

EWS-tech: Projektübersicht und erste Ergebnisse zur Visualisierung des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden

M.Sc. Julian Rolker (rolker@solites.de), Dipl. -Ing. Mathieu Riegger

Solites – Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme
Meitnerstraße 8, 70563 Stuttgart

Keywords: Weiterentwicklung Erdwärmesonden-Technologie, Qualitätssicherung, Verfüllsuspension, Verfüllbaustoff, Verfüllqualität

Zusammenfassung

Mit dem Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech sollen grundlegende Fragestellungen zur Verfüllqualität von Erdwärmesonden gelöst werden. Hierzu wird ein dreistufiges Vorgehen aus Labor-, Realmaßstabs- und Technikumsversuchen gewählt.

Um das Verständnis der Fehlstellenbildung bei der Verfüllung von Erdwärmesonden zu verbessern, werden bei den sogenannten Technikumsversuchen Verfüllvorgänge von Erdwärmesonden visualisiert. Hierzu werden 6 m lange Erdwärmesonden in einem transparenten Versuchsaufbau eingebaut und verfüllt. Für verschiedene Verfüllbaustoffe sollen Parameter (z.B. W/F-Wert, Anmischdauer und -intensität, Verpressgeschwindigkeit etc.) ermittelt werden, mit denen eine gute Verfüllqualität erreicht wird.

1. Einleitung

In den letzten Jahren wurde an Hand zahlreicher schwerwiegender Schadensfälle in Baden-Württemberg (z.B. in Staufen, Schorndorf, Leonberg-Eltingen, Rudersberg-Zumhof) im Zusammenhang mit der Erstellung von Erdwärmesonden deutlich, dass zahlreiche Fragestellungen zur hydraulischen Abdichtung von Erdwärmesonden-Bohrlöchern bislang nicht geklärt sind. Die Lösung dieses Umstandes ist - insbesondere vor dem Hintergrund der jährlich rd. 3000 in Baden-Württemberg erstellten Erdwärmesondenanlagen - sehr dringlich.

Die Problematik der durch unvollständige Erdwärmesondenverfüllungen ausgelösten Schadensfälle ist – wie die signifikante Häufung der durch Erdwärmesonden ausgelösten Schadensfälle in Baden-Württemberg zeigt – ein Problem, das im Besonderen das Land Baden-Württemberg betrifft. Hierzu tragen die speziellen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen in Verbindung mit der Zulässigkeit, bei Erdwärmesondenbohrungen mehrere Grundwasserleiter zu durchteufen, entscheidend bei. Eine Beschränkung von Erdwärmesondenbohrungen auf den oberen Grundwasserleiter würde zu einer deutlichen Reduktion der zulässigen Bohrtiefen in Baden-Württemberg führen und damit auch Erdwärmesondenanlagen unter Effizienzaspekten und insbesondere aus wirtschaftlichen Gründen unrentabler machen.

Daher ist es von großer Bedeutung, Maßnahmen zur Verbesserung der Verfüllqualität von Erdwärmesonden zu ergreifen und offene Fragestellungen diesbezüglich zeitnah zu beantworten.

Hierzu hat das Land Baden-Württemberg nicht zuletzt durch die Einführung der „Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)“ am 07.10.2011 und die Einrichtung des „Arbeitskreises Baustoffe für Erdwärmesonden“ bereits erste wichtige Maßnahmen ergriffen.

Die Verfüllqualität von Erdwärmesonden wird unter anderem durch die eingesetzten Materialien, die eingesetzten Misch- und Verpressanlagen, die angewandte Verpressmethode und die

Arbeitsqualität der ausführenden Personen beeinflusst. Erste Erkenntnisse zu diesen Fragestellungen konnten bereits in dem Forschungsvorhaben EWSplus (Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden) (Riegger, 2013) gewonnen werden. Allerdings wurden mit Hilfe der durchgeführten Realmaßstabsversuche weitere grundlegende Fragestellungen aufgeworfen, deren Beantwortung Voraussetzung für eine Verbesserung der Verfüllqualität von Erdwärmesonden ist.

