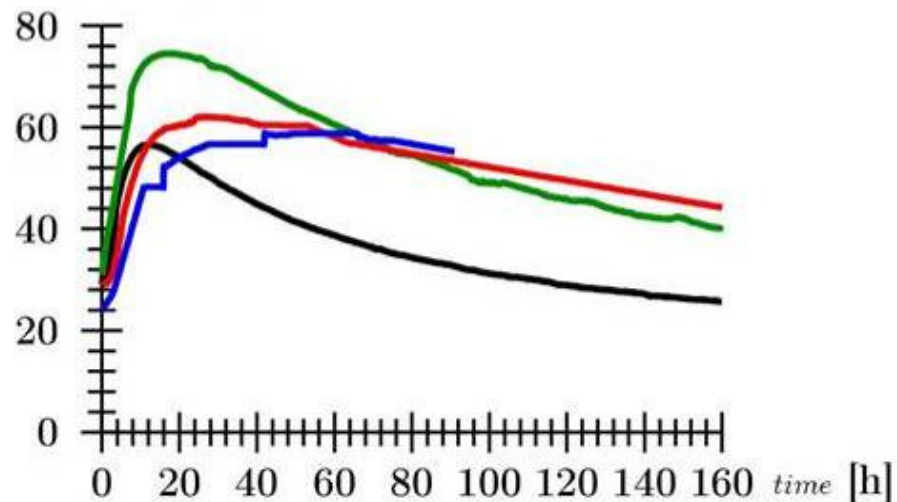
Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

