

Thermisches Berechnungsmodell zur Durchmesserbestimmung von Düsenstrahlsäulen

Dipl.-Ing. Dr. techn. Klaus Meinhard,
Porr Technobau und Umwelt AG, Abteilung Grundbau, Wien
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roman Lackner,
Fachgebiet Computational Mechanics, Technische Universität München
Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dietmar Adam,
Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Wien

Das in diesem Beitrag vorgestellte thermische Berechnungsmodell stellt eine neue Methode zur Durchmesserbestimmung von Säulen dar, welche mittels dem Düsenstrahlverfahren (DSV) hergestellt wurden und basiert auf der numerischen Simulation der Wärmeentwicklung in der hydrierenden DSV-Säule und des Abfließens der Wärme in den umgebenden Boden. Als Eingangsparameter dienen die Eigenschaften des verwendeten Bindemittels, die thermischen Eigenschaften der DSV-Suspension, sowie die bodenphysikalischen und thermischen Eigenschaften des anstehenden Bodens. Durch Vergleich von auf der Baustelle gemessenen und den numerisch berechneten Temperaturentwicklungen im Zentrum der Säule lassen sich Rückschlüsse auf den Radius der Säule und deren Zementgehalt ziehen. Das Abteufen zusätzlicher Bohrungen für die Messung des Durchmessers bzw. ein Freilegen der DSV-Säule ist bei dieser Methode nicht mehr notwendig, worin der wesentliche wirtschaftliche Vorteil besteht. Bis dato lieferte dieses Verfahren unabhängig der Herstellungsmethode (Simplex, Duplex, Triplex) sehr gute Ergebnisse bei Verwendung unterschiedlicher Bindemittel und einer Vielzahl von anstehenden Böden. In Zukunft soll die vorgestellte Methode eine laufende Qualitätssicherung vor Ort während der gesamten Düsenstrahlarbeiten ermöglichen.

1. Allgemeines – Stand der Technik

Der zuverlässigste Weg zur Abschätzung der Eigenschaften der DSV-Körper ist bis dato noch immer die Herstellung von Probesäulen, die anschließend nach einer Erhärtungsdauer von mindestens zwei Tagen freigelegt werden (Bild 1). Diese Methode wird auch in der für das Düsenstrahlverfahren gültigen ÖNorm EN 12716 (4) vorgesehen. Neben dem Verzug im Bauablauf erhält man durch Probesäulen aber nur einen punktuellen Aufschluss über die erreichbaren DSV-Körper-Eigenschaften. Im Fall von DSV-Arbeiten in tieferen Bodenschichten ist die Herstellung von Probesäulen nicht möglich, da ein Freilegen bis in größere Tiefen oft weder technisch realisierbar noch wirtschaftlich vertretbar wäre.

Messverfahren zur Durchmesserbestimmung, welche derzeit von Spezialtiefbaufirmen eingesetzt werden, sind z. B. die Verwendung eines Faltschirms, die Messung der Erosion an vorher eingebauten Pegelstangen, die

Untersuchung des an der Oberfläche austretenden Rücklaufs mittels einer Massenbilanzgleichung (7), sowie Schallpegelmessungen durch den Einsatz von Hydrofonen bzw. Ultraschallmessungen. Die unterschiedlichen Anwendungsgrenzen dieser Methoden hängen vor allem vom anstehenden Boden, von den geometrischen Eigenschaften, sowie den wirtschaftlichen Gegebenheiten auf der Baustelle ab.



Bild 1. Freigelegte Probesäulen.

2. Thermisches Berechnungsmodell – Theoretischer Hintergrund

2.1 Allgemeines

In einem kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekt, welches in Kooperation zwischen der PORR Technobau und Umwelt AG und der TU Wien, Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen durchgeführt wurde, konnte ein Verfahren zur Bestimmung des Durchmessers von DSV-Körpern sowie der Materialeigenschaften von DSV-Mörtel entwickelt werden. Aufbauend auf das in (3) vorgestellte Modell beruht es auf der Kombination eines Materialmodells zur Erfassung der exothermen Abbindereaktion von zementgebundenen Materialien mit *in-situ* Temperaturmessungen.