So existieren zu den nachfolgenden Fragestellungen bislang keine Antworten:

- Durch welche Mechanismen entstehen während oder nach dem Verpressen einer Erdwärmesonde unverfüllte Bereiche im Bohrloch?
- Können die auftretenden Probleme durch Abstimmung der Verfüllbaustoffe mit den Misch- und Verpressanlagen und deren Betriebsweise und durch die Art und Weise, wie die Suspension ins Bohrloch eingebracht wird, behoben/minimiert werden?
- Ist es möglich, Labor-Prüfbedingungen und Grenzwerte für Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe abzuleiten, die deren Eignung zur Sicherstellung einer geforderten Verfüllqualität nachweisen?
- Ist es möglich, Baustellenprüfverfahren und Grenzwerte für Verfüllsuspensionen abzuleiten, die eine einfache und zuverlässige Überprüfung der Verfüllsuspension auf die gewünschten Eigenschaften vor dem Einbau in das Bohrloch ermöglichen?

2. Stand von Wissenschaft und Technik

In den bislang national und international durchgeführten Forschungsvorhaben wurden die Themen thermische Effizienz und Verfüllqualität von Erdwärmesonden vor allem in Laborversuchen untersucht. Während in früheren Jahren hauptsächlich Untersuchungen zur thermischen Effizienz von Erdwärmesonden durchgeführt und darauf basierend thermisch verbesserte Verfüllbaustoffe entwickelt wurden (Ebert et al. 2000), lagen die Hauptschwerpunkte der Laboruntersuchungen in den letzten Jahren auf der Analyse der hydraulischen Durchlässigkeit von Verfüllbaustoffen und von verfüllten Erdwärmesondenabschnitten insbesondere nach Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung des Verfüllmaterials (Frank et al. 2011), (Herrmann 2008), (Müller 2009), (Niederbrucker/Steinbacher 2007), (Reuß/Kuckelkorn 2011).

Die am ZAE Bayern entwickelte und erprobte Versuchsanlage (Reuß/Kuckelkorn 2011) berücksichtigt die tatsächliche Einbausituation einer Erdwärmesonde am genauesten, unter anderem durch eine Besandung der Rohre, in die die Erdwärmesonden eingebaut werden. Mit dieser Anlage konnte gezeigt werden, dass eine verpresste Erdwärmesonde bestehend aus den Sondenrohren und dem Verfüllbaustoff deutlich höhere hydraulische Durchlässigkeiten aufweist als der reine Verfüllbaustoff. Damit wird deutlich, dass zur sicheren Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit sogenannte Systemdurchlässigkeitsversuche erforderlich sind. Untersuchungen an reinen Baustoffproben können lediglich für Voruntersuchungen herangezogen werden.

Bei den bisher durchgeführten Laboruntersuchungen wurde überwiegend mit ideal hergestellten Prüfkörpern gearbeitet, die eine Länge von 2 m oder weniger aufweisen.

Demgegenüber wurden in dem vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg finanzierten und von Solites bearbeiteten Forschungsvorhaben EWSplus (Riegger, 2013) erstmals in großem Stil Realmaßstabsversuche an rückbaubaren Erdwärmesonden durchgeführt. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der den Einbau und den zerstörungsfreien Rückbau von Erdwärmesonden mit einer Länge von 30 m ermöglicht. Auf Basis der bisherigen Versuche ist es weder möglich, die Entstehung der Fehlstellen mit den Randbedingungen des Verfüllvorgangs (verwendetes Verfüllmaterial, verwendete Misch- und Verpressanlage, angewandte

Verpresstechnik, etc.) zu korrelieren, noch ist es möglich, die zur Entstehung der Fehlstellen führenden Vorgänge zu identifizieren und zu erklären. Untersuchungen zum Verständnis des Verfüllvorgangs und der Fehlstellenentstehung – insbesondere in einem transparenten Versuchsaufbau – gibt es bislang nicht.

