

WEBBASIERTE GEODATEN- UND KOMMUNIKATIONSINFRASTRUKTUR FÜR DIE ANALYSE GEOTHERMISCHER ENERGIESYSTEME AUF GEBÄUDE- UND STADTQUARTIERSEBENE

Ralf Becker, Marius Laska, Jörg Blankenbach

Zusammenfassung: Mit zunehmender Nutzung geothermischer Energie soll ein wesentlicher Beitrag zur Transformation der Energiebeschaffung im Zuge der Energiewende hin zu den erneuerbaren Energien geleistet werden. Die Planung von Energieversorgungssystemen auf der Basis der oberflächennahen Geothermie bedarf jedoch der dezidierten Analyse des Energiebedarfs von Gebäuden, gekoppelt mit dem energetischen Angebot im Untergrund. Die Entnahme von Energie aus dem Untergrund erzeugt zudem Wechselwirkungen mit anderen geothermischen Anlagen oder der Grundwasserströmung. Diese Aspekte werden heute in der Planung und Bemessung oberflächennaher geothermischer Anlagen nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Im Forschungsprojekt GeTIS wurde daher ein webbasiertes Geothermisches Informationssystem zur Bemessung, Modellierung, Bewertung und Genehmigung vernetzter geothermischer Energiesysteme auf Gebäude- und Stadtquartiersebene entwickelt. In diesem Beitrag werden ausgewählte Aspekte der für GeTIS aufgebauten Geodaten- und Kommunikationsinfrastruktur beschrieben.

Schlüsselwörter: Geodateninfrastruktur, Kommunikationsinfrastruktur, Web Processing Service, geologisches Schichtenmodell, Geschossanzahlermittlung

WEB-BASED SPATIAL DATA AND COMMUNICATION INFRASTRUCTURE FOR THE ANALYSIS OF GEOTHERMAL ENERGY SYSTEMS AT BUILDING AND DISTRICT LEVEL

Abstract: Increasing use of geothermal energy is intended to make a significant contribution to the transformation of energy procurement in the course of the energy transition towards renewable energies. However, the planning of energy supply systems based on near-surface geothermal energy requires a decided analysis of the energy demand of buildings, coupled with the energy supply in the subsurface. The extraction of energy from the subsurface also generates interactions with other geothermal systems or groundwater flow. Today, these aspects are not or insufficiently considered in the planning and design of near-surface geothermal plants. Therefore, in the research project GeTIS, a web-based geothermal information system was developed for the design, modeling, evaluation and approval of interconnected geothermal energy systems on building and urban district level. This paper describes different aspects of the communication and spatial data infrastructure built for GeTIS.

Keywords: Spatial Data Infrastructure, communication infrastructure, Web Processing Service, structural geological model, storey determination

Autoren

Dr.-Ing. Ralf Becker

M. Sc. Marius Laska

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach

RWTH Aachen University

Geodätisches Institut und Lehrstuhl für

Bauinformatik & Geoinformationssysteme

Mies-van-der-Rohe-Str. 1

D-52074 Aachen

E: ralf.becker@gia.rwth-aachen.de

marius.laska@gia.rwth-aachen.de

blankenbach@gia.rwth-aachen.de

1 EINFÜHRUNG

Die Nutzung geothermischer Energie kann neben anderen erneuerbaren Energieträgern, wie z. B. Wind- und Sonnenenergie, einen bedeutenden Beitrag zur Erreichung der nationalen und europäischen Ziele im Zuge der Energiewende leisten, um anthropogene, energiebedingte Treibhausgasemissionen in Deutschland weiter zu reduzieren. Die im Untergrund gespeicherte Energie kann vor allem in der Kälte- und Wärmeversorgung von Gebäuden genutzt werden. Für die Planung, Genehmigung und den Betrieb geothermischer Anlagen ergeben sich aufgrund ihrer Komplexität jedoch hohe Unsicherheiten. Entscheidungen beruhen i. d. R. auf empirischen Befunden, die aus einer einzelnen Bohrlochmessung generiert werden. Wechselwirkungen mit anderen geothermischen Anlagen oder der Grundwasserströmung werden teilweise nicht oder nur stark vereinfacht in einem Nachweis abgebildet, der die Realität unzureichend wiedergibt. Weiterhin fehlt eine Systematik, mit der energetische Wechselwirkungen zwischen Stadtquartier und geothermischen Anlagen ganzheitlich betrachtet werden können. Die Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen und die Kopplung der Energiebedarfe in den Stadtquartieren mit den oberflächennahen geothermischen Anlagen und dem energetischen Angebot und Verhalten im Untergrund verspricht bei Vorhandensein einer geeigneten konsistenten Datengrundlage in einem räumlichen Informationssystem eine deutliche Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit, der Planungs- und Genehmigungssicherheit sowie des Betriebs oberflächennaher geothermischer Systeme.

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (vormals Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWi) geförderte Forschungsprojekt „GeTIS“ an der RWTH Aachen sollte diese Lücke schließen. GeTIS ist ein Geothermisches Informationssystem zur Bemessung, Modellierung, Bewertung und Genehmigung vernetzter oberflächennaher geothermischer Energiesysteme auf Gebäude- und Stadtquartiersebene (van Treeck et al. 2020). Ziel von GeTIS war die Konzeption und Implementierung eines webbasierten offenen Informationssystems, das Fachplannern und Behörden als einheitliche Datengrundlage für die genannten Zwecke dienen soll.

Für die Bemessung und Modellierung eines oberflächennahen geothermischen Systems sind verschiedene Berechnungen bzw. Simulationen zu den Energiebedarfen in Abhängigkeit der Gebäudeauslegung und der Umgebungsdaten (z. B. Wetter) wie auch der Erdwärmesondenauslegung in Abhängigkeit zur hydrogeologischen Untergrundsituation sowie deren Wechselwirkungen und Kopplung erforderlich. Die Berechnungs- und Simulationswerkzeuge benötigen jedoch eine geeignete und den Anforderungen entsprechende (Geo-)Datenbasis, die über GeTIS zur Verfügung gestellt werden sollte. Die benötigten Daten stammen aus unterschiedlichen, heterogenen, teilweise inhaltlich nicht hinreichenden Datenquellen und sollten jederzeit möglichst aktuell und bedarfsgesteuert über standardisierte Schnittstellen bereitgestellt werden. Gleichzeitig bedarf es einer grafischen Nutzeroberfläche, mit der die verschiedenen Berechnungen und Simulationen gesteuert bzw. ausgelöst und die Ergebnisse visualisiert werden können. Die hierfür zu entwickelnde Geodaten- und Kommunikationsinfrastruktur mit dem zugehörigen Geoportal als Nutzeroberfläche war im Projekt der Arbeitsschwerpunkt des Geodätischen Instituts und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme (gia).

Im Beitrag sollen daher ausgewählte Aspekte der Geodaten- und Kommunikationsinfrastruktur von GeTIS beschrieben werden. Neben dem allgemeinen Aufbau des Informationssystems werden daher die automatische Ermittlung der Geschossanzahl, die 3D-Visualisierung des Untergrunds sowie die interoperable Anbindung der Berechnungs- und Simulationswerkzeuge dargestellt. Die detaillierte Beschreibung der teilweise komplexen geothermischen Berechnungen und Simulationen liegen dabei nicht im Fokus des Beitrags. Hierzu sei u. a. auf Düber et al. (2019) und Weck-Ponten et al. (2018) verwiesen.

Der Beitrag ist wie folgt gegliedert: Nach einem Überblick über bereits existierende Geothermische Informationssysteme und Geodateninfrastrukturen (Abschnitt 2) wird zunächst der Aufbau der entwickelten Geodaten- und Kommunikationsinfrastruktur von GeTIS mit Geodatenbanken und webbasierten Geoportal beschrieben. Die Schnittstelle zum Nutzer (Fachplaner, Prüfer der Genehmigungsbehörde), welche mittels eines webbasierten Geoportals re-

alisiert wurde, erlaubt die Betrachtung der zugrunde liegenden Umgebungs- und die Festlegung der notwendigen Eingangsdaten zur Dimensionierung und Parametrisierung oberflächennaher geothermischer Anlagen sowie das Anstoßen der Berechnungen und Simulationen inklusive der Visualisierung der Ergebnisse. Ein wesentlicher Teil der Eingangsdaten ist der geologische Untergrund, für den eine 3D-Visualisierung für den Webportalnutzer entwickelt wurde. Vielfach liegen benötigte Eingangsdaten im Sinne der energetischen Berechnungs- und Simulationstools unvollständig vor (z. B. die Gebäudenutzfläche bzw. Nettogrundfläche, die Anzahl der Geschosse oder das Baujahr), lassen sich aber anhand der zur Verfügung stehenden Daten (z. B. der City-GML-Gebäudedaten oder der Zensus-Erhebung) in einer ersten Näherung abschätzen. Daher wurden im Projekt Methodiken entwickelt, um verschiedene Parameter automatisch aus den verfügbaren Daten abzuleiten. Intensiver untersucht wurde dabei die Ableitung von Geschossanzahlen (Abschnitt 3). Der vollständige Workflow zur Planung einer geothermischen Anlage umfasst eine Vielzahl von rechenintensiven Prozessen (u. a. die verschiedenen energetischen Berechnungen und Simulationen, aber auch die bildanalysebasierte Geschossanzahlermittlung). Diese sollen physisch vom Geoportal entkoppelt sein, um damit größtmögliche horizontale Skalierbarkeit zu gewährleisten. Abschnitt 4 behandelt deshalb die Bereitstellung der Berechnungs-/Simulationswerkzeuge als standardisierte Geo-Webdienste basierend auf dem Web-Processing-Service-(WPS-)Standard.

