

Optimierung durch Einsatz von Simulationen

Christian Gmünder

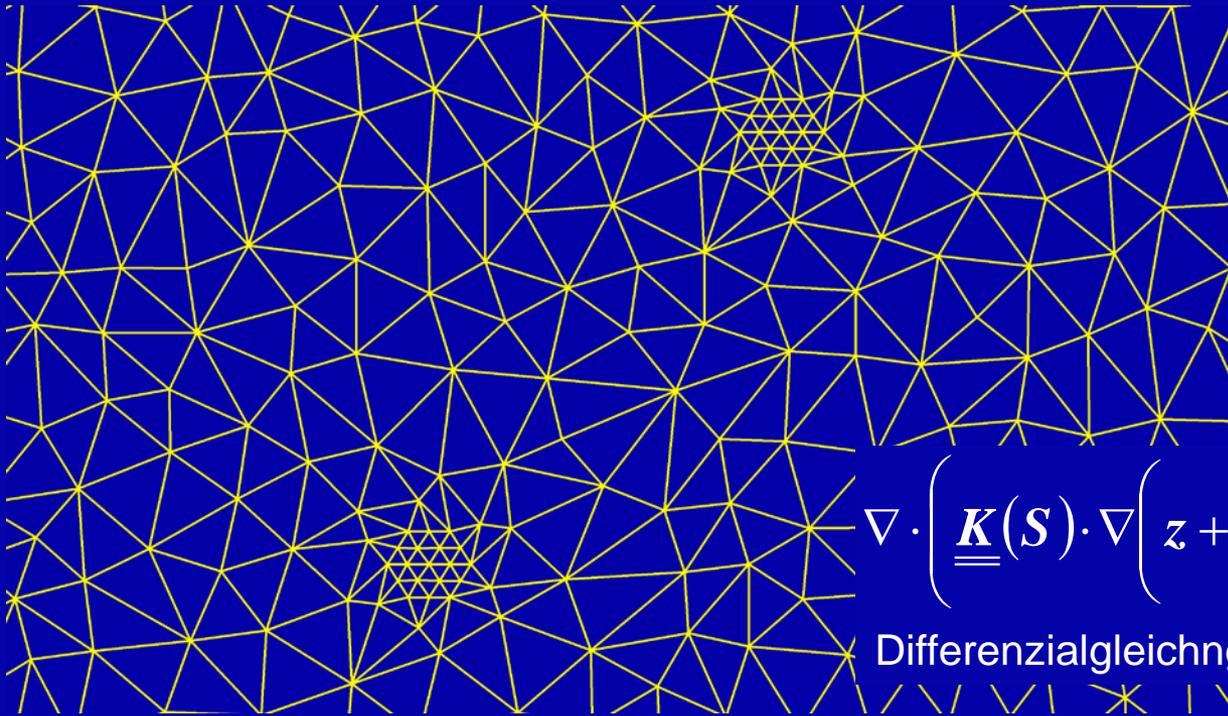


Simultec AG, Hardturmstrasse 261, 8005 Zürich, www.simultec.ch

Simulation

Was verstehen wir unter Grundwassersimulationen?

- Lösung von physikalischen Gleichungen im Raum durch Unterteilung des Untersuchungsbereiches in kleine Zellen (sogenannte Finite Elemente oder Finite Differenzen)



$$\nabla \cdot \left(\underline{\underline{\mathbf{K}}}(S) \cdot \nabla \left(z + \frac{p}{\rho \cdot g} \right) \right) = n \frac{\partial S}{\partial t}$$

Differenzialgleichung der Strömung

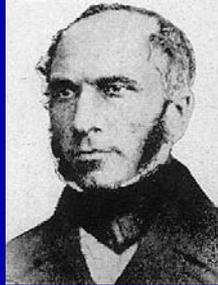
Vorgeschichte der Simulation

Einführung



Antoine de Lavoisier:
Massenerhaltung

1789



Henry Darcy:
Darcy-Gesetz

1856



Boris Galerkin:
Finite-Elemente-Methode

1915



H.S. Carslaw:
Mathematik Wärmetransport

1923



Konrad Zuse:
Erste Computer

1941

Erste Modelle in der Schweiz (100 El.)