3. Vorstellung des Forschungsvorhaben EWS-tech

Mit dem Verbund-Forschungsvorhaben EWS-tech sollen grundlegende Fragestellungen zur Verfüllqualität von Erdwärmesonden gelöst werden. Hierzu wird ein dreistufiges Vorgehen aus Labor-, Technikums- und Realmaßstabsversuchen gewählt. Im Labormaßstab sollen detaillierte Charakterisierungen von Erdwärmesonden-Verfüllmaterialien und Untersuchungen zur Verfüllbaustoff- und Systemdurchlässigkeit sowie der Langlebigkeit von Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffen in der Gegenwart sulfataggressiver oder CO₂-haltiger Grundwässer durchgeführt werden. Aufbauend auf den Charakterisierungsversuchen im Labor werden Technikumsversuche zur Visualisierung des Verfüllvorgangs durchgeführt, die ein Verständnis des Verfüllvorgangs und der Fehlstellenbildung zum Ziel haben. Für die verschiedenen getesteten Verfüllbaustoffe sollen Parameter (z.B. W/F-Wert, Anmischdauer und -intensität, Verpressgeschwindigkeit etc.) ermittelt werden, mit denen eine gute Verfüllqualität erreicht wird. Neben den üblichen 2-U-Erdwärmesonden sollen bei den Versuchen auch Koaxial-Erdwärmesonden eingesetzt werden. Mit Hilfe von Realmaßstabsversuchen sollen die in den Labor- und Technikumsversuchen ermittelten Erkenntnisse verifiziert werden. Durch die Korrelation der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Labor-, Technikums-, und Realmaßstabsversuchen sollen anerkannte Labor-Prüfkriterien und baustellentaugliche Prüfkriterien für Erdwärmesondenverfüllbaustoffe sowie Handlungsempfehlungen zur qualitätsgesicherten Verfüllung von Erdwärmesonden erarbeitet werden.

Diese können in behördliche Leitlinien oder Vorschriften etc. aufgenommen werden. Die ermittelten Prüfkriterien können darüber hinaus als Grundlage einer Eigen- und Fremdüberwachung der Baustoffhersteller sowie einer Baustoffzulassung dienen. Durch den Einbezug des vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württembergs geleiteten „Arbeitskreis Baustoffe für Erdwärmesonden“ ist eine hohe Akzeptanz im Bereich der direkt betroffenen Unternehmen (Hersteller von Verfüllbaustoffen, Misch- und Verpressanlagen, Erdwärmesondenrohren sowie Bohrunternehmen) sichergestellt.

Im folgenden Kapitel werden die Technikumsversuche näher erläutert und erste Ergebnisse der Visualisierung des Verfüllvorgangs vorgestellt.

4. Technikumsversuche zur Visualisierung des Verfüllvorgangs

Um das Wissen zum Ablauf des Verfüllvorgangs und der Fehlstellenentstehung im Ringraum von Erdwärmesonden zu erweitern, sind ca. 36 Verfüllvorgänge von Erdwärmesonden in transparenten Kunststoffrohren vorgesehen.

Die Visualisierung des Verfüllvorgangs von Erdwärmesonden mit Hilfe von Technikumsversuchen soll zur Erreichung der nachfolgenden Ziele des Forschungsvorhabens EWS-tech beitragen:

- Erweiterung des Wissens zum Verfüllvorgang und der Fehlstellenentstehung im Ringraum von Erdwärmesonden (auch unter Berücksichtigung der Rauigkeit der Bohrlochwand)
- Vergleich der Verfüllqualität und der thermischen Effizienz von 2-U-Erdwärmesonden und Koaxial-Erdwärmesonden
- Mögliche Weiterentwicklungen der eingesetzten Verfüllmaterialien und der eingesetzten Misch- und Verpresstechnik zur Erreichung einer verbesserten Verfüllqualität basierend auf dem gewonnenen Verständnis des Verfüllvorgangs und der Fehlstellenentstehung
- Handlungsempfehlungen zur qualitätsgesicherten Ausführung der Verfüllung von EWS

- Erarbeitung anerkannter Labor-Prüfkriterien und baustellentauglicher Prüfkriterien für Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe
- Vorschlag zur Festlegung der grundlegenden Informationen, die in allen Datenblättern der Verfüllmaterialhersteller enthalten sein müssen
- Wissenstransfer in die Praxis