Im Allgemeinen zeigt der auf der Baustelle gemessene Temperaturverlauf eine Erwärmung der Säule zu Beginn, welche auf die exotherme Abbindereaktion der Zementhydratation zurückzuführen ist. Nach etwa 10 bis 40 Stunden wird die Maximaltemperatur erreicht und danach ist der Verlauf der Temperatur in der Abkühlphase vor allem durch die Eigenschaften des anstehenden Bodens und der Säulenabmessung bestimmt.

Anhand numerischer Parameterstudien zeigte sich, dass der Zementgehalt in der DSV-Säule hauptsächlich den Anstieg der Temperatur zu Beginn der Zementhydratation beeinflusst (Bild 2a) und eine Zunahme des Durchmessers ein späteres Auftreten der Maximaltemperatur und eine langsamere Abkühlung mit sich bringt (Bild 2b). Diese Effekte können auch bei *in-situ* Temperaturmessungen beobachtet werden, welche im Bild 2c klar erkennbar sind. Aufgrund dieses signifikanten Unterschiedes können durch Vergleich von auf der Baustelle gemessenen Temperaturentwicklungen mit den Ergebnissen einer numerischen Berechnung Rückschlüsse sowohl auf den Zementgehalt wie auf den Säulendurchmesser gezogen werden.

Die Qualität der durch Vergleich identifizierten Eigenschaften des DSV-Körpers hängt im hohen Maße von der Beschreibung der Zementhydratation sowie den zugrunde gelegten thermischen Eigenschaften des anstehenden Bodens in der Simulation ab. Im Folgenden werden diese Aspekte näher behandelt.

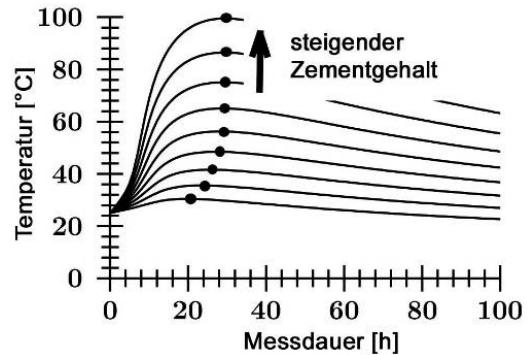


Bild 2a. Parameterstudie: Temperaturentwicklung im Zentrum der DSV-Säule bei Veränderung des Zementgehaltes von 100 bis 500 kg/m³ bei einem gleich bleibenden Säulendurchmesser von 150 cm.

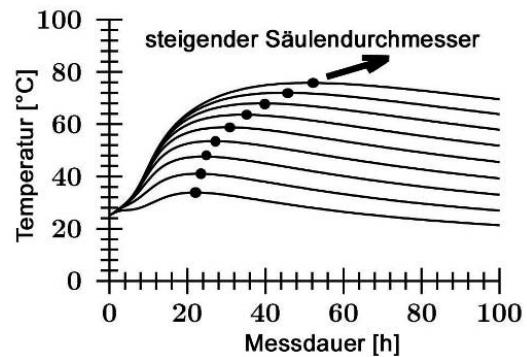


Bild 2b. Parameterstudie: Temperaturentwicklung im Zentrum der DSV-Säule bei Veränderung des Durchmessers von 80 bis 240 cm bei einem gleich bleibenden Zementgehalt von 300 kg/m³.

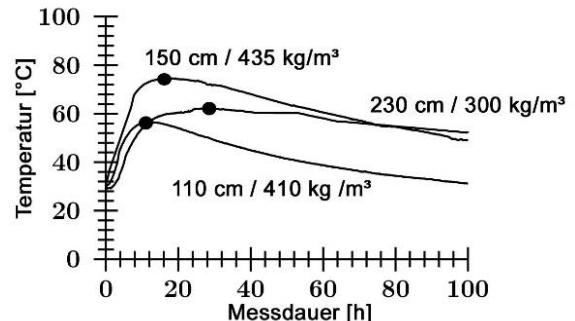


Bild 2c. Temperaturentwicklung im Zentrum von DSV-Säulen auf der Baustelle Ailecgasse, Wien: Probesäule 1 bis 3 mit erreichten Durchmessern von 110 bis 230 cm und einem Zementgehalt von 300 bis 435 kg/m³.