1980

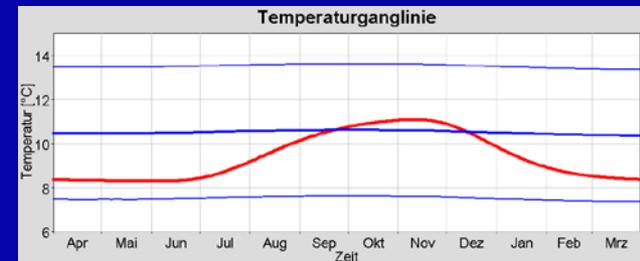
Modelle mit 10 Mio Elementen auf PC

2015

Abhängigkeit von der Grundwassersituation

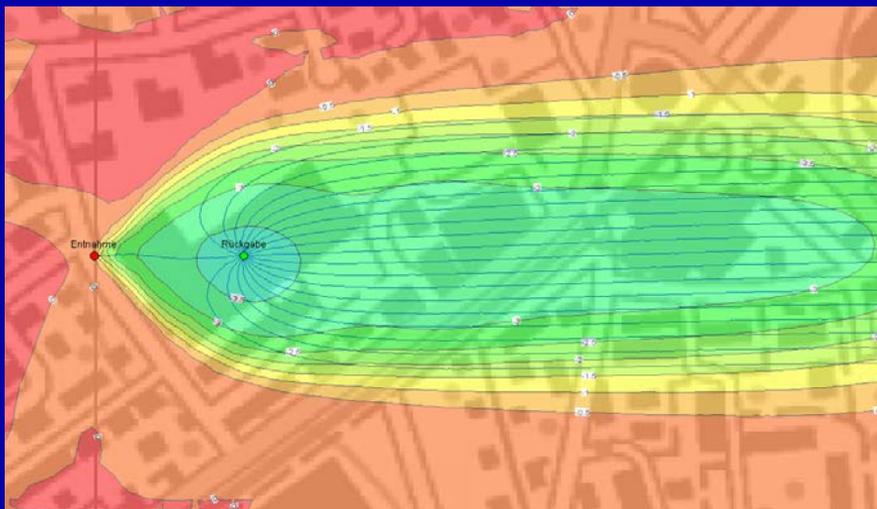
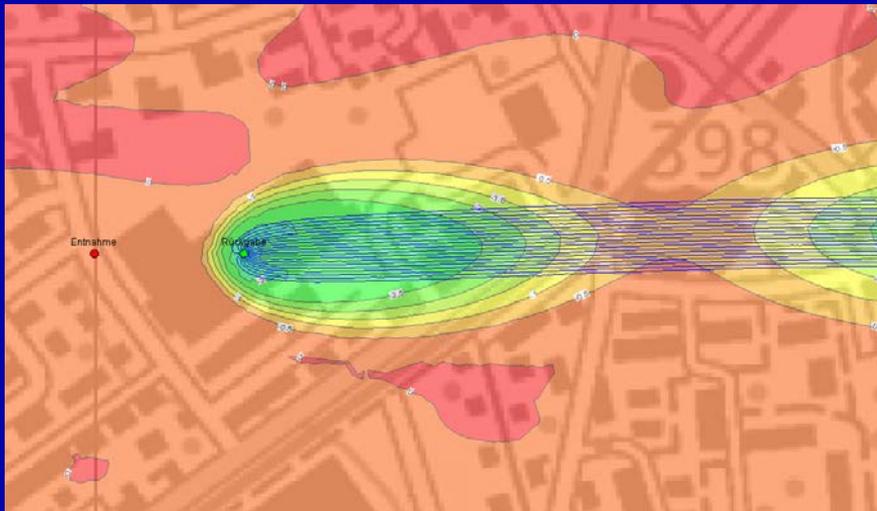
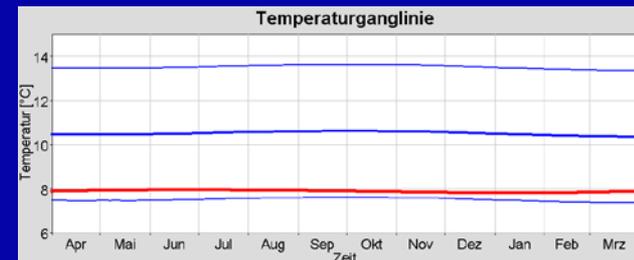
Schnelle Strömung

- keine Rückkopplung
- kleine wandernde Fahne



Langsame Strömung

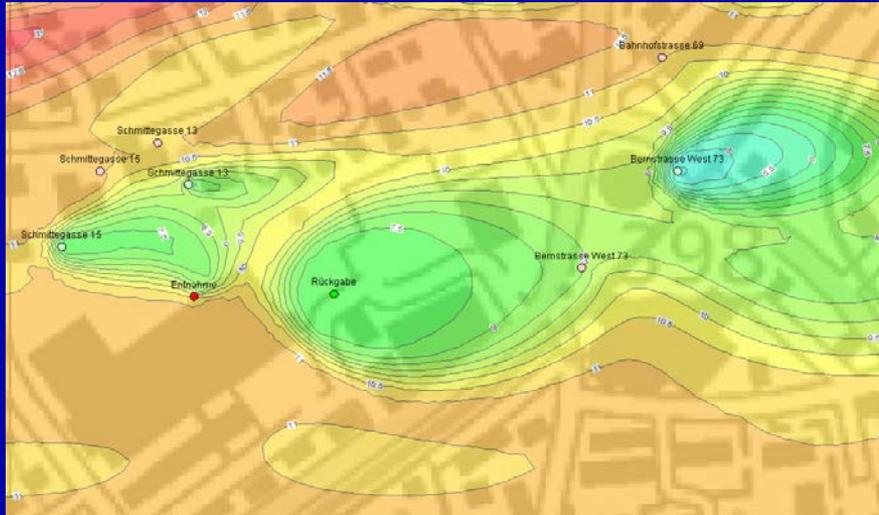
- Rückkopplung
- breite konstante Fahne



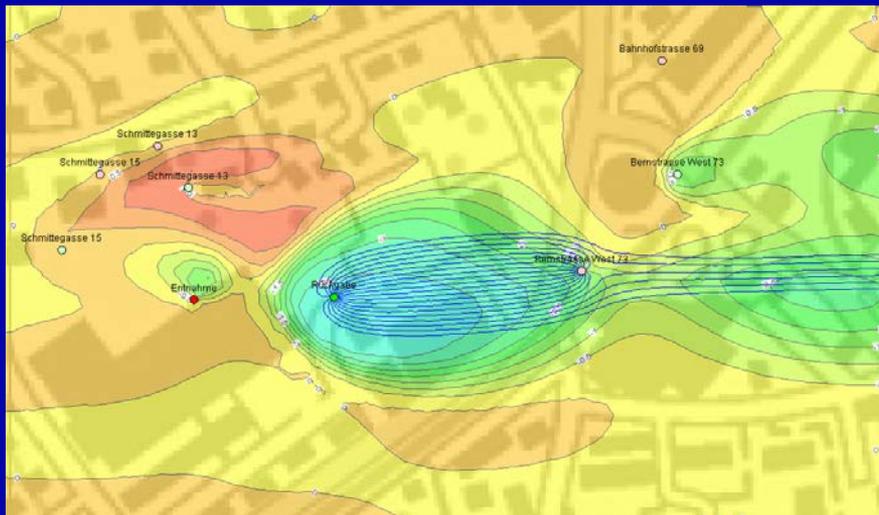
Temperaturdifferenz zur Referenz ohne Anlage

Ganglinie der Temperatur 100 m im Abstrom

Gegenseitige Abhängigkeiten der Anlagen



Prognostizierte Temperatur mit Anlage



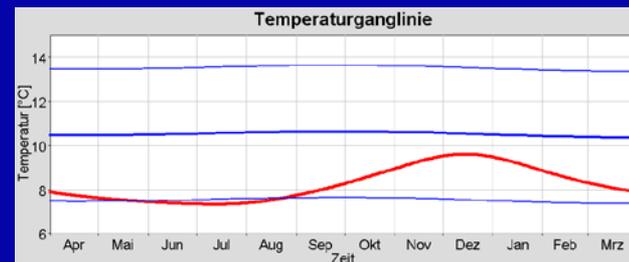
Temperaturdifferenz zur Referenz ohne Anlage