Geoinformationssysteme (GIS) dienen zur Erfassung, Verwaltung, Analyse sowie Visualisierung raumbezogener Daten (Geodaten) und werden für verschiedenste fachspezifische Zwecke und Anwendungen eingesetzt (vgl. u. a. Bill 2016). Mit Geodateninfrastrukturen (GDI) stehen heute webbasierte Möglichkeiten bereit, die über Geoportale einen zentralen Zugang zu Geodaten und standardisierten Geodiensten, neben Basisdaten auch thematisch gruppiert, bereitstellen (vgl. u. a. Schleyer et al. 2014). GDIs können dabei auch domänen- bzw. anwendungsspezifisch sein (vgl. u. a. Lehfeldt & Melles 2018, GDI-WSV¹, Herlé et al. 2016) und neben 2D- auch 3D- und 4D-Daten (vgl. u. a. Gabriel et al. 2012) umfassen.

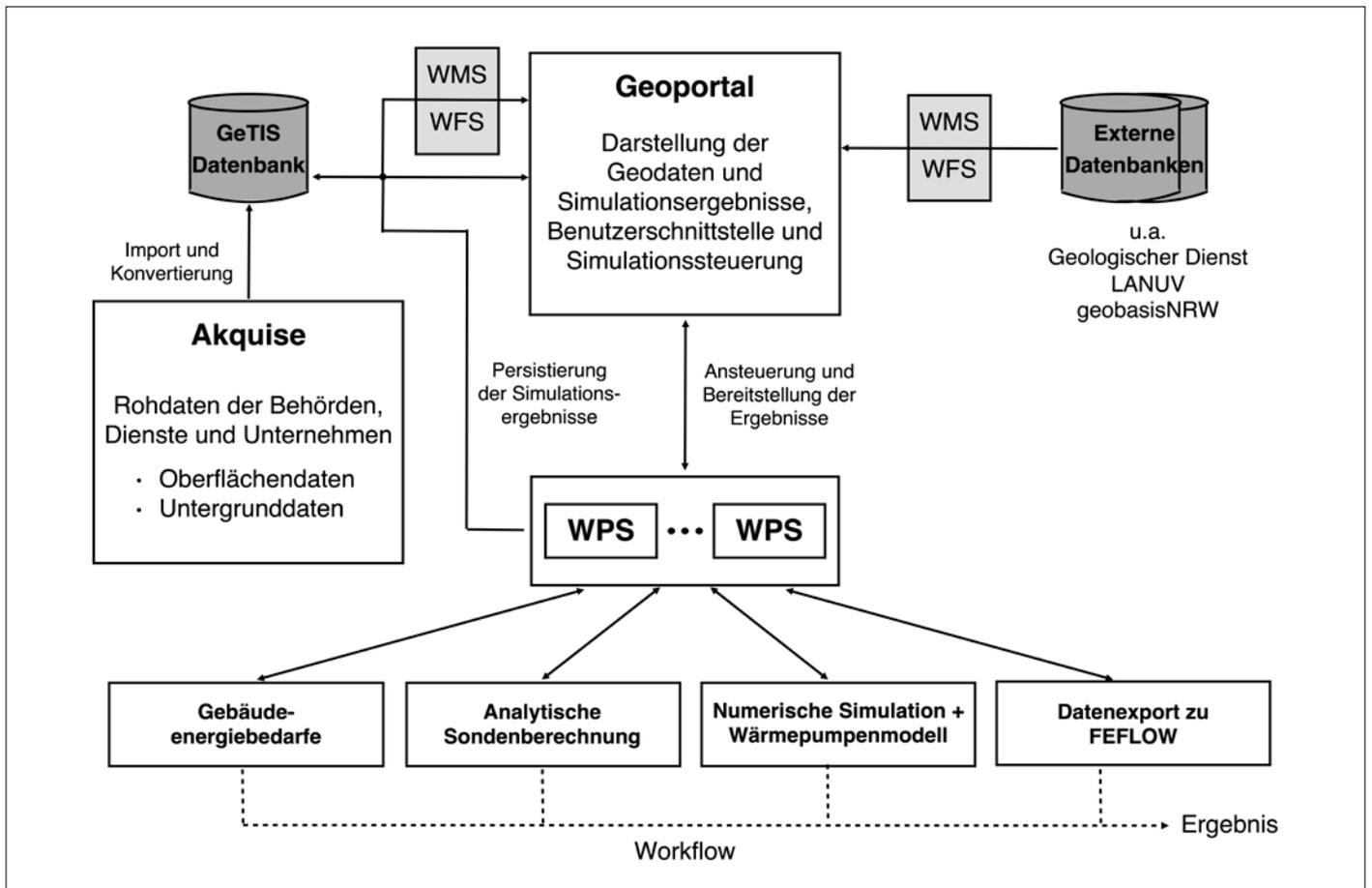


Abbildung 1: Geodaten- und Kommunikationsstruktur des Projekts GeTIS

Zur Geothermie betreiben die deutschen Bundesländer jeweils für ihren Zuständigkeitsbereich unterschiedliche Informationsdienste. „Geothermie in NRW“² ist beispielsweise ein webbasiertes Auskunftssystem für geothermische Ergiebigkeit in Tiefen bis zu 100 m. Die Informationen (vordefinierte, ortsbezogene Standardauswertungen) werden in sogenannten Standortchecks für Erdwärmekollektoren bzw. Erdwärmesonden zusammengestellt.

Im Rahmen von Forschungsprojekten wurden bereits vereinzelt Informationsportale für Geothermie wie GeotIS (Agemar et al. 2014), die IHFC Global Heat Flow Database (Fuchs et al. 2021) und das Projekt zur „Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich (Anlagenpotenzial)“ (Jochem et al. 2017) in Deutschland oder ThermoMap in der Europäischen Union (Bertermann et al. 2013) entwickelt. Das Geothermische Informationssystem „GeotIS“ legt seinen Fokus auf die tiefe Geothermie und in der aktuellen Ausbaustufe ausschließlich auf hydrogeothermische Systeme (vgl. GeotIS Endbericht 2009 und GeotIS Endbericht 2013).

Das System bietet dafür eine Zusammenstellung von Daten und Informationen über tiefe Grundwasserleiter in Deutschland, die für eine geothermische Nutzung infrage kommen. Boden- und Untergrundtemperaturen sind soweit es die Datenlage zulässt für ganz Deutschland abrufbar. Das deutschlandweite 3D-Temperaturmodell basiert auf gemessenen Temperaturen und umfasst den Bereich von der Oberfläche bis 5.000 m unter NHN. Die Gitterpunktabstände betragen in der Horizontalen 2.000 m und in der Vertikalen 100 m. Aufgrund dieser vergleichsweise geringen räumlichen Auflösung und der unterschiedlichen Zielsetzung stellte GeotIS für das Projekt GeTIS nur eine eingeschränkte Datengrundlage für die tiefe Geothermie dar, die für die speziellen Bedürfnisse der oberflächennahen Geothermie noch adaptiert und erweitert werden müsste. Seit 2021 wird GeotIS in einem neuen Forschungsprojekt ArtemIS³ aktualisiert und für die mitteltiefe Geothermie ergänzt. Methoden der künstlichen Intelligenz und des Deep Learnings sollen zur Bohrdatenerfassung und -analyse genutzt werden. Die IHFC Global Heat Flow Database lie-

fert Wärmefluss-Daten, welche über das Geoportal einsehbar sind und über diverse Schnittstellen (.shp) bereitgestellt werden. Allerdings haben die Daten eine zu geringe räumliche Auflösung, um als Datengrundlage in GeTIS integriert zu werden. Das Projekt zur Ableitung von Anlagenpotenzialen befasst sich mit der modellgestützten, raum aufgelösten Quantifizierung der Potenziale erneuerbarer Energien im deutschen Gebäudebestand und der Darstellung von Kombinationsmöglichkeiten dieser Potenziale und der daraus folgenden Grenzen. Für eine Standortbewertung für Erdwärmekollektoren lief bis 2013 das EU-Forschungsprogramm „ThermoMap“. Hier wurde auf Basis von Boden- und Grundwasserdaten eine „Online-Landkarte“ für die geothermische Nutzung des Untergrunds mithilfe von Erdwärmekollektoren oder anderen oberflächennahen Systemen (bis in 10 m Tiefe) mit einer Skala von 1: 250.000 europaweit erstellt. Die große Schwierigkeit lag hierbei bei der Harmonisierung der verschiedenen Datensätze aus den verschiedenen EU-Staaten. Hier sind großflächig Daten zum Bodentyp, zur Wärmeleitfähigkeit und zum Kli-

ma (Niederschlag, mittlere Lufttemperatur) abrufbar. Die Karte ist jedoch eher als „Standort Check“ und nicht als Bemessungsgrundlage für oberflächennahe Systeme, die tiefer als 10 m reichen, zu bewerten.

Die genannten Anwendungen beschränken sich zudem vielfach auf die Visualisierung und den Datenabruf und betrachten ausschließlich die Geologie. Die im Projekt GeTIS angestrebte Verknüpfung mit Gebäude- bzw. Quartiersinformationen sowie die Anbindung komplexer Berechnungs- und Simulationswerkzeuge zur Bestimmung gebäude- oder quartierspezifischen Energiebedarfe gekoppelt mit dem geothermisch-energetischen Angebot für die oberflächennahe Geothermie wurde bisher nicht betrachtet.