2.2 Zementhydratation

Der Hydratationsfortschritt wird durch die Masse des in Hydraten gebundenen Wassers (Hydratmasse) m beschrieben. Der so genannte Hydrationsgrad ξ stellt das Verhältnis zwischen

der aktuellen Hydratmasse und der Hydratmasse bei vollständiger Hydratation m_∞ dar:

$$\xi = \frac{m}{m_\infty} \quad [1]$$

Die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion, $\dot{\xi} = d\xi/dt$, wird mit Hilfe des Arrheniusgesetzes, welches üblicherweise in der Zementchemie verwendet wird, beschrieben:

$$\dot{\xi} = \tilde{A} e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad [2]$$

In Gleichung [2] spiegelt die normierte chemische Affinität $\tilde{A}(\xi)$ die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von den bereits gebildeten Hydraten wider. Der Exponentialterm berücksichtigt den Einfluss der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Hierbei entspricht E_a der Aktivierungsenergie der Reaktion. Sie beträgt für Portlandzemente 33500 J/mol. R ist die universelle Gaskonstante mit $R = 8,315 \text{ J/(mol K)}$ und T ist die Temperatur in Kelvin. Die Wärmeentwicklung in der hydrierenden DSV-Säule sowie der Abfluss an Wärme in den umliegenden Boden wird mit der Feldgleichung

$$\rho c T + l_\xi \dot{\xi} = -\operatorname{div} \mathbf{q} \quad [3]$$

beschrieben, wobei ρ [kg/m^3] der Dichte und c [kJ/(kg K)] der spezifischen Wärmekapazität entspricht. l_ξ [kJ/m^3] ist die gesamte Wärmemenge, die während der Hydratation freigesetzt wird. Dem Abfluss von Wärme wird durch den Wärmestromvektor \mathbf{q} Rechnung getragen, der wiederum mit der Temperatur über das Fouriersche Wärmeleitgesetz verknüpft ist,

$$\mathbf{q} = -\lambda \operatorname{grad}(T), \quad [4]$$

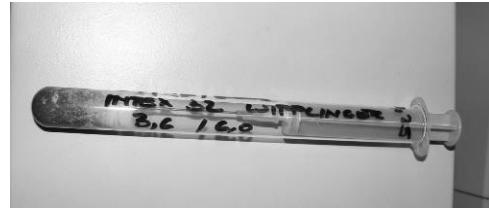
wobei λ [kJ/(m h K)] die Wärmeleitzahl ist.

Die in Gleichung [2] aufscheinende chemische Affinität muss für das verwendete Bindemittel bekannt sein. Sie kann experimentell durch Ausnutzung der *chemo-mechanischen* Kopplung (Druckversuche) oder der *chemo-thermischen* Kopplung (Kalorimeterversuche) bestimmt werden. Im Rahmen des in diesem Beitrag vorgestellten Forschungsprojektes wurde $\tilde{A}(\xi)$ mittels des an der Technischen Universität Wien am Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen zur Verfügung stehenden Differentialkalorimeter (Bild 3a) für die jeweils verwendeten Bindemittel ermittelt. Hierbei wird während der Hydratation die Temperatur einer Probe mit einem W/Z-Wert von 0,6 (Bild 3b)

konstant gehalten und die hierfür erforderliche Wärmezufuhr bzw. -abfuhr gemessen.



(a)



(b)

Bild 3. (a) Differentialkalorimeter, (b) untersuchte Probe

Unter der Annahme isothermer Verhältnisse ($T = 0$) ergibt sich aus den Gleichungen [2] und [3]

$$\tilde{A} = -\operatorname{div} \mathbf{q} \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot \frac{1}{l_\xi}, \quad [5]$$

wobei $\operatorname{div} \mathbf{q}$ während des Versuchs gemessen wird.

In (8) wurde das vorgestellte Hydratationsmodell durch die Verwendung eines Mehrphasenhydratationsmodells, welches der chemischen Zusammensetzung der Zemente Rechnung trägt, ersetzt. So konnte der Einfluss von Zumahlstoffen, wie Hochofenschlacke, Steinmehl usw. durch Kalorimeterversuche bestimmt und im erwähnten Materialmodell berücksichtigt werden. Falls die chemische Zusammensetzung des verwendeten Bindemittels bekannt ist, kann somit mit Hilfe des Mehrphasenhydratationsmodells der Verlauf der Wärmeentwicklung und daraus die chemische Affinität ohne Kalorimeterversuch bestimmt und in der numerischen Simulation berücksichtigt werden.