Anlage im Anstrom

- Kältefahne wird von der Entnahme angezogen

Anlage im Abstrom

- Anlage wird beeinflusst
- Kettenreaktion
- Bei mehr als zwei Anlagen nicht mehr trivial
- Komplex bei Wärme- und Kältenutzung



Ganglinie der Temperatur 100 m im Abstrom

Anforderungen an die Modellierung

Korrekte Nachbildung der Strömungssituation

- Wärmefahne ist sensitiv auf Durchlässigkeit und Gefälle
- Beeinflussung ist sensitiv auf Strömungsrichtung

Instationär

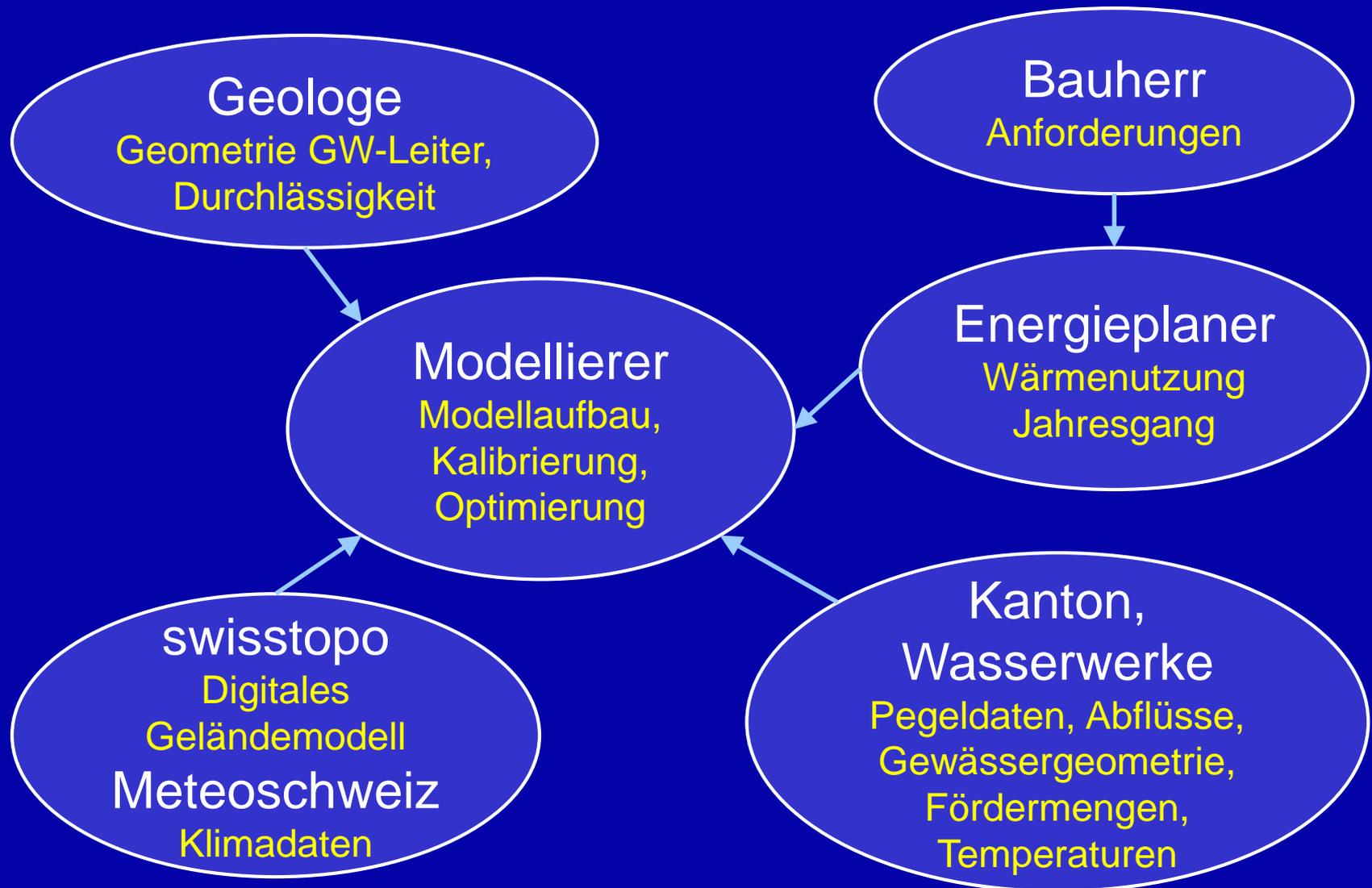
- Jahresgang der Wärme- und Kältenutzung
- Jahresgang der Randbedingungen (Atmosphäre, Gewässer)

Berücksichtigung der Nachbaranlagen

- Bei kombinierten Kälte- und Wärmenutzungen sind günstige und ungünstige Beeinflussungen möglich

Ausgangsdaten der Modellierung

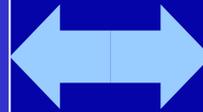
Was braucht es für die Modellierung?



Technische Umsetzung

Strömungsmodell

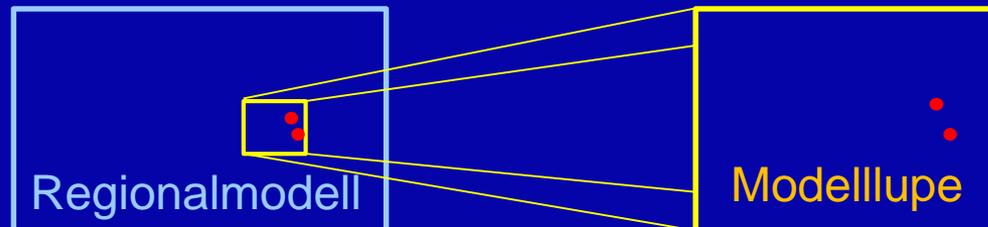
- Sinnvolle Randbedingungen in grosser Entfernung
- Zur Kalibrierung benötigte Pegel nur grossräumig vorhanden



Transportmodell

- Zur Vermeidung numerischer Dispersion benötigt man ein feines Netz
- Projekt meistens kleinräumig

- Lokale Modellverfeinerung
- Modellverschachtelung



Beispiel Kühlnutzung

Vorgaben des Kunden:

- Kühlnutzung 560 MWh/a
- Erwärmung um 6 °C
- Vorgegebene Flächen für Entnahme und Versickerung

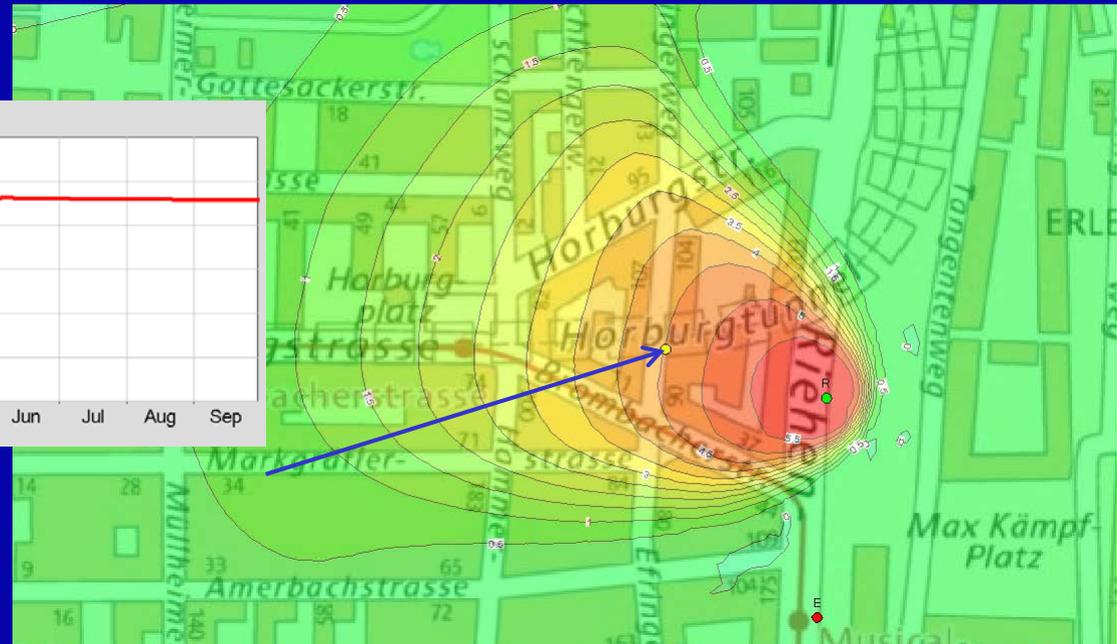
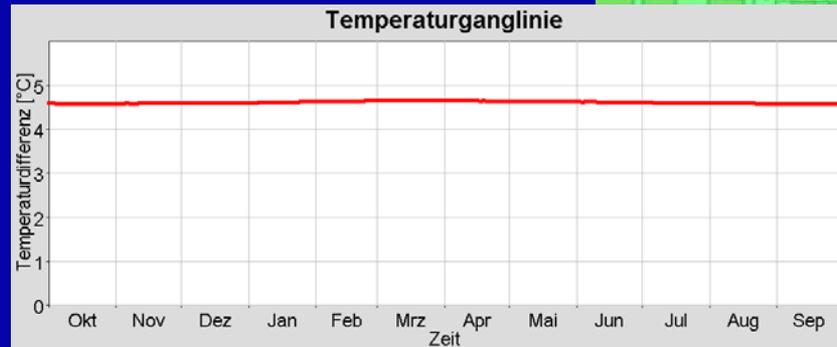
Problematik:

- Die Grundwassertemperatur beträgt bereits 13 °C
- In der Umgebung sind 2 grosse Kühlnutzungen konzessioniert
- Die Erwärmung in 100 m Distanz darf max. 2.5 °C betragen

Optimierung:

- Anordnung der Brunnen?
- Temperaturdifferenz?
- Maximale Kühlnutzung?

Simulation Ausgangsprojekt



Problematik:

- Hohe Entnahmen im Anstrom verflachen Grundwasserspiegel am Projektstandort

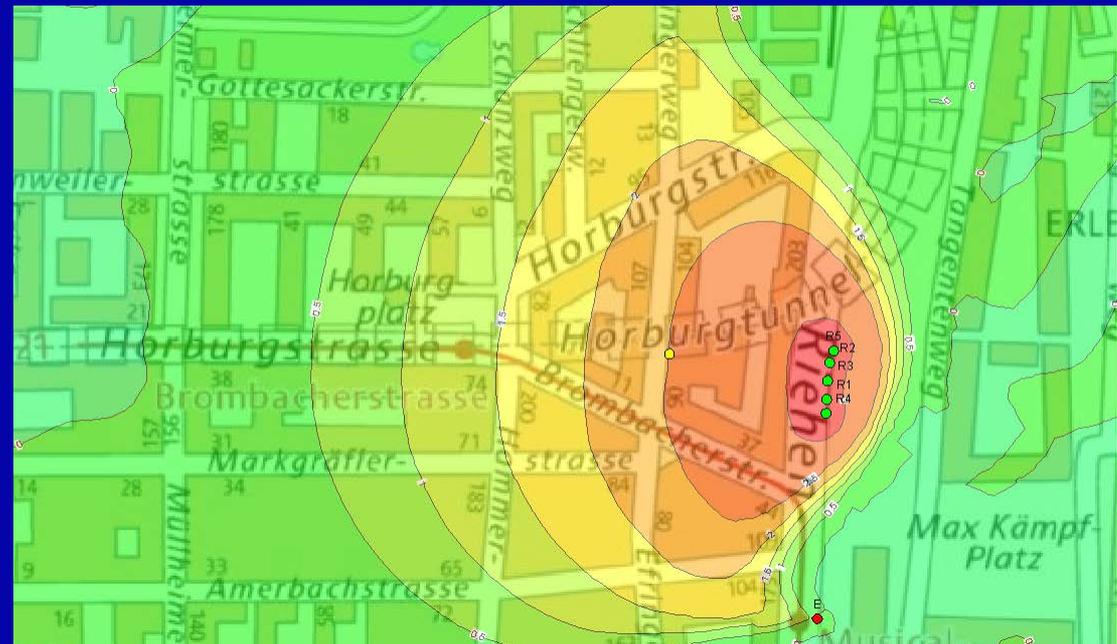
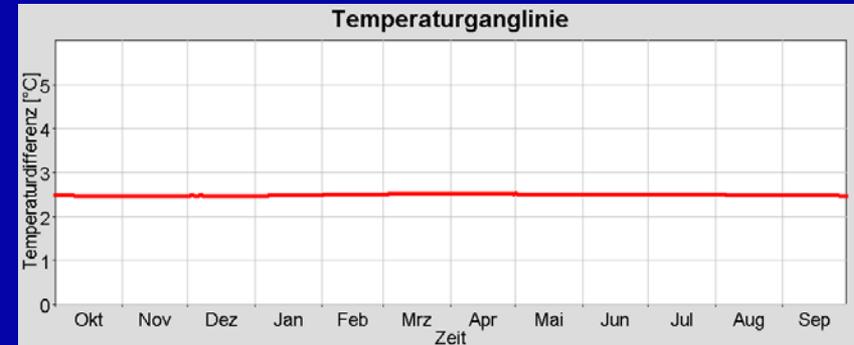
Simulationsergebnisse:

- Temperaturdifferenz im Abstrom 4.5 °C
- Anforderungen nicht erfüllbar mit ΔT von 6 °C

Optimierung mit etwa 10 Rechenläufen

Optimierte Anlage:

- Nur 90% der Kühlnutzung
 - Rückgabe in Brunnenreihe
 - Temperaturdifferenz 3 °C
- Anforderungen erfüllbar



Temperaturdifferenz zur Referenz ohne Anlage

Beispiel Wärme- und Kühlnutzung

Vorgaben des Kunden:

- Wärme und Kühlnutzung je ca. 600 MWh/a
- Abkühlung um 4 °C, Erwärmung um 3 °C
- 2 Objekte mit unterschiedlichem Jahresgang der Nutzung

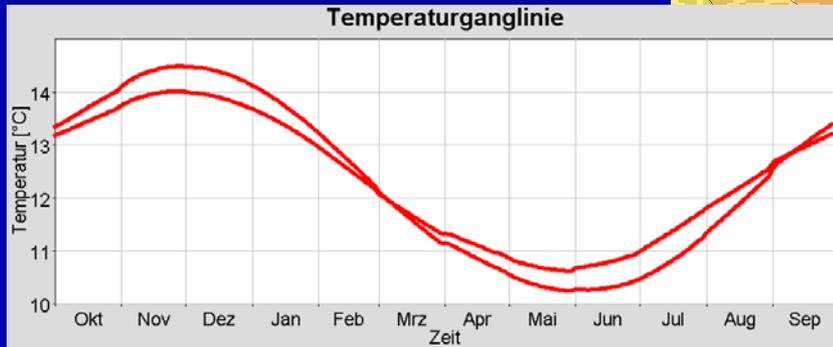
Problematik:

- Die Grundwassertemperatur beträgt bereits über 12 °C
 - Die Erwärmung in 100 m Distanz darf max. 3 °C von der natürlichen Temperatur (ca. 11 °C) abweichen
- Kühlnutzung problematisch

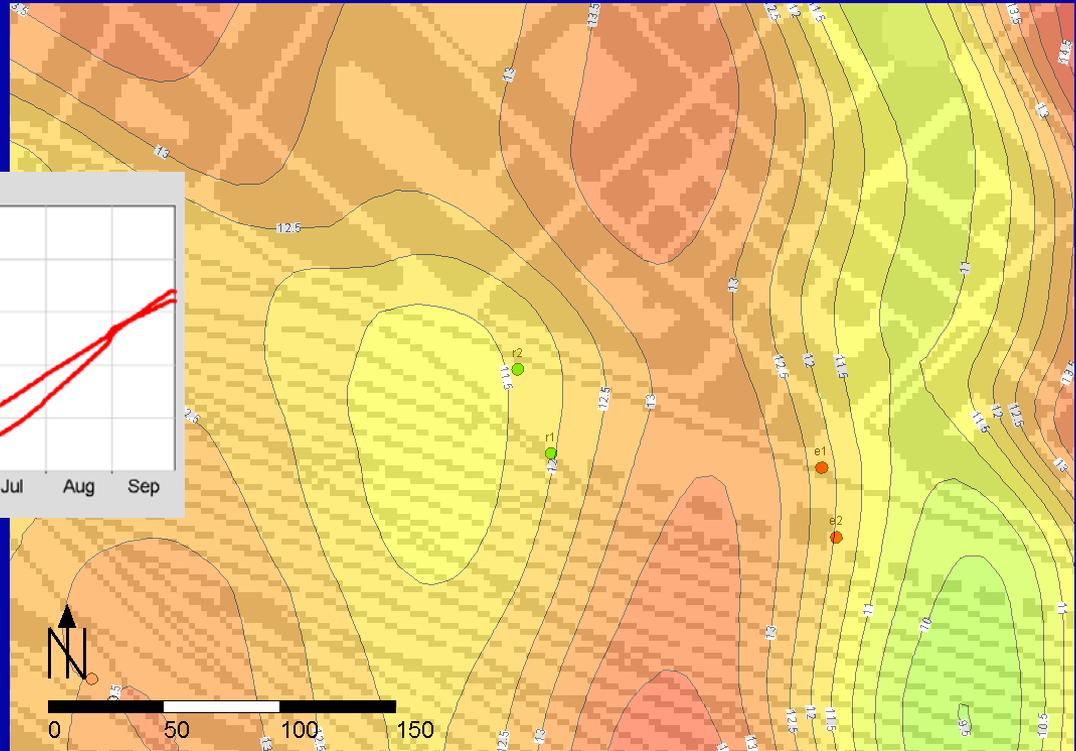
Optimierung:

- Anordnung der Brunnen?
- Maximale Kühlnutzung?