2 GETIS-GEODATEN- UND KOMMUNIKATIONSINFRASTRUKTUR

Die Geodaten- und Kommunikationsinfrastruktur mit einem Geoportals als Benutzeroberfläche (Abbildung 1) ist das zentrale Element von GeTIS. Hier werden alle notwendigen Daten bereitgestellt und miteinander verknüpft, die verschiedenen Berech-

nungswerkzeuge angestoßen und die Ergebnisse präsentiert.

2.1 DATENGRUNDLAGEN UND SCHNITTSTELLEN

Die Berechnungswerkzeuge von GeTIS (Gebäudeenergiebedarfsberechnung, Analytische Sondenberechnung, Numerische Simulation und Wärmepumpenmodell, Datenexport zu FEFLOW) benötigen unterschiedliche Eingangsdaten, die zunächst aggregiert werden müssen. Dies sind einerseits hydrogeologische Daten des Untergrunds und andererseits Daten der Gebäude von Stadtquartieren. Dafür werden verschiedenste relevante Daten mit Raumbezug in einer webbasierten GIS-Umgebung bereitgestellt. Die Art des Datenzugriffs hängt von der Art der Bereitstellung durch den Datenanbieter ab. Favorisiert werden die Datenzugriffsmethoden der Open Web Services (OWS) des Open Geospatial Consortiums (OGC). Während der Kartendienst Web Map Service (WMS) und der Web Feature Service (WFS) hauptsächlich für die Informationsabfrage von Raster- und Vektordaten genutzt werden, bietet der

WPS die Möglichkeit, Berechnungen serverseitig auszuführen und die Ergebnisse zurückzuliefern. Die Nutzerschnittstelle ist das browserbasierte Geoportals (Abbildung 2). Der Nutzer hat die Möglichkeit, die diversen Daten in einem einheitlichen System zu betrachten, Konfigurationen für die Berechnungen in einer Benutzeroberfläche anzugeben und die verschiedenen Berechnungen als WPS auszuführen. Die Offline-Simulation wird lokal beim Fachplaner/Experten mithilfe der Software FEFLOW⁴ ausgeführt. Die notwendigen Eingangsdaten können über das Geoportals zusammengestellt und abgerufen werden.

Die Umsetzung der GeTIS-Geodaten- und Kommunikationsinfrastruktur basiert auf den folgenden Technologien und Softwareframeworks:

- ▶ openLayers v3: Kartenvisualisierung
- ▶ jQuery mit der Erweiterung AJAX (Asynchronous JavaScript and XML): asynchrone Datenübertragung zwischen Browser und Server über HTTP-Anfragen genutzt
- ▶ Vuetify und Vuex: Teile des Frontends des Geoportals

Abbildung 2: Benutzeroberfläche des GeTIS-Geoportals

- ▶ WebGL: 3D-Schichtvisualisierung
- ▶ GeoTIFF-Parser: Bereitstellung der Grundwasserdaten
- ▶ GeoServer: Speicherung und Bereitstellung von Geodaten über Webdienste (Geodienste)
- ▶ PostgreSQL: Speicherung von Geo- (CityGML-Daten, geologische Daten) und Nutzer-/Sessionsdaten
- ▶ PyWPS: Implementierung der WPS-Schnittstelle
- ▶ Rabbit MQ: Message-Broker für asynchrone Kommunikation

Die Geodateninfrastruktur von GeTIS erlaubt einen beständigen und übersichtlichen Zugriff auf die diversen benötigten Daten. Soweit möglich, werden existierende und nutzbare Onlinedatenbestände Dritter über standardisierte OWS-Schnittstellen an das Informationssystem angebunden, z. B. Geobasisdaten. Dadurch ist die Aktualität der verwendeten Datenbestände stets gewährleistet.

Nicht alle relevanten Daten des Vorhabens können allerdings mittels OWS eingebunden werden, beispielsweise bei Nutzungsbeschränkungen oder bei Datenbeständen ohne Webservice-Schnittstelle wie bei den hydrogeologischen Daten. Die Daten ohne originäre OWS-Schnittstelle wurden daher in eine eigene GeTIS-Datenbank

überführt. Der Zugriff durch das Geoportal erfolgt teils über eigenerstellte OWS, teils durch direkten Zugriff auf die GeTIS-Datenbank. In der GeTIS-Datenbank sind die Daten im amtlichen Raumbezugssystem ETRS89/UTM der deutschen Landesvermessung abgelegt. Falls Daten in anderen Raumbezugssystemen vorliegen, werden sie vor der Migration in die Datenbank nach ETRS89/UTM transformiert. Zur Gewährleistung der Datenkonsistenz wurde beim integrativen Datenmodell von GeTIS die Struktur bestehender Datenmodelle übernommen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die angebotenen Daten.

Einige Informationen sind in den zur Verfügung stehenden Daten nicht oder nicht hinreichend vorhanden (z. B. Gebäudebaujahre, Geschossanzahlen). Daher werden Parameter, wie z. B. das Gebäudebaujahr oder die Geschossanzahl, auf der Basis der vorhandenen Daten (z. B. Zensus, CityGML) abgeschätzt (siehe auch Abschnitt 3). Das Geoportal bietet dem Nutzer zudem die Möglichkeit, fehlende Werte zu ergänzen. Alle Eingaben in den Benutzermasken des Geoportals werden in einem separaten Datenbankschema gesichert, damit die originären Datensätze nicht verändert werden. In Verbindung mit einem Benutzerzugriffs- und Sitzungsmodell können die Me-

tadaten (z. B. Eingangsparameter und Startzeitpunkte der durchgeführten Simulationen und zum Teil auch deren Ergebnisse) auf diese Weise Benutzer- oder Sitzungsbezogen vorgehalten werden. Das Ziel dieses Schemas ist es, Nutzerzugriffe auf Metainformationen, Eingangsparameter der Simulationen und Ergebnisse vorheriger Sitzungen zu ermöglichen. Der Vergleich zwischen Simulationen mit unterschiedlichen Randbedingungen ist dadurch einfach und schnell möglich. Schließlich werden über die Benutzeroberfläche auch die in GeTIS integrierten Berechnungs- und Simulationstools ausgelöst.

2.2 BEREITSTELLUNG UND 3D-VISUALISIERUNG DES GEOLOGISCHEN SCHICHTENAUFBAUS

Der geologische Aufbau des Untergrunds ist eine wesentliche Eingangsgröße für die untergrundbezogenen Berechnungs- und Simulationstools. Während im Geoportal bereits ein 2D-Kartenviewer integriert ist, wurde zur Visualisierung des Schichtenaufbaus ein eigener 3D-Viewer implementiert.

Die Anwendung der 3D-Geodatenvisualisierung findet bisher meist nicht in Web-Umgebungen statt und erfordert eine hohe Rechenleistung. So implementierten Kaufmann & Martin (2008) ein geologi-

Daten	Schnittstelle	Datenbereitstellung
Geologischer Schichtenaufbau	WPS	Eigener Geodienst (PyWPS) auf GeTIS-Datenbank
Grundwassergleichen im Rheinischen Braunkohlenrevier	WMS (GeoTIFF)	Eigener Geodienst (GeoServer) bzw. GeoTIFF-Parser auf eigenem Fileserver
Zensus-Daten	WMS	Eigener Geodienst (GeoServer) auf GeTIS-Datenbank
Wetterdaten	Direkte Anbindung (openLayers)	GeTIS-Datenbank
CityGML-Gebäude	Direkte Anbindung (openLayers)	GeTIS-Datenbank
Schrägluftbilder	Direkte Anbindung (openLayers)	Eigener Fileserver
Geobasisdaten (Topographie, Liegenschaftskataster), Luftbilder, Digitales Geländemodell, Historische Karten, Historische Luftbilder	WMS, WFS	Online (Geodienste Geobasis NRW)
Grundwasserstände und -flurabstände von 1988, Wasserschutzgebiete, Grundwassermessstellen	WMS	Online (Geodienst LANUV)
Digitales Geländemodell	WMS	Online (Geodienst BKG)
Bohrungen, Potenzialflächen für Geothermie	WMS	Online (Geodienst Geologischer Dienst NRW)