2.3 Thermische Bodenparameter

2.3.1 Wärmespeicherkapazität

Die Ermittlung der Wärmespeicherkapazität von Böden erfolgt durch die Bildung des arithmetischen Mittels über die Volumenfraktionen des anstehenden Bodens (Körner, Wasser, Luft) durch

$$c = \frac{1}{\rho} [\nu_K \rho_K c_K + (1 - \nu_K - \nu_L) \rho_W c_W + \nu_L \rho_L c_L] \quad [6]$$

Die Wärmespeicherkapazitäten der einzelnen Bestandteile können Tabellenwerken entnommen.

2.3.2 Wärmeleitfähigkeit

Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit basiert auf folgenden Methoden:

- trockener Boden: Mikromechanisches Modell (1)
- ungesättigter Boden mit einem Sättigungsgrad $\leq 70\%$: FE-Berechnung zur Bestimmung des Einflusses des Wassergehaltes auf die thermische Leitfähigkeit (9)
- gesättigter Boden bzw. Boden mit einem Sättigungsgrad $\geq 70\%$: Kontinuumsmikromechanisches Modell (5,6)

Bild 4 zeigt den Einfluss des Wassergehaltes (beschrieben durch den Sättigungsgrad) und der Rohdichte auf die Wärmeleitfähigkeit von Böden.

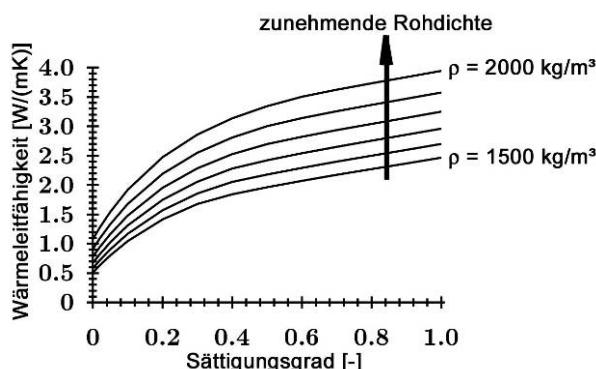


Bild 4. Wärmeleitfähigkeit eines Bodens mit durchschnittlicher Korngröße von 2 mm (elliptische Bodenpartikel; Wärmeleitfähigkeit Körner 8,4 W/mK; Wärmeleitfähigkeit Wasser 0,55 W/mK; Wärmeleitfähigkeit Luft 0,026 W/mK; Trockendichte $\rho = 1500$ bis 2000 kg/m^3).

Die auf der Basis der angeführten Methode erhaltenen Werte für die Wärmeleitfähigkeit wurden anhand von Laborversuchen verifiziert. Die dazu verwendete Versuchseinrichtung besteht aus einem Metallzylinder, in dem die Bodenprobe mit gewünschtem Wassergehalt und

Verdichtungsgrad eingebaut und vorerst auf eine Temperatur zwischen 1 °C und 5 °C gekühlt wird. Ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung im gesamten Probekörper erreicht, wird dieser in ein Wasserbad (Raumtemperatur) gestellt und die Temperaturveränderung in drei über den Querschnitt verteilten Punkten gemessen. Die Erwärmung der Probe auf Raumtemperatur lässt Rückschlüsse auf die thermische Leitfähigkeit des Bodens zu, indem man die während des Versuches aufgezeichneten Verläufe mit einer zu diesem Problem vorliegenden analytischen Lösung (2) vergleicht (Bild 5).

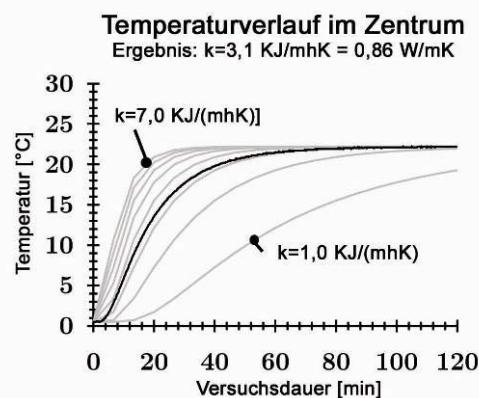


Bild 5. Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Böden: Vergleich der Messkurve (schwarz) mit analytischen Lösungen (grau)

3. Thermisches Berechnungsmodell – Anwendung auf der Baustelle

3.1 Messtechnische Einrichtung

Für die Messung der Temperaturentwicklung in DSV-Säulen wird eine Messeinrichtung der Fa. Testo GmbH, bestehend aus einem Datenlogger *Testo 177-T4* und Temperaturfühlern (Thermoelemente) *NiCr-Ni L2KK 2*0,25 mm²*, verwendet (Bild 6).