Situation



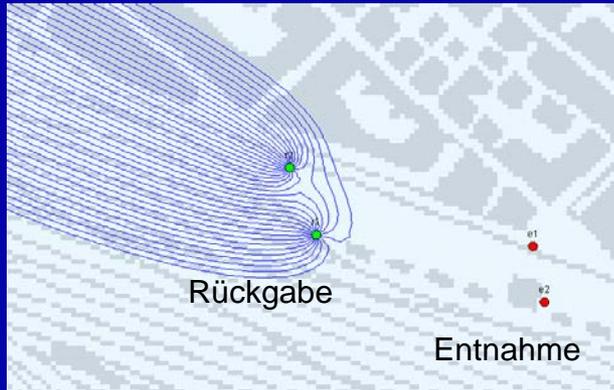
Temperaturganglinie Istzustand



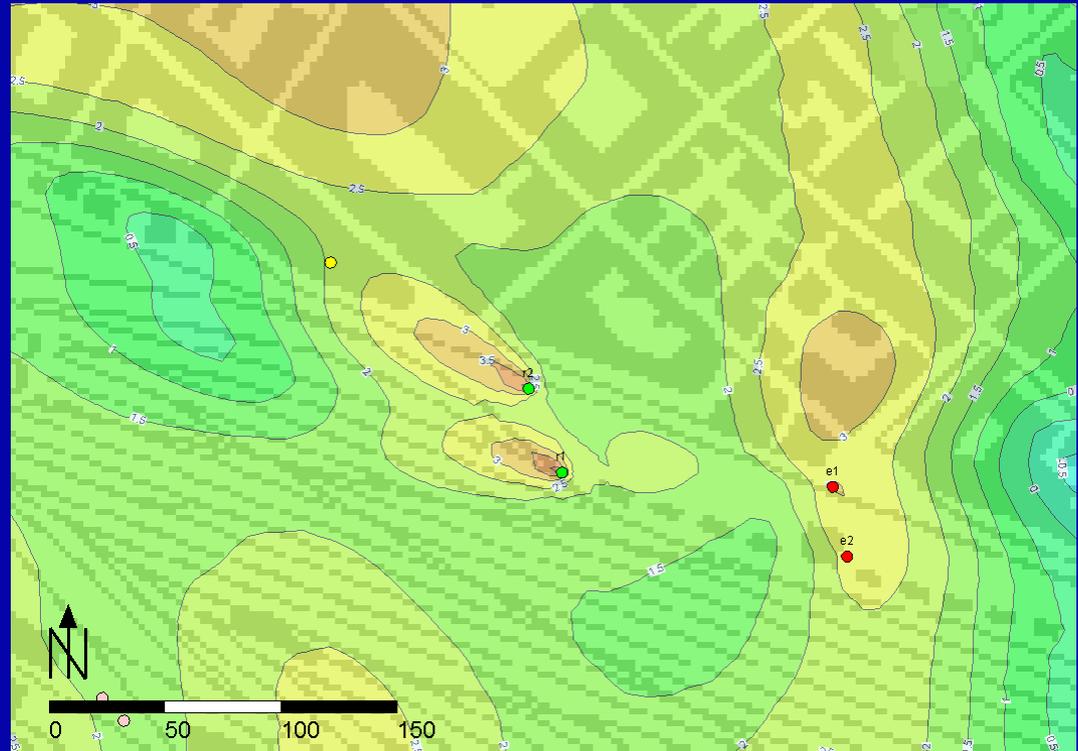
Besonderheit:

- Die Grundwassertemperatur ist vom nahen Gewässer beeinflusst und weist einen verschobenen Jahresgang auf
- Im Anstrom befindet sich eine Wärmenutzung, die den Jahresgang verstärkt

Optimierte Lösung 1: Entnahme im Anstrom

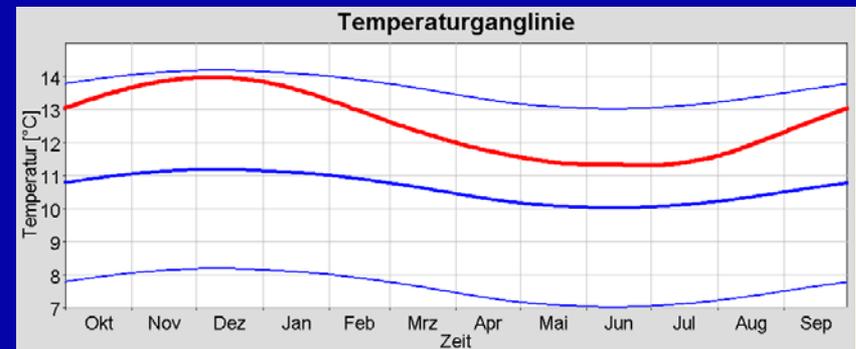


Anordnung der Brunnen

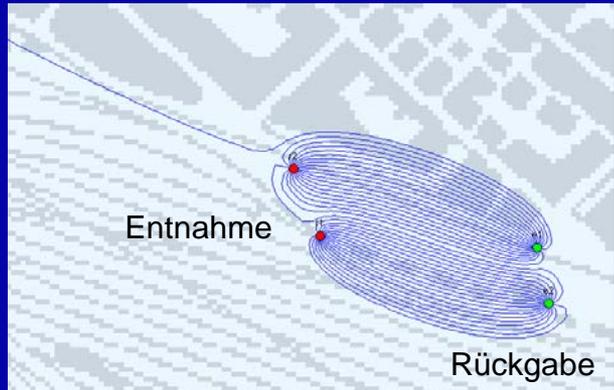


Optimierung:

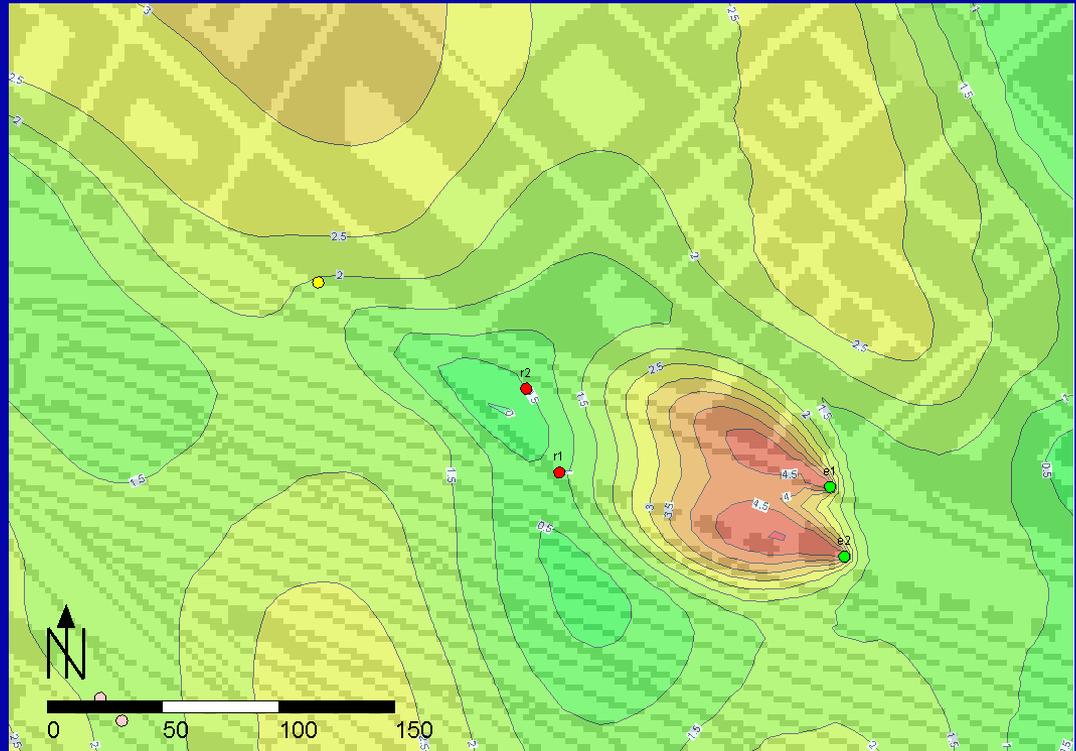
- Kühles Wasser entnehmen im Sommer
- Warmes Wasser im Winter
- Anforderungen erfüllbar



Optimierte Lösung 2: Entnahme im Abstrom

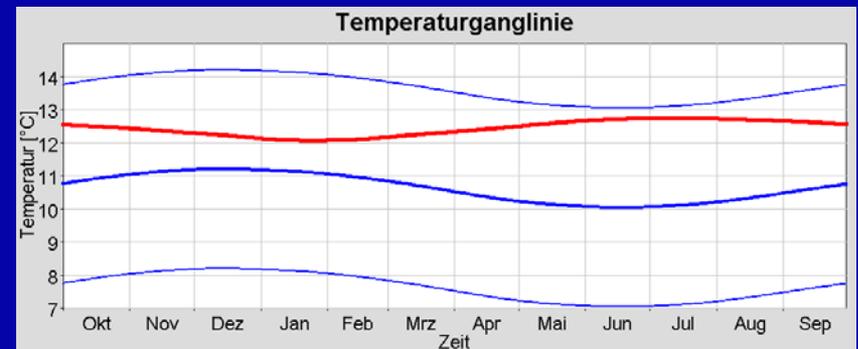


Anordnung der Brunnen



Optimierung:

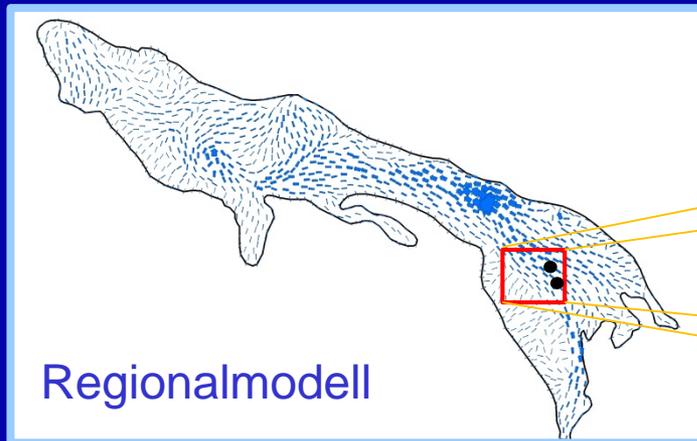
- Fast geschlossener Kreislauf
 - Grundwasser als saisonaler Wärmespeicher genutzt
- Anforderungen erfüllbar



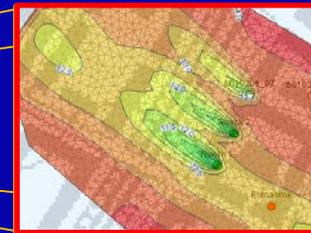
Limmattal, GEM-Tool

GEM-TOOL

- Eingabe der Anlage
- Umriss und Ausrichtung der Modelllupe
- Erzeugung des Finite-Elemente Netz
- Randbedingung aus Regionalmodell
- Darstellung der Resultate