4.1 Durchführung von Technikumsversuchen

Die Höhe des Versuchsaufbaus und der zu verfüllenden Kunststoffrohre beträgt 6 m. Bis zu dieser Höhe ist der Versuchsaufbau in der Versuchshalle des KIT möglich. Der Innendurchmesser der transparenten Kunststoffrohre soll analog zu dem bei Erdwärmesonden üblichen Bohrlochdurchmesser ca. 150 mm betragen. Dies ergibt sich durch die Vorgabe eines Mindest-Bohrlochdurchmessers von ca. 150 mm in den Erdwärmesonden-Leitfäden zahlreicher Bundesländer. Wie die Fotografien in Abbildung 1 zeigen, ermöglicht der Versuchsaufbau eine gute Visualisierung des Verfüllvorgangs und Dokumentation möglicher Fehlstellen.



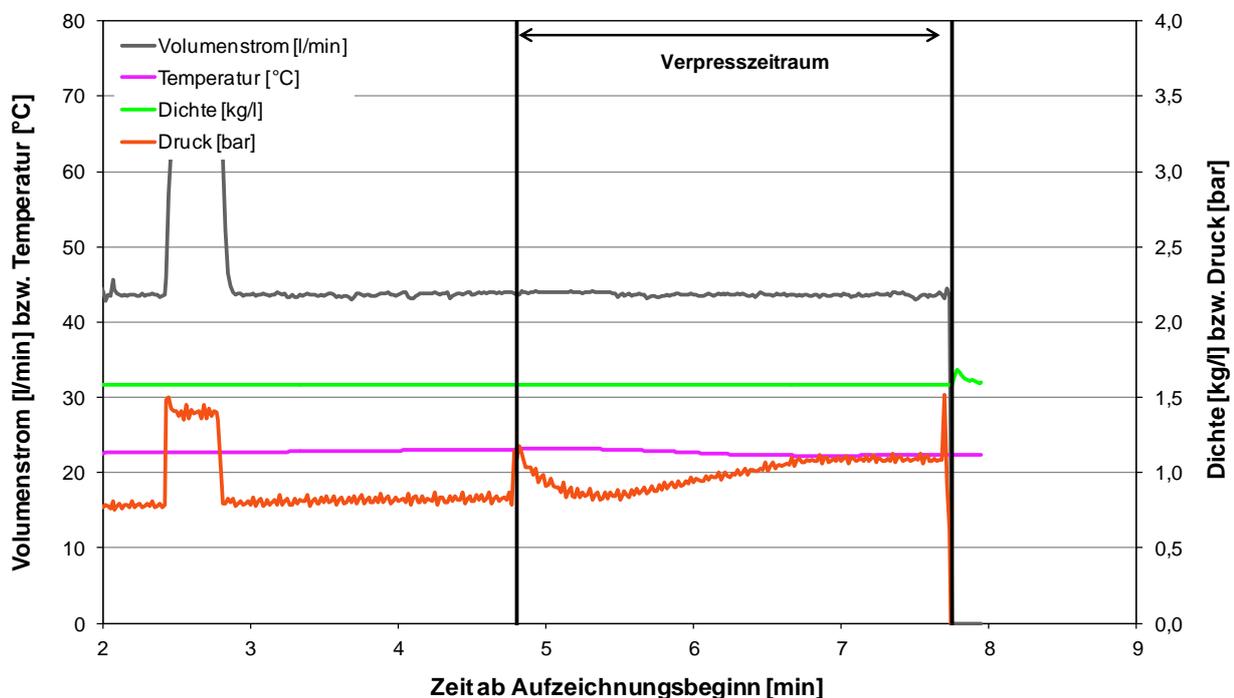
Abbildung 1: Ansicht des Versuchsaufbaus mit den vier transparenten Kunststoffrohren (linkes Bild) und Verfüllvorgang eines Rohres (rechtes Bild)