Die gemessenen Temperaturverläufe werden mittels einer eigens für diesen Zweck entwickelten Software analysiert (Bild 7). Diese ermöglicht unter Eingabe der bekannten Parameter der DSV-Suspension und des anstehenden Bodens, sowie unter Zugrundelegung der auf der Baustelle gemessenen Temperaturentwicklung eine Rückrechnung von Durchmesser und Zementgehalt der DSV-Säule. Das Rechenergebnis sowie die wesentlichen Eingabeparameter, der Vergleich des gemessenen und numerisch berechneten Temperaturverlaufs,

werden auf einem Ergebnisblatt zusammenfasst (Bild 7).



Bild 6. Messtechnische Einrichtung zur Temperaturmessung vor Ort: Datenlogger, Temperaturfühler

3.2 Durchführung der Messung auf der Baustelle

Die DSV-Arbeiten können wie gewohnt durchgeführt werden. Beim Einbau der Temperaturfühler ist darauf zu achten, dass der Fühler genau im Zentrum der Säule unmittelbar nach der Herstellung in der gewünschten Tiefe positioniert wird. Dies erfolgt üblicherweise mit dem Bohrgerät über das Bohrgestänge, wobei der gleichzeitige Einbau mehrerer Fühler in verschiedene Tiefen möglich ist. Nach der Entfernung des Bohrgestänges kann der Datenlogger mit den Temperaturfühlern verbunden werden und die Datenaufzeichnung beginnen. Das Auslesen der Daten ist jederzeit zur Kontrolle möglich, wobei die Anwendung der vorgestellten Methode erst nach dem Erreichen der Abkühlphase empfohlen wird. Durch Einlesen der Messdaten in die entwickelte Software ist eine sofortige Berechnung des Säulendurchmessers und des Zementgehaltes möglich.



THERMISCHES BERECHNUNGSMODELL ZUR REICHWEITENERMITTLUNG VON DÜSENSTRÄHLSÄULEN

ALLGEMEINES

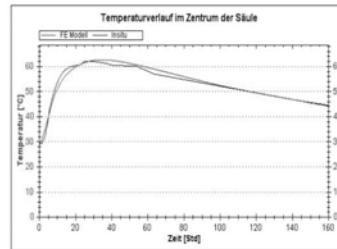
Baustelle:	Ailecgasse, Wien
Säulennummer:	13
Herstell datum:	13.06.2006
DSV-Oberkante.:	1.0 m
Einbauteufe des Temperaturfühlers:	3.0 m
DSV-Unterkante:	5.0 m

BODEN

Bodentyp:	SAND
Zusatzezeichnung:	kiesig
Lagerungsdichte / Konsistenz:	mitteldicht
Dichte:	1900 kg/m ³
Wärmespeicherkapazität:	0.84 kJ/(kg.K)
Wärmeleitfähigkeit:	1.8 kJ/(m.h.K)

DSV-SUSPENSION

W/Z - Wert:	1	
Bindemittel:	DOL70new	
$\xi = 0$	$\xi = 1$	
2066	2066	kg/m ³
Wärmespeicherkapazität:	1.41	0.88 kJ/(kg.K)
Wärmeleitfähigkeit:	6.0	4.8 kJ/(m.h.K)



ERGEBNIS

Säulenradius: 0.95 m
Zementgehalt: 436 kg/m³

Bild 7. Software – Ausdruck; Ergebnis

3.3 Baustellenergebnisse bisheriger Messungen

In den letzten drei Jahren wurden im Rahmen des erwähnten Forschungsprojektes bzw. im Anschluss daran bereits mehr als 75 Einzelmessungen an Probesäulen auf Spezialtiefbaustellen durchgeführt und die gemessenen Temperaturverläufe mit der vorgestellten Software analysiert. Die Herstellung der Probesäulen erfolgte entweder im Simplex, Duplex bzw. im Triplexverfahren, in verschiedenen Bodenarten, mit unterschiedlichsten Bindemitteln bei Säulen mit hergestellten Durchmessern im Bereich von 80 bis 270 cm. Bei zwei Dritteln der Messungen zeigte sich eine Abweichung des prognostizierten zum tatsächlich gemessenen Durchmesser der freigelegten Probesäule kleiner 5 %, bei einem Drittel der Messungen eine Abweichung zwischen 5 und 12 % (9).