Modelllupe

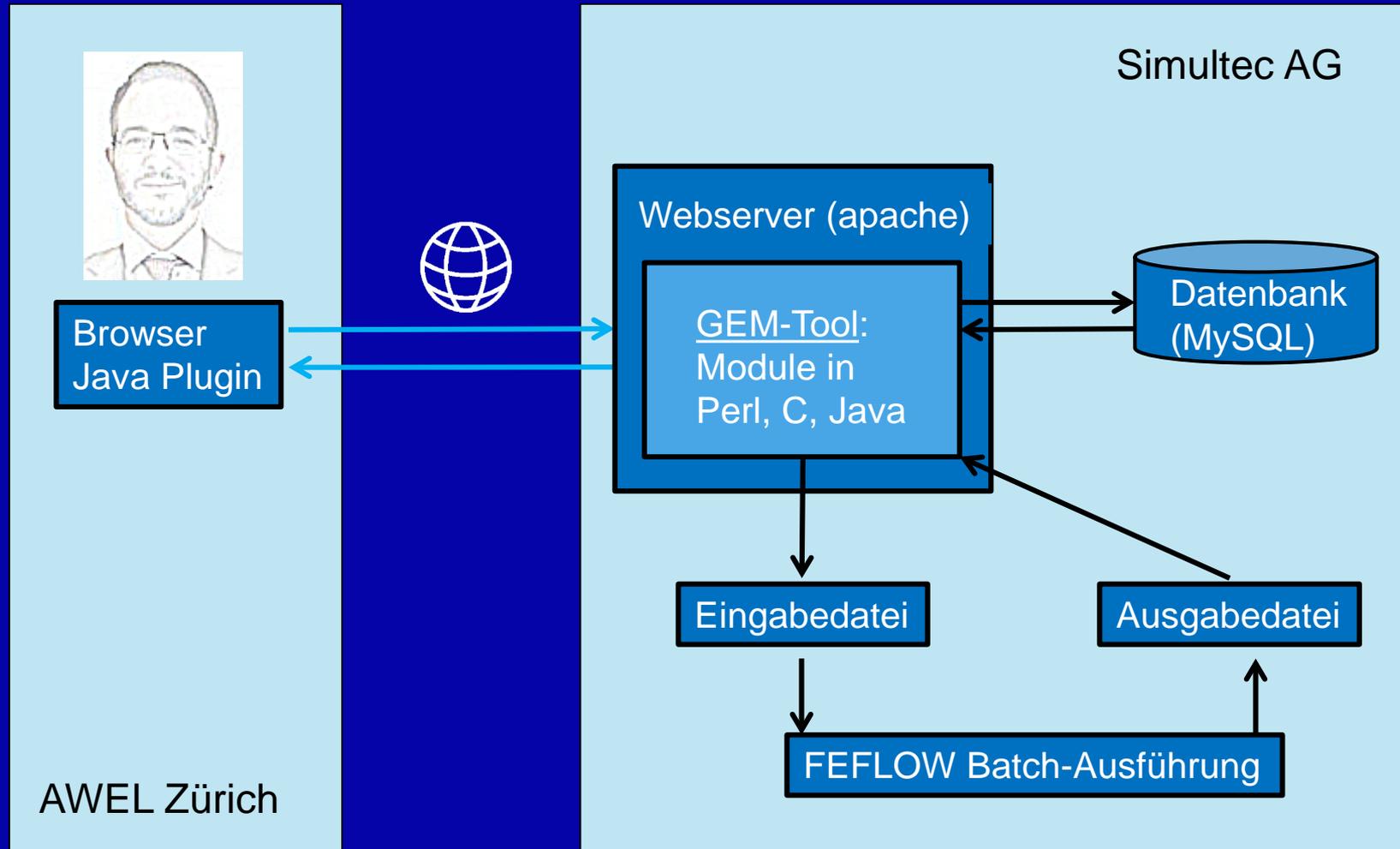


FEFLOW

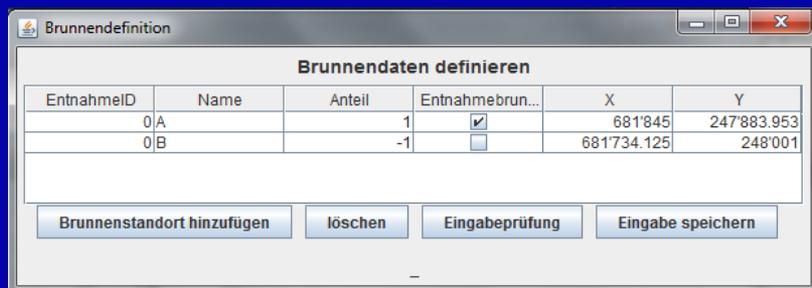
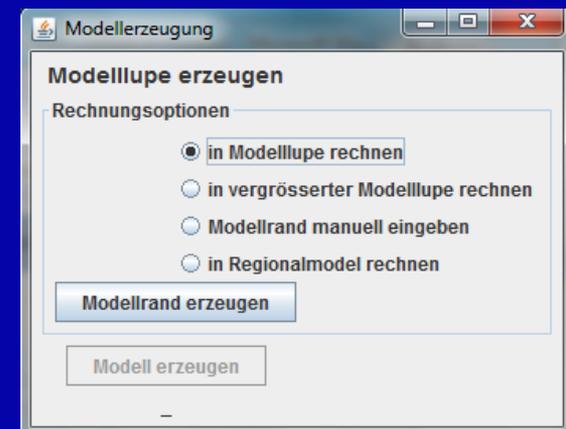
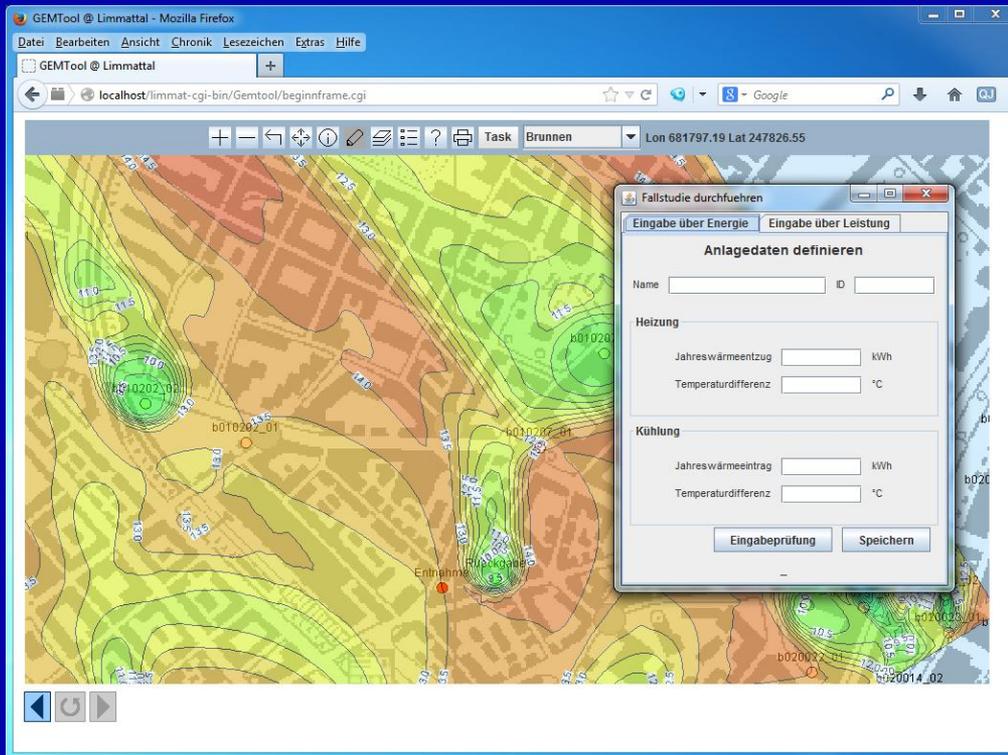
Strömung
Wärmetransport regional

Strömung
Wärmetransport detailliert
Rechenzeit ca. 1 Stunde

GEM-Tool: Software-Architektur



GEM-Tool: Bedienungs Oberfläche



Danke für die Aufmerksamkeit Fragen?



Realisiert mit Unterstützung des Simultec-Teams