Bis zur Abgabe dieses Papieres wurden drei Versuchsreihen mit jeweils 4 Verfüllvorgängen durchgeführt. Bei den bisherigen Versuchsreihen wurde unter anderem der Einfluss des Verfüllbaustoffs, der Verpressgeschwindigkeit, der Anmischbedingung (Art des Mischers und W/F-Verhältnis) sowie der Rauigkeit des transparenten Kunststoffrohrs (besandet bzw. unbesandet)

untersucht. Die Verfüllungen der zu Verpressbeginn wassergefüllten „Bohrlöcher“ erfolgten jeweils im Kontraktorverfahren. Abstandshalter und Zentrierhilfen kamen bisher nicht zum Einsatz.

Neben einer Foto- und Videodokumentation des Verpressvorgangs werden bei den 36 geplanten Technikumsversuchen die zur Charakterisierung des Verfüllvorgangs relevanten Daten (Verfüllsuspensionsdichte, Verpressvolumenstrom, Verpressdruck und Temperatur der Verfüllsuspension) kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet. Hierzu werden ein Coriolis-Messgerät und ein Drucksensor verwendet, die zwischen der Misch- und Verpressanlage und dem „Bohrloch“ in den Verpressschlauch eingebaut sind. In Abbildung 2 sind die während einer exemplarischen Versuchsdurchführung kontinuierlich erfassten Messwerte dargestellt. Vor dem eigentlichen Verpressen der Versuchs-Erdwärmesonden findet eine Zirkulation der Verpresssuspension statt, um das Coriolis-Messgerät vollständig zu entlüften und eine korrekte Messwerterfassung sicherzustellen. Der in Abbildung 2 dargestellte exemplarische Verpressvorgang wird vor allem durch den Druckverlauf geprägt. Dieser zeigt nach Abklingen der Anfangseffekte (plötzlicher Druckanstieg und anschließender Druckrückgang), die sich durch das Umschalten von der Verpresssuspensions-Zirkulation auf die Verfüllung des transparenten Rohrs ergeben, erwartungsgemäß einen mit zunehmendem Suspensionspiegel ansteigenden Verpressdruck. Sobald das transparente Rohr vollständig gefüllt ist, erreicht der Verpressdruck einen annähernd konstanten Wert. Die übrigen Messgrößen (Verfüllsuspensionsdichte, Verpressvolumenstrom und Temperatur der Verfüllsuspension) sind im vorliegenden Fall während des gesamten Verpressvorgangs nahezu konstant.

Ergänzend zu den erläuterten Messungen werden baustellentaugliche Messverfahren zur Bestimmung der Suspensionsdichte, der Marsh-Zeit und des Wasserabsetzmaßes eingesetzt.



Verpressdauer: 2,95 min	Mittlere	Mittlerer Verpressvolumenstrom: 43,7 l/min
Mittlere Suspensionsdichte: 1,58 kg/l	Suspensionstemperatur: 22,6 °C	Eingebrachtes Suspensionsvolumen: 128 l

Abbildung 2: Kontinuierliche Datenaufnahme während eines Verpressvorganges

4.2 Dokumentationen der verfüllten Rohre

Bei den bisher durchgeführten Versuchen zeigte sich, dass sich die relevanten Strukturen und Fehlstellen innerhalb weniger Stunden nach der Verfüllung bilden. Nach der Verfüllung auftretende Strömungsbewegungen innerhalb des "Bohrlochs" können mit dem transparenten Versuchsaufbau sehr gut beobachtet und dokumentiert werden. Bei den beiden bisher eingesetzten Verfüllbaustoffen wurden jeweils nach der Verfüllung Wasser-Aufstiegskanäle beobachtet. Dies deutet auf eine Entmischung der eingesetzten Verfüllsuspensionen hin. In den wenige Millimeter breiten aber teilweise über mehrere Meter verlaufenden Aufstiegskanälen ist eine Anhäufung von einzelnen Mischungsbestandteilen, wie z.B. Sand, erkennbar (Abbildung 3.3).