Tabelle 1: Verwendete Daten und Schnittstellen

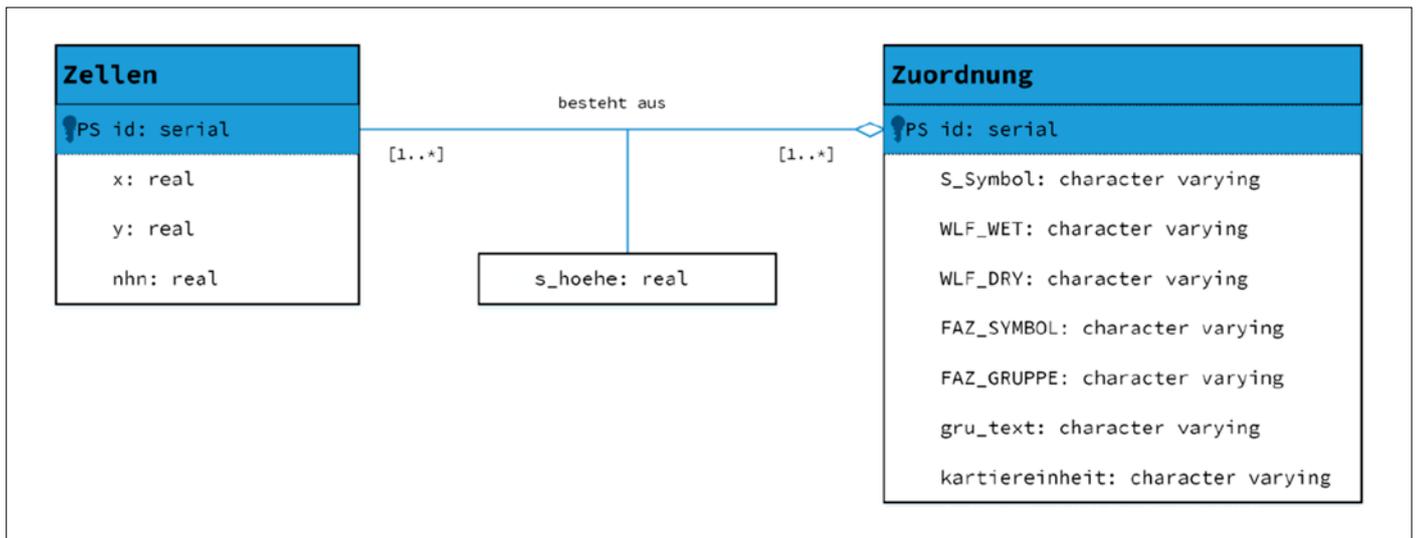


Abbildung 3: Datenstruktur des Schichtenaufbaus

sches 3D-Modellierungssystem, das auf ArcGIS als Geoinformationssystem, GOCAD als Geomodellierer und einer Datenbank basiert. McCarthy et al. (2006) entwarfen mithilfe der 3D-Viewer-Software ArcScene einen Bohrlochdatenmodellierer, welcher die 3D-Visualisierung von kleinen Untergrundorganisationen ohne strenge Anforderungen an die Datenstruktur unterstützt. Im Vergleich zu früheren 2D-Karten wurde eine lebendigere Umgebung geschaffen, die ein besseres Verständnis des Untergrunds ermöglicht.

Die Daten zum geologischen Schichtenaufbau wurden für GeTIS mangels eines Online-Dienstes seitens des Datenbereitstellers offline vom Geologischen Dienst im SHP-Format bezogen und in einem eigens entwickelten Datenschema in der GeTIS-Datenbank abgelegt. Die Datenstruktur des Schichtenaufbaus ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Entität *Zellen* enthält die Lagekoordinaten der einzelnen Zellen als Attribute *x* und *y* sowie die Höheninformationen aus dem digitalen Höhenmodell (Attribut *nhn*) in den amtlichen Koordinatenreferenzsystemen (Lage: ETRS, Höhe: NHN). Die Entität *Zuordnung* enthält neben der Bezeichnung und Beschreibung alle geologisch relevanten Informationen der einzelnen, seitens des Geologischen Dienstes definierten geologischen Bodenschichtenarten. Die Bodenschichtenarten und die Schichtmächtigkeiten (*s_hoehe*) sind den regelmäßig verteilten Zellen über Relationen zugeordnet.

Für den Zugriff und die Visualisierung des Schichtenaufbaus spezifiziert der Nutzer zunächst die räumliche Begrenzung des

relevanten Gebiets mithilfe einer Bounding Box im Kartenviewer des Geoportals. Die definierte Bounding Box wird anschließend in eine WPS-Anfrage (siehe Abschnitt 4.1) übersetzt und an den WPS gesendet. Der WPS fragt die Datenbank ab und generiert ein XML-Dokument mit den Daten zum Schichtenaufbau, das anschließend für die Berechnungs- und auch Visualisierungswerkzeuge bereitgestellt wird. Die anlassbezogene und gebietspezifische Visualisierung der dreidimensionalen geologischen Schichtenverteilung zur Unterstützung des Nutzers bei der Vorbereitung der automatisierten Berechnungen erfolgt als 3D-Visualisierung im webbasierten Geoportal. Der Ablauf ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

Zur Schaffung einer webbasierten Lösung im Rahmen des Projekts GeTIS wird die JavaScript-Bibliothek WebGL (Web Graphics Library) (Khronos Group 2013) genutzt. WebGL ist eine plattformunabhängige JavaScript-Programmierschnittstelle, die eine Darstellung von dreidimensionalen Inhalten innerhalb von Webseiten der Auszeichnungssprache HTML5 ermöglicht. Diese Schnittstelle ermöglicht es, dreidimensionale Inhalte des Webbrowsers auf der Grafikeinheit des lokalen Computers, also auf Hardwareebene, zu berechnen und im Webbrowser darstellen zu lassen. Dieses Vorgehen bietet die Möglichkeit, die geologischen Daten in jeder gewünschten Ansicht in einem Webbrowserfenster direkt zu visualisieren und dadurch die Mächtigkeit und Bodenart jeder einzelnen geologischen Schicht des Untergrundmodells zu betrachten. Entscheidende Aspekte bei einer Web-

GL-Anwendung sind die Geometrie, die Schattierung (einschließlich Material und Licht), die Kamera und die Projektion. Die basierend auf der Bounding Box durch den WPS bereitgestellten Daten im XML-Format werden in die für die WebGL-Visualisierung notwendige Dreiecksvermaschung überführt und anhand projektiver Transformationen aufgrund der Nutzeraktion im Webbrowser (Translationen, Rotationen) in die jeweilige Betrachtungsebene abgebildet. Zur Herstellung der Dreiecksvermaschung werden aus dem Datenmodell der Geologiedatenbank aus der regelmäßigen Zellstruktur für die Lagekoordinaten und der attributiven Informationen zu Schichtmächtigkeit und Schichtart flächenhafte Schichtgrenzen gebildet und vermascht. In Teilbereichen nicht vorhandener Schichten werden Schichten der Mächtigkeit null gebildet, sodass sich alle Schichten über den kompletten Bounding-Box-Ausschnitt erstrecken. Abbildung 5 zeigt beispielhaft ein Schichtenmodell im Webbrowser.

3 AUTOMATISIERTE BESTIMMUNG DER GESCHOSSANZAHL

Für Analysen und Simulationen an Gebäuden (z. B. des Energiebedarfs) ist neben den bauphysikalischen Parametern die bauliche Struktur des Gebäudes von großer Bedeutung. Die bauliche Struktur eines Gebäudes ist durch Parameter wie die Ausmaße der Kubatur, differenziert nach Dachflächen und ober- bzw. unterirdischen Wänden, aber auch die Anzahl und die Höhe der Geschosse sowie daraus resultierende Maße, wie z. B. die Bruttogrundfläche, gekenn-

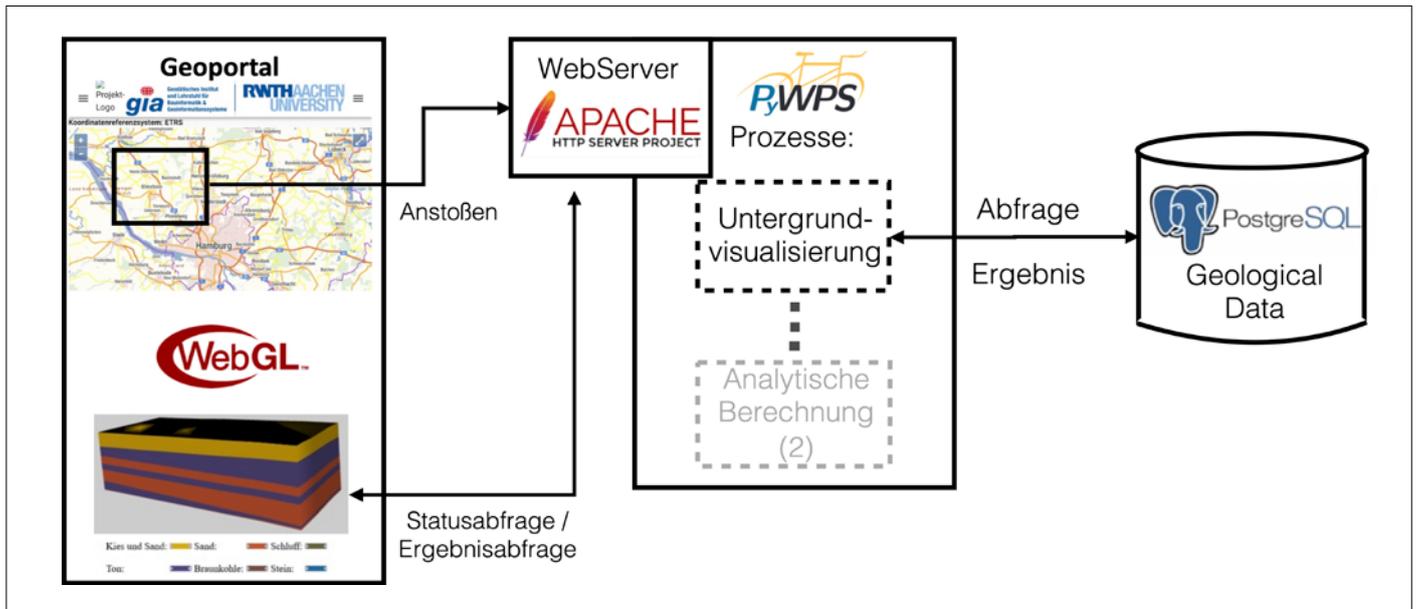


Abbildung 4: Bereitstellung und 3D-Visualisierung des geologischen Schichtenaufbaus – schematischer Ablauf

zeichnet. Diese Parameter dienen neben anderen als Eingangsparameter für energetische Simulationen von Gebäuden. Die Software „TEASER (Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit)“⁵, welche für dynamische Gebäudesimulationen bei geringer Informationsdichte eingesetzt wird (Weck-Ponten et al. 2018), verwendet für die Simulation an Gebäuden grundlegend die Parameter Gebäudenutzung, Baujahr, Nettoflächen, durchschnittliche Geschosshöhe und auch die Anzahl der Geschosse. Verlässliche Daten zu diesen Parametern (u. a. die Anzahl der Geschosse) liegen bei bestehenden Gebäuden – so

weit der Eigentümer oder Besitzer nicht beteiligt ist – vielfach nicht vor. Hilfe leisten könnten möglichst automatisierte Analysen vorhandener Daten. Ein wesentlicher Parameter unter den genannten ist die Anzahl der Geschosse. Zwar ist die Angabe in den inzwischen im Bundesgebiet flächendeckend behördlicherseits bereitgestellten 3D-Gebäudedatensätzen im CityGML-Format in der Detaillierungsstufe LOD2 vorgesehen, jedoch selten gefüllt. Vorhanden ist in diesen Daten die Geometrie der äußeren Geometrie der Gebäude. Als weitere mögliche Quelle zur Ableitung der Geschossanzahlen wurden Schrägluftbilder, welche die

Gebäudefassaden und mithin die Fenster in ausreichender Auflösung zeigen, identifiziert.