3.4 Anwendungsgrenzen

Die vorgestellte Methode beruht auf der korrekten Erfassung der Wärmeentwicklung im

Zuge der Hydratation und des Abflusses an Wärme in den umliegenden Boden. Für den Fall eines geringen Temperaturanstieges aufgrund einer geringen Hydratationswärme des verwendeten Bindemittels (< 150 J/g) kann kein für die Simulation notwendiger, eindeutiger Temperaturanstieg im Zentrum der DSV-Säule festgestellt und somit keine Simulation mit diesem Verfahren durchgeführt werden. Fließendes Grundwasser bzw. hydrierende Nachbarsäulen wirken sich ebenfalls negativ auf die erreichbare Genauigkeit der Durchmesserbestimmung mittels des thermischen Berechnungsmodells aus, da dadurch ein gleichmäßiger, rotationssymmetrischer Wärmeabfluss aus der DSV-Säule nicht mehr gegeben ist.

4. Zusammenfassung

Das thermische Berechnungsmodell zur Durchmesserbestimmung von Düsenstrahlsäulen zeigte bei Anwendung auf einer Vielzahl von Baustellen in den letzten drei Jahren sehr gute Übereinstimmungen von numerisch prognostizierten und an freigelegten Probesäulen gemessenen Durchmessern. Außerdem wird durch diese Methode eine Bestimmung des Zementgehaltes der DSV-Säule möglich. Die Anwendung zur Qualitätssicherung während der DSV-Arbeiten scheint aufgrund der geringen Zusatzkosten sinnvoll, wobei aber auf die angeführten Anwendungsgrenzen Rücksicht zu nehmen ist.

5. Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Österreichischen Forschungs-Förderungs-Gesellschaft FFG, der PORR Technobau und Umwelt AG Abteilung Grundbau, sowie bei Firma Lafarge Perlmooser AG für die Unterstützung bei der Entwicklung der vorgestellten Methode zur Durchmesserbestimmung von DSV-Säulen im Rahmen des Projekts „Thermisches Berechnungsmodell zur Reichweitenermittlung von DSV-Säulen“.

Quellen nachweis

1. Batchelor, G.; O'Brien, F.; O'Brien, R.: *Thermal or electrical conduction through a granular material*. Proceedings of the Royal Society of London, Band 355, Seiten 313 – 333, London, Royal Society, 1977.
2. Baehr, H.; Stephan, K.: *Heat and mass transfer*, Band 1, Springer, Berlin, 1998.
3. Brandstätter, Ch.; Lackner, R.; Mang, H.A.: *Bestimmung von Materialeigenschaften zementgebundener Werkstoffe mittels Temperaturmessungen: Anwendung im Rahmen des Düsenstrahlverfahrens*. Bauingenieur, Band 77, 2002.
4. EN 12716: *Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Düsenstrahlverfahren (Hochdruckinjektion, Hochdruckbodenvermörtelung, Jetting)*, 2001.
5. Hatta, H.; Taya, M.: *Equivalent inclusion method for steady state heat conduction in composites*. International Journal of Engineering Sciences, 24(7):1159-1172, 1986.
6. Lackner, R.; Amon, A.; Lagger, H.: *Artificial ground freezing of fully-saturated soil: Thermal problem*. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), 131(2):211-220, 2005.
7. Lesnik, M.: *Ermittlung der Reichweite beim Düsenstrahlverfahren unter Berücksichtigung der Herstellparameter und der Bodeneigenschaften mittels Rückflussanalyse*, Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz, 2002.
8. Meinhard, K.; Lackner, R.: *Validation and application of a multi-phase hydration model for the back-analysis of properties of jet-grouted structures*. Computational Modelling of Concrete Structures, Euro-C 2006, Seiten 607-615, Taylor & Francis Group, London, 2006.
9. Meinhard, K.: *Thermochemisches Rechenmodell zur Qualitätssicherung von Düsenstrahlarbeiten – von Mehrphasenhydratationsmodell und mikrostrukturbezogenen thermischen Eigenschaften bis hin zur baupraktischen Anwendung*; Dissertation, Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen, Technische Universität Wien, 2007.