Abbildung 3: Dokumentation der ausgehärteten Verfüllsuspension. Bild 1: Zersägen des Verfüllrohres in 25 cm lange Einzelstücke. Bild 2: Fehlstelle mit einer Ausdehnung von ca. 23 cm. Bild 3: Aufstiegskanal in Längsrichtung der Erdwärmesonde mit sandiger Entmischung im Bildzentrum (Versuchs-Erdwärmesonde mit innen besandetem Hüllrohr). Bild 4: Gesamte Erdwärmesonde zur Dokumentation

Die beschriebenen Aufstiegskanäle konnten bisher ausschließlich an der Bohrlochwand festgestellt werden, insbesondere jedoch in Bereichen, in denen die Sondenrohre nahe an dieser anliegen. Auch bei Verwendung von innen besandeten, transparenten Rohren, die eine raue Bohrlochwand emulieren, konnten nach dem Entfernen der besandeten Hüllrohre Kanäle mit sandigen Entmischungen vorgefunden werden (Abbildung 3.3).

Die Dokumentation der entstandenen Strukturen/Fehlstellen wird nach einer Aushärtezeit der verfüllten Erdwärmesonden von mindestens einer Woche durchgeführt. Dabei wird die gesamte Erdwärmesonde in 25 cm lange Einzelstücke zersägt und systematisch auf Fehlstellen und Strukturen untersucht, die Einfluss auf die Systemdichtigkeit der Bohrung haben könnten (s. Abbildung 3).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die bisher durchgeführten 12 der geplanten 36 Technikumsversuche zur Visualisierung des Verfüllvorgangs zeigen die Komplexität des Verfüllvorgangs aufgrund der Vielzahl von einflussnehmenden Parametern. In den folgenden Technikumsversuchen soll unter anderem der Einfluss von Zentrierhilfen auf die Ausbildung solcher Aufstiegskanäle untersucht werden. Desweiteren stehen Versuche an, bei denen die transparenten Hüllrohre nicht wassergefüllt sind. Die Untersuchung der Verfüllqualität bei der Verwendung von Koaxialsonden wird ebenfalls folgen.

Parallel zu den Technikumsversuchen finden in dem Forschungsvorhaben EWS-tech Laborversuche mit zahlreichen verschiedenen Verfüllbaustoffen und Realmaßstabsversuche an ca. 30 m tiefen, zerstörungsfrei rückbaubaren Erdwärmesonden statt. Zur Erreichung der Ziele des Forschungsvorhabens (s. Abschnitt 4) werden die Ergebnisse der Labor- und Realmaßstabsversuche mit denen der Technikumsversuche korreliert.

Das Forschungsprojekt EWS-tech wird durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg gefördert. Die Autoren danken für diese Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

Quellenangaben

EBERT, H.-P. et al.: Optimierung von Erdwärmesonden; Abschlussbericht zum DBU-Vorhaben AZ 17013; München; 2000

FRANK, J. et al.: Prüfvorrichtung zur Bestimmung des Frost-Tau-Wechsel-Widerstands von Verpressmaterialien für EWS; in: bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau; Ausgabe 10/2011; wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH; Bonn; 2011

HERRMANN, V.: Ingenieurgeologische Untersuchungen zur Hinterfüllung von Geothermie-Bohrungen mit Erdwärmesonden; Dissertation; Karlsruhe; 2008

MÜLLER, L.: Frost-Tau-Wechselbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden; in: bbr Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau; Ausgabe 07-08/2009; wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH; Bonn; 2009

NIEDERBRUCKER, R.; Steinbacher, N.: Eignungsuntersuchung von Verpressmaterialien für Erdwärmesonden; Amt der oberösterreichischen Landesregierung; Linz; 2007

REUSS, M.; KUCKELKORN, J.: Systemdichtheit von Erdwärmesonden; Otti-Symposium Oberflächennahe Geothermie; Regensburg; 2011

RIEGGER, M.: Abschlussbericht zu dem Forschungsvorhaben EWSplus (Untersuchungen zur Qualitätssicherung von Erdwärmesonden – Weiterentwicklung der Erdwärmesonden-Technik); Stuttgart; 2013