3.1 BISHERIGE VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER ANZAHL VON GESCHOSSEN

Die Anzahl der Geschosse wird bisher meist für den Einzelfall manuell aus eigenem Wissen, ggf. vorhandenen Plänen oder vor Ort im Angesicht des Gebäudes bestimmt. Auf vereinfachte Weise kann die Anzahl der Geschosse auch aus den geometrischen Eigenschaften und anderen Attributen eines Gebäudes abgeschätzt werden. Die Ermittlung der Anzahl der Geschosse erfolgt beispielsweise gemäß SIG3D (2011) anhand von Gebäudefunktion, Gebäudealter und einer daraus resultierenden angenommenen Geschosshöhe. Zunehmend stehen jedoch auch Bilder von Gebäudefassaden (z. B. Schrägluftbilder) zur Verfügung. Aus der Anzahl der übereinanderliegenden Fensterreihen lässt sich auf die Anzahl der Geschosse schließen.

Die Erkennung von Fenstern durch Kantenextraktion in Bildern von Bodenaufnahmen wurde bereits von Lee & Nevatia (2004) vorgeschlagen. Die extrahierten Kanten wurden mithilfe von Längen-, Richtungs- und Randbedingungen gefiltert, um die Fenster zu erkennen. Ihre Lösung zeigt vor allem bei vielgeschossigen Wohngebäuden mit regelmäßigen Fassaden und somit vielen Fenster(reihe)n gute Ergebnisse. Cech & Sara (2008) verwenden eine Ma-

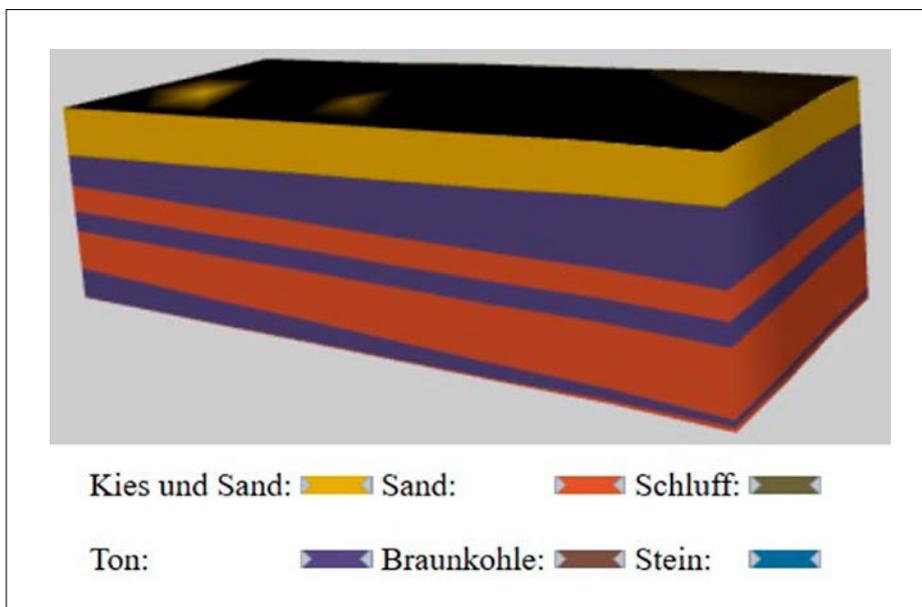


Abbildung 5: Geologisches Schichtenmodell im Webbrowser

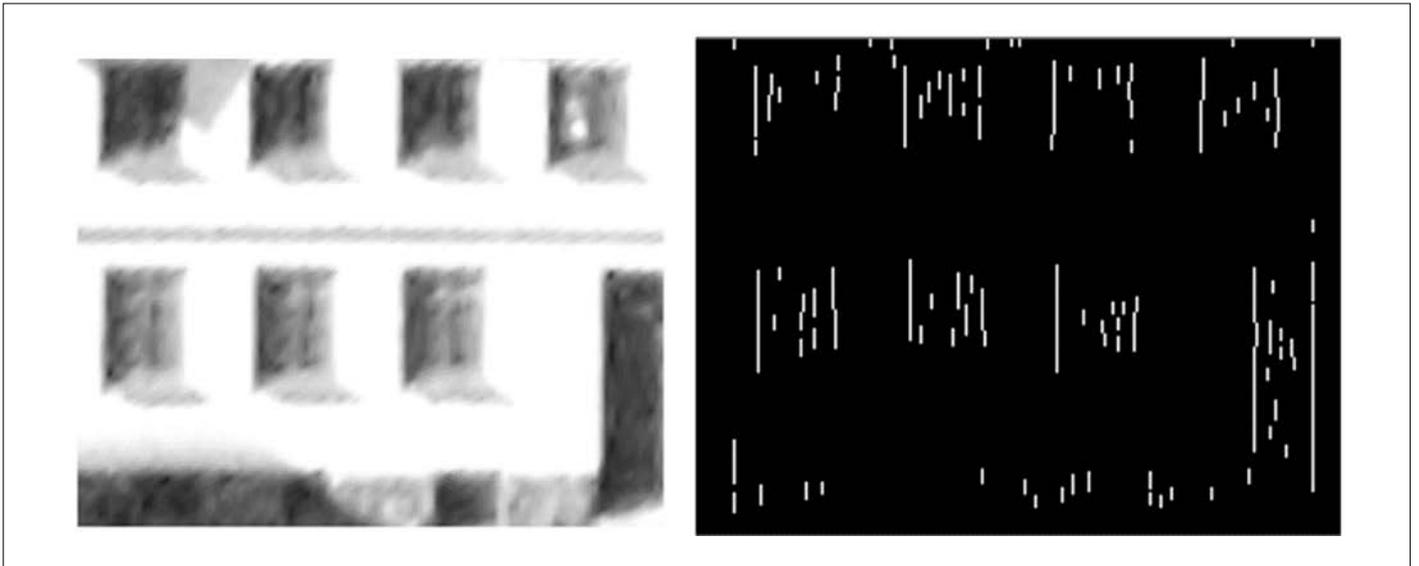


Abbildung 6: Kantenextraktion (eigene Darstellung, Bild: Stadt Soest)

ximum-a-posteriori-Schätzung zum Labeling von einzelnen Pixeln, um Fensterscheiben in Bildern von Fassaden zu identifizieren. Auch sie verwenden eher mehrgeschossige Gebäude mit langen Fensterreihen. Wenzel & Förstner (2008) schlagen zur Erkennung von Fenstern und anderen Objekten in Fassaden ein Clustering-Verfahren vor, welches anhand prototypischer Objekte vergleicht und klassifiziert. Mit zusätzlichem Einsatz von hochauflösenden LIDAR-Daten (Laserscanning) hat Becker (2009) Geschosse und Fenster von Gebäuden identifiziert. Unter Verwendung von senkrecht zur Erdoberfläche aufgenommenen Luftbildern haben Meixner & Leberl (2011) durch Erkennung der Kanten von Fenstern und die Korrelation zwischen Fensterreihen und Geschossen auf die Anzahl der Geschosse von Gebäuden geschlossen. Auch sie zeigen Gebäude mit vielen Geschossen und langen Fensterreihen.

3.2 AUTOMATISIERTE GESCHOSSANZAHLBESTIMMUNG AUS SCHRÄGLUFTBILDERN GEKOPPELT MIT DATEN AUS 3D-GEBÄUDEMODELLEN

Kern des für GeTIS entwickelten Ansatzes ist die automatisierte Bildanalyse gekoppelt mit Daten aus 3D-Gebäudemodellen im CityGML und Zusatzinformation, wie z. B. Straßenverläufen in Bezug zu Gebäuden aus topographischen Daten, wie z. B. OpenStreetMap (OSM). OSM ist und war Bestandteil vieler Untersuchungen zur Analyse von Geoinformationen und die Genauigkeit der

Daten insbesondere im Hinblick auf die Straßen wurden z. B. von Ming et al. (2013) weitgehend bestätigt.

Ein wesentlicher Punkt bei der Kopplung von 3D-Gebäudemodellen und Luftbilddaten ist zunächst die Identifikation des im Bild benötigten, die Gebäudefassade darstellenden Bildausschnitts. Der räumlich-geometrische Zusammenhang zwischen den zweidimensionalen Bildkoordinaten und den dreidimensionalen Objektkoordinaten wird durch die Kollinearitätsgleichungen (vgl. z. B. Witte et al. 2020, S. 395-421) beschrieben. Bei bekannter äußerer Orientierung der Kamera sowie der Kenntnis der Kameraparameter (innere Orientierung) lassen sich die aus dem Gebäudemodell bekannten Eckpunkte der Fassade in die Bildebene der Kameraaufnahme übertragen und sich der entsprechende Bildausschnitt bestimmen und entzerren. Wesentlich für die Anwendung einer einheitlichen Analysestrategie und Bewertung der Ergebnisse sind gleiche Voraussetzungen in den Eingangsbilddaten. Dazu werden die Bildausschnitte hinsichtlich der Auflösung, Kontrast und Helligkeit normiert. Kontrast und Helligkeit werden anhand der Entropie des Bilds eingestellt und das Bildrauschen wird reduziert. Die Entropie ist ein Maß für den Informationsgehalt des Bilds (Szeliski 2011). Günstig sind Bilder ohne Belaubung, da dann genügend Sicht auf die Fassade gewährleistet ist.

Das im Wesentlichen genutzte Prinzip zur Bestimmung der Anzahl der Geschosse ist – bereits bei Meixner & Leberl (2011)

und Lee & Nevatia (2004) angewendet – die Zählung der senkrecht übereinander liegenden Bereiche, in denen viele senkrechte Kanten in den Bildern erkannt werden, welche die dunkel erscheinenden Fensterflächen von der daneben befindlichen hell erscheinenden Hausfassade abgrenzen. Je mehr Fenster in einer Fassade nebeneinanderliegen, desto mehr Kanten sind zu erwarten. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis einer solchen Kantenextraktion. Für das Ergebnis der Kantenextraktion wird ein Histogramm erzeugt (Abbildung 7), das die Anzahl der Kantenpixel je Bildzeile darstellt.

Zu erwarten wäre ein Histogramm, das in Zeilen, die Fenster enthalten, doppelt so viele Kantenpixel wie Fenster (jeweils linke und rechte Seite der Fenster) ausweist. Tatsächlich zeigen sich lokale Minima und Maxima, da auch viele andere im Bild vorhandene Objekte Kanten erzeugen. Durch Anwendung eines Glättungsfilters werden kleine Minima und Maxima herausgefiltert. Obere und untere Ränder der Fenster werden allerdings unscharf. Die Verwendbarkeit und Aussagekraft der geglätteten Funktion hängt entscheidend von den Parametern des Glättungsfilters ab. Dazu wird automatisiert iterativ nach einem besten Maß der Glättung je Bildausschnitt gesucht. Als Randbedingungen für die iterative Wiederholung fungieren einerseits plausible Schranken für die durchschnittliche Geschosshöhe im Gebäude, die sich aus Erfahrungswerten ableiten lassen, und andererseits werden zwei Parameter eingeführt, welche ausdrücken sollen, wie wahrschein-

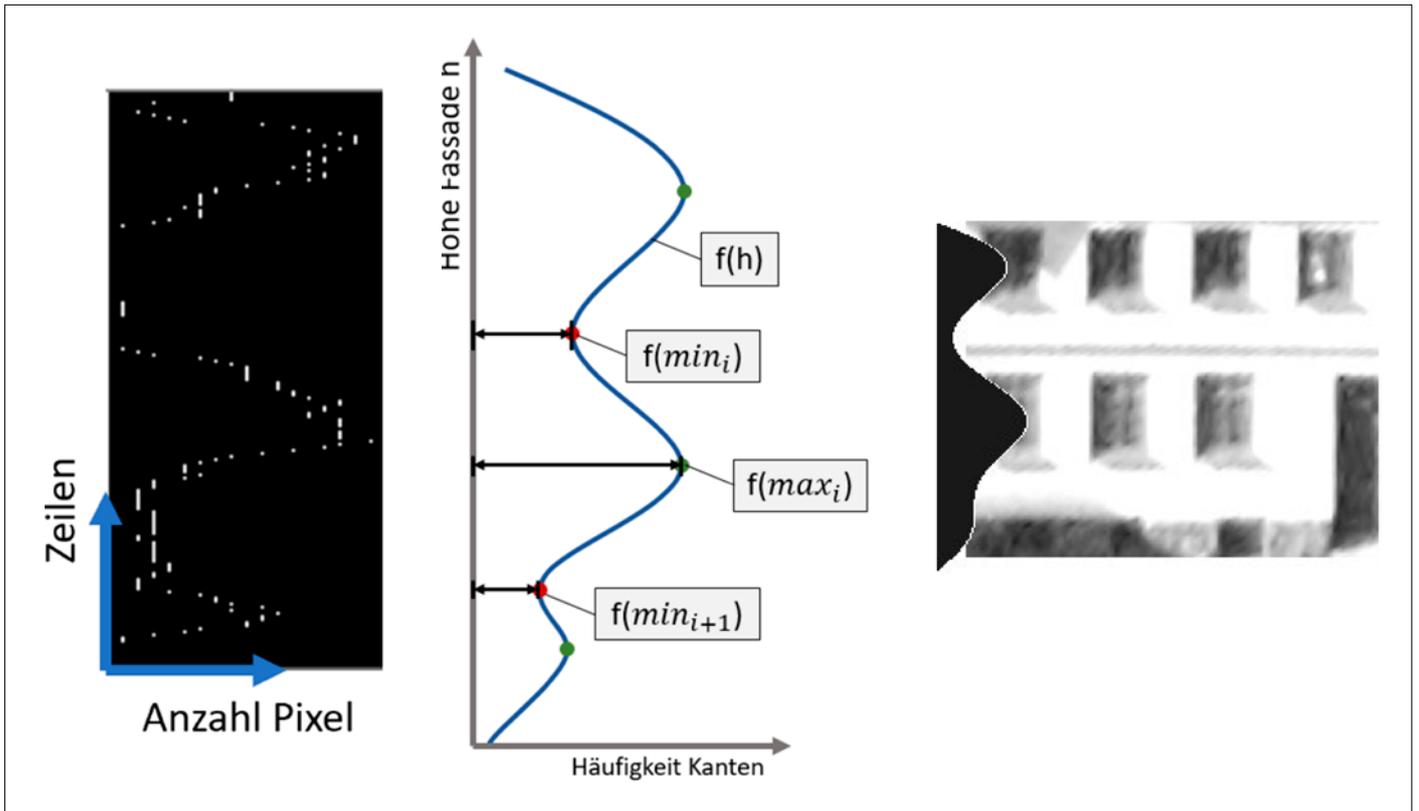


Abbildung 7: Histogramm der Kantenpixel je Zeile (eigene Darstellung), Glättung der Datenreihe (eigene Darstellung), Ergebnis der geglätteten Datenreihe (eigene Darstellung, Bild: Stadt Soest)

lich jedes Maximum mit einem Geschoss in Verbindung gebracht wird.

Eine Wahrscheinlichkeit von 100%, ein Geschoss gefunden zu haben, wird definiert als ein Maximum $f(max_i) > 0$, für welches die Werte $f(min_i)$ und $f(min_{i+1})$ gleich null sind. Mit diesem Ansatz werden die zwei Parameter s_i^{\varnothing} und s_i^{min} für jedes lokale Maximum gemäß den Formeln (1) und (2) bestimmt.

Die Datenreihe wird so geglättet, dass sowohl die Randbedingungen für die durchschnittliche Geschosshöhe als auch Mindestwerte für die Parameter s_i^{\varnothing} und s_i^{min} eingehalten werden. Von den resultierenden Parametern s_i^{\varnothing} und s_i^{min} wird ein Mittelwert für die gesamte Fassade gebildet und ebenfalls gespeichert.

3.3 EVALUATION

Die Evaluation erfolgte anhand eines Schrägluftbilddatenbestands, der von der Stadt Soest bereitgestellt wurde. Um möglichst eine große Diversität an Gebäuden sowohl hinsichtlich der Bauweisen als auch an Besiedlungsstruktur zu erhalten, wurde sowohl ein Bereich mit mehrgeschossigen Fachwerkbauten mit stark strukturierten Fassaden und engen Gassen, wodurch Fassa-

denteile durch gegenüberliegende Gebäude in den Schrägluftaufnahmen teilweise verdeckt werden, als auch ein Vorstadtbereich mit größtenteils Einfamilienhausbebauung untersucht. In den CityGML-Daten wurden einige Gebäude als unzureichend bzw. falsch modelliert identifiziert und von der Betrachtung ausgeschlossen. Die Rate korrekter Bildanalyse der Anzahl der Geschosse liegt bei 82% in der Innenstadt und 97% in der Vorstadt bei Verwendung ausschließlich korrekter 3D-Gebäudemodelle.

4 BEREITSTELLUNG DER BERECHNUNGS-/SIMULATIONSWERKZEUGE ALS STANDARDISIERTE GEO-WEBSERVICES BASIEREND AUF DEM WPS-STANDARD

Im Projekt GeTIS wurde eine Vielzahl von rechenintensiven Prozessen entwickelt (u. a.

die initiale Geschossanzahlbestimmung (siehe Abschnitt 3) sowie die Gebäudebedarfsimulation (Weck-Ponten et al. 2018), welche für den vollständigen Workflow zur Planung geothermischer Anlagen benötigt werden. Um ein Höchstmaß an Interoperabilität zu gewährleisten, ist es sinnvoll, deren Ausführung zur Last- und Funktionsverteilung auf separate Knoten auszulagern. Sie können dann beispielsweise mit dem standardisierten Geodienst WPS, der häufig in GDIs eingesetzt wird, angebunden werden. Der OGC WPS⁶ (aktuell in der Version 1.0, eine Version 2.0 ist im Status Corrigendum 2) bietet einen Standard für die webbasierte Bereitstellung und Ansteuerung von Geoprozessen angelehnt an das Request/Response-Prinzip mittels HTTP. Standardisierte Anfrageoperationen liefern die notwendigen Meta-Informationen bezüglich

$$s_i^{\varnothing} = \frac{\frac{1}{2} \cdot [(f(max_i) - f(min_i)) + (f(max_i) - f(min_{i+1}))]}{f(max_i)} \quad \text{(Formel 1)}$$

$$s_i^{min} = \frac{\min(f(max_i) - f(min_i), f(max_i) - f(min_{i+1}))}{f(max_i)} \quad \text{(Formel 2)}$$

der enthaltenen Prozesse, insbesondere zu den Ein- und Ausgabeparametern, um damit die einzelnen Prozesse mit dem entsprechenden Dateninput auslösen zu können.

4.1 ASYNCHRONE PROZESS-ANSTEUERUNG ÜBER WPS

Auszuführende Geoprozesse wie die Berechnungs- und Simulationstools von GeTIS sind oftmals rechenintensiv, sodass die Ressourcen der bearbeitenden Maschine (Server) an die Anforderungen der Berechnung anzupassen sind. Als Grundlage für die Implementierung des WPS können die Leitgedanken eines Well-conditioned Service dienen (Welsh et al. 2001). Dieser gibt vor, dass eine höhere Auslastung des Service auch einen höheren Durchsatz nach sich zieht. Kann dies nicht mehr gewährleistet werden, so muss die Annahme von Aufgaben je Maschine reduziert werden, indem die Aufgaben auf mehrere Maschinen verteilt werden, um alle gestellten Anfragen zu erfüllen.

Für die nebenläufige serverseitige Aufgabenverarbeitung existieren verschiedene Verarbeitungsmuster. Das threaded Server-Design nutzt einen Verteiler (dispatcher), um eingehende Aufgaben einem separaten Thread zuzuteilen. Eine weitere Möglichkeit stellen ereignisgesteuerte (event-driven) Serverumsetzungen dar. Hierbei verarbeitet ein Haupt-Thread die Anfragen durch eine

Steuerung von mehreren endlichen Automaten. Beide Designprinzipien ermöglichen die Umsetzung skalierbarer Dienste, allerdings lässt sich die höchste Skalierbarkeit durch eine verteilte Implementierung erreichen, welche eine dynamische Anpassung der Berechnungsressourcen ermöglicht (Welsh et al. 2001).

In der Literatur lassen sich einige Umsetzungen für die verteilte Abarbeitung von WPS-Anfragen finden. Giuliani et al. (2012) verteilen Aufgaben an verschiedene Compute-Backends. Ganga dient hierbei für die softwareseitige Verteilung der Ressourcen in einem Grid oder Cluster. Andere Ansätze nutzen alternative Berechnungsinfrastrukturen wie Unicore (Baranski 2008) oder leiten die Anfrage an ein Hadoop-Cluster weiter (Chen 2012). Liu et al. (2014) entwerfen einen Berechnungsknoten für die verteilte Bearbeitung von räumlichen Prozessen basierend auf dem WPS. Bibliotheken zur räumlichen Prozessierung (Geotools und GDAL) werden direkt auf den verteilten Knoten eingesetzt, um eine nebenläufige Bearbeitung von räumlichen Aufgaben zu ermöglichen. Tellez-Arenas et al. (2018) nutzen RabbitMQ, um mit einem High-Performance-Cluster zu kommunizieren. Die Berechnung wird auf dem Cluster durchgeführt, wobei die Ergebnisverarbeitung durch einen WPS erfolgt. Ein umfassender Überblick ist in Laska et al. (2019) zu finden.

4.2 KONZEPTUELLER ANSATZ DER ASYNCHRONEN PROZESS-ANSTEUERUNG IN GETIS

Innerhalb des GeTIS-Projekts wurden verschiedene Berechnungen und Simulationen entwickelt, welche als Geodienste über das Web zur Verfügung gestellt werden sollen. Hierzu ist es erforderlich, diese entsprechend entdeckbar, ansteuerbar und überwachbar zu machen (Fichter et al. 2017). Hierzu eignet sich der eingeführte WPS, um eine standardkonforme Bereitstellung als Geodienst zu gewährleisten. Ein Webserver, der den WPS-Standard implementiert (fortan WPS-Server genannt), wird benötigt, mit dem der Client (bzw. das Geoport) kommuniziert, um Berechnungen bzw. Simulationen anzusteuern. Die Implementierung und letztendliche Durchführung der Berechnungen und Simulationen ist vom WPS-Server zu trennen. Dies schafft eine hardwareseitige Trennung, sodass die Berechnungs- bzw. Simulationssoftware an einer beliebigen Maschine entwickelt und später zur Verfügung gestellt werden kann. Für die finale Bereitstellung ermöglicht dies zudem eine horizontale Skalierung mithilfe mehrerer Recheninstanzen. Um diese Trennung zu erreichen, ist eine asynchrone Kommunikation mittels Message Broker zwischen WPS-Server und den Recheninstanzen erforderlich. Sobald ein Auftrag beim WPS-Server eingeht, soll dieser an eine ver-

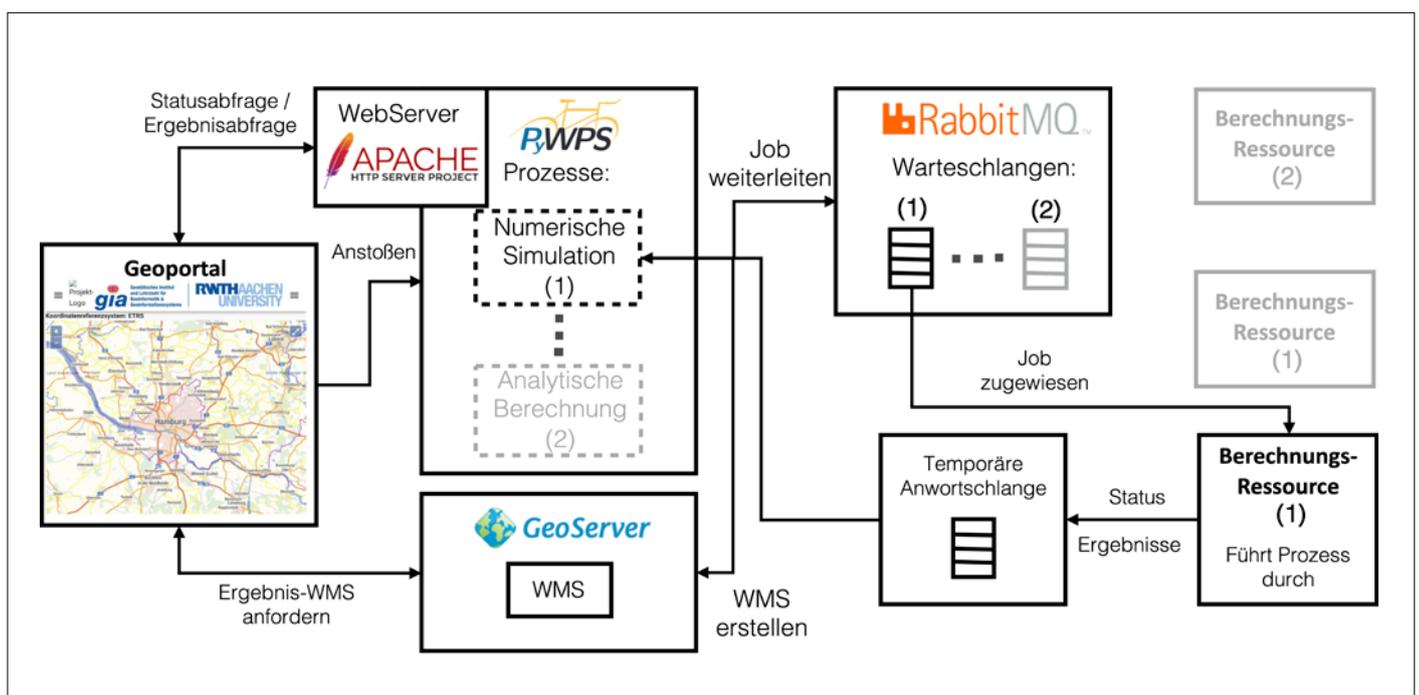


Abbildung 8: Softwareseitige Umsetzung der verteilten Prozessierung von WPS-Anfragen

fügbare Recheninstanz übergeben werden. Während der Prozessdurchführung soll der Fortschritt der Simulation und eventuelle Fehlermeldungen kommuniziert werden. Letztendlich müssen die Ergebnisse an den WPS-Server übermittelt werden, sodass dieser die Ergebnisse bereitstellen kann. Berechnungen und Simulationen im GIS-Bereich und insbesondere im GeTIS-Projekt können verschiedene Ergebnisse liefern. Diese reichen von einfachen Dateien (PDF, XML etc.), welche über einen einfachen Webserver bereitgestellt werden können, bis hin zu OWS (WMS/WFS/WCS), welche einen speziellen Server zur Bereitstellung von raumbezogenen Daten benötigen.

4.3 SOFTWARESEITIGE UMSETZUNG DER ARCHITEKTUR

Zur softwareseitigen Umsetzung des konzeptuellen Ansatzes der verteilten Prozessierung wurden gezielt existierende Open-Source-Lösungen eingesetzt (Abbildung 8). Ein PyWPS-Server (Version 4.0.0) wird verwendet, um die WPS-Schnittstelle bereitzustellen. PyWPS⁷ ist eine serverseitige Implementierung des WPS-Standards, geschrieben in Python. Er ermöglicht die Integration, Bereitstellung und Durchführung von Python-Prozessen über den WPS-Standard. PyWPS kann über einen Apache-Webserver verwendet werden. Raumbezogene Prozesse können implementiert werden, indem die „Process“-Klasse erweitert wird. Diese umfasst eine „Handler“-Methode sowie eine Liste der Ein- und Ausgabeparameter gemäß der WPS-Spezifikationen. Sobald eine neue „Execute“-Anfrage beim PyWPS-Server eingeht, wird die „Handler“-Methode in einem neuen Thread ausgeführt.

In der Architektur für GeTIS dient der PyWPS-Server allein dazu, WPS-konforme Prozesse anzusteuern und laufende Prozesse zu überwachen. Die eigentliche Implementierung und Durchführung der Prozesse sind von der PyWPS-Instanz entkoppelt. Vielmehr sollen die Prozesse mittels „Remote Procedure Call (RPC)“ Pattern angesteuert werden, welches einen asynchronen Nachrichtenaustausch zwischen dem Auftraggeber (hier: PyWPS) und dem Bearbeiter (hier: Berechnungsressource) voraussetzt. Dies wird durch die Verwendung des Message Brokers RabbitMQ realisiert. RabbitMQ bietet die Möglichkeit, lokal oder verteilt, beispielsweise innerhalb der

Cloud aufgesetzt zu werden. Zudem werden verschiedene Protokolle zum Nachrichtenaustausch unterstützt. Die generelle Funktionsweise kann wie folgt beschrieben werden: Produzenten senden Nachrichten an sogenannte „Exchanges“, von wo aus diese an Warteschlangen weitergeleitet werden, welche Konsumenten an den entsprechenden „Exchange“ gekoppelt haben. Dies ermöglicht es, Kommunikationsmuster, wie eine „Worker-Queue“ umzusetzen, sodass mehrere Konsumenten Nachrichten aus einer Warteschlange konsumieren. In der für GeTIS erstellten Architektur wurde ein RPC-Muster implementiert. Jeder PyWPS-Prozess hat seine eigene „Worker-Queue“. Rechner, welche für den entsprechenden Prozess zur Verfügung stehen, warten auf eingehende Aufgaben in dieser Warteschlange. Sobald ein Auftrag eingeht, wird dieser fair an eine der verfügbaren Maschinen verteilt. Um eine beidseitige Kommunikation zwischen PyWPS und der ausgewählten Maschine zu ermöglichen, wird eine temporäre Antwortwarteschlange aufgesetzt, um Statusnachrichten und die Ergebnisse auszutauschen.

4.4 ABLAUF (WORKFLOW)

Der PyWPS-Server stellt verschiedene Prozesse bereit, über welche mittels der „GetCapabilities“ und „DescribeProcess“ Operationen erweiterte Informationen eingeholt werden können. Ein ausgewählter Prozess kann über die „Execute“-Operation angesteuert werden, sofern die notwendigen Eingabeparameter mitgeliefert werden. Der Prozess sendet die Anfrage samt Eingabeparameter an die zuständige RabbitMQ-Warteschlange. Gleichzeitig instanziiert der PyWPS-Server eine temporäre Warteschlange, welche von der zugewiesenen Berechnungsinstanz verwendet wird, um Statusmeldungen zu kommunizieren und die finalen Ergebnisdokumente zu liefern.

Nachdem der Prozess auf einer zugewiesenen Maschine erfolgreich abgeschlossen wurde, werden die Ergebnisse über die temporäre Warteschlange zurückgeschickt. Während des gesamten Prozesses kann der aktuelle Status der Berechnung beim PyWPS abgefragt werden, um ihn im Geportal als Information an den Nutzer zu übermitteln. Die finalen Ergebnisse des Prozesses werden dem Initiator entweder per Apache-Server oder als WMS bereitgestellt. Letztgenannter wird durch den Py-

WPS-Prozess auf einem externen Geoserver eingerichtet.

5 FAZIT

Die aufgebaute Geodaten- und Kommunikationsinfrastruktur ist für die Durchführung der Berechnungen und Simulationen ganz wesentlich, um einerseits bei der Datenaggregation durch Verwendung der OWS möglichst aktuelle Daten zu verwenden und andererseits über das webbasierte Geportal den Nutzern GeTIS im großen Verbreitungskreis des Internets online zugänglich zu machen. 3D-Visualisierungen, wie diejenige des geologischen Schichtenmodells des Untergrunds, helfen den Nutzern bei der visuellen Interpretation dreidimensionaler Daten. Als WPS-Web-Anwendung implementiert wird es für vielfache Anwendungen (auch über GeTIS hinaus) nutzbar. Gebäudeparameter wie die Geschossanzahl sind wesentliche Eingangsgrößen bei den energetischen Bedarfssimulationen von Gebäuden (Weck-Ponten et al. 2018), manchmal mittelbar als Eingangsgröße für die Berechnung z. B. der Bruttogeschossfläche. Mit den dargestellten Entwicklungen ist ein Werkzeug entstanden, das unter Nutzung von Informationen aus unterschiedlichen Datenständen (3D-Gebäudemodelle, topographische Daten) durch Bildanalyse die Anzahl der Geschosse von Gebäuden automatisiert bestimmt. Der Engpass für die hier beschriebene Methode der Bildanalyse im Sinne einer flächendeckenden Anwendung ist derzeit durch den Zugang zu geeigneten Luftbildern bestimmt. Gerade Schrägaufnahmen sind zwar heute noch wenig verfügbar, werden jedoch vermehrt von Kommunen, z. B. der Stadt Soest, zu verschiedenen Zwecken flächendeckend erstellt. In GeTIS sind verschiedenste, teils sehr rechenintensive Berechnungs- und Simulationswerkzeuge integriert. Die beschriebene verteilte und asynchrone Prozessierung über WPS-Services ermöglicht eine große Anzahl gleichzeitiger Ausführungsanfragen und lässt so einerseits eine hohe Skalierung und andererseits die gleichzeitige Einbindung in weitere Geodateninfrastrukturen zu.

Ziel des Forschungsprojekts GeTIS war es, die Realisierbarkeit eines GIS- und webbasierten Planungs- und Genehmigungswerkzeugs für oberflächennahe geothermische Anlagen unter Kopplung von Gebäudeenergiebedarfen mit dem geo-

thermischen Energieangebot zu untersuchen. Im Rahmen des Projekts wurden die Entwicklungen in einer 13 km x 13 km großen Testregion im Kreis Düren evaluiert. Als verteiltes System ist GeTIS wie bereits erwähnt skalierbar und kann aufgrund der Verwendung standardisierter Schnittstellen grundsätzlich auf jede andere Region übertragen werden. Zur Verwertung in der Praxis wurde GeTIS neben der wissenschaftlichen Dissemination (z. B. auf Konferenzen) in der Zwischenzeit bei verschiedenen kommunalen (z. B. Stadt Aachen) sowie Landesstellen (u. a. MWIDE NRW) vorgestellt und ist stets auf großes Interesse gestoßen. Die Stadt Aachen möchte GeTIS daher als Bestandteil ihrer Wärmewende integrieren (Stadt Aachen 2022). Daneben finden derzeit sowohl Gespräche mit verschiedenen Stakeholdern zur Verstärkung von GeTIS für die breite Anwendung in der Praxis wie auch Aktivitäten zur Weiterentwicklung des

Informationssystems statt. In diesem Kontext konnten Bestandteile von GeTIS aufgrund des modularen Aufbaus bereits im Projekt „TherMap“ (Heim et al. 2022) erfolgreich übertragen werden. Im BMWK-geförderten Folgeprojekt „GeoWärmeWende“, das im Juli 2022 gestartet wurde, wird GeTIS in Kooperation mit den Stadtwerken Schifferstadt für kalte Nahwärmenetze adaptiert und erweitert.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei den Projektpartnern im Verbundprojekt GeTIS sowie für die Förderung des Forschungsvorhabens durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Förderschwerpunkts EnEff:Wärme des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung (Förderkennzeichen: 03ET1357A).

¹ https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/service/karten/02_Geodatendienste_Geoanwendung/gen/Geodatendienste_Anwendungen_node.html (05.08.2022).

² <https://www.geothermie.nrw.de/> (05.08.2022).

³ <https://www.geotis.de/homepage/project> (05.08.2022).

⁴ <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/fefflow> (05.08.2022).

⁵ <http://rwth-ebc.github.io/TEASER> (05.08.2022).

⁶ <https://www.ogc.org/standards/wps> (05.08.2022).

⁷ <https://pywps.org/> (05.08.2022).

Literatur

Agemar, T.; Alten, J.; Ganz, B.; Kuder, J.; Kühne, K.; Schumacher, S.; Schulz, R. (2014): The Geothermal Information System for Germany – GeotIS. In: *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 165 (2), S. 129-144.

Baranski, B. (2008): Grid computing enabled web processing service. In: *GI-Days*, Münster 2008, S. 1-12.

Becker, S. (2009): Generation and application of rules for quality dependent façade reconstruction. In: *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, S. 640-653. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.002>.

Bernard, L.; Brauner, J.; Mäs, S.; Wiemann, S. (2015): Geodateninfrastrukturen. In: Sester, M. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie, Band Geoinformationssysteme*. Springer, Berlin/