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



Praktische Anwendung

Baustelle Ailecgasse, PORR AG

Begriff

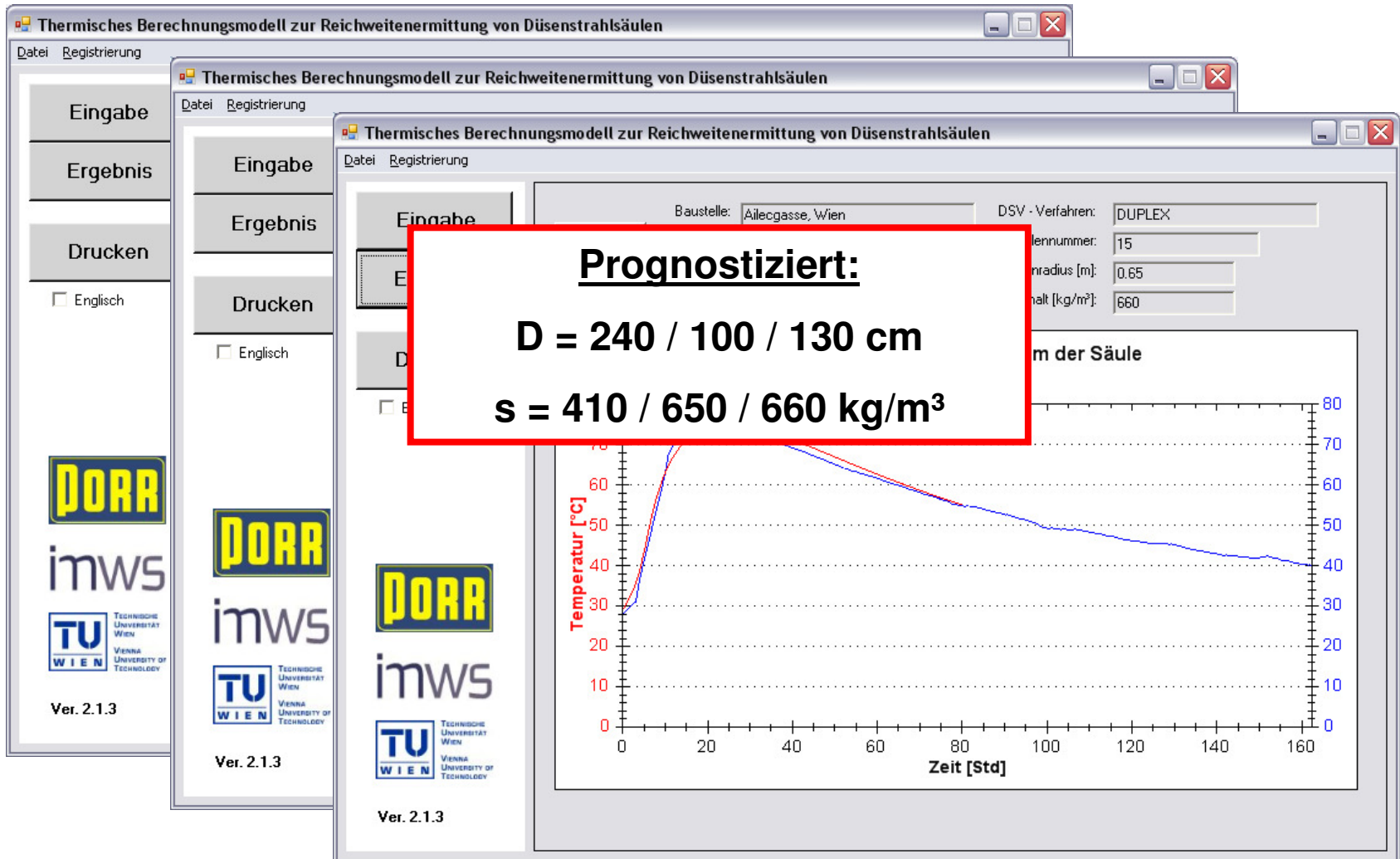
Grundlagen

Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse



Begriff

Grundlagen

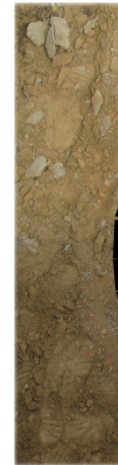
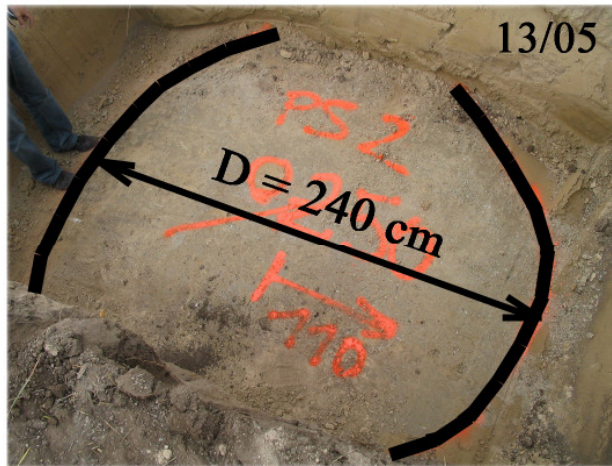
Modell

Software

Anwendung

Ergebnisse

Baustelle Ailecgasse, PORR AG



Prognostiziert:

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

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



$\Delta < 10 \%$

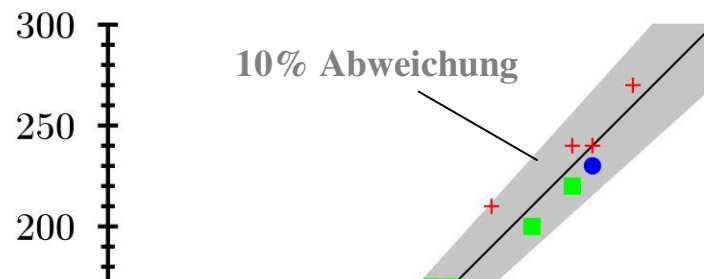


in-situ Durchmesser:

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

Baustellenergebnisse - Anwendungsgrenzen

Gemessener Durchmesser [cm]



+ 2005
• 2006
■ 2007

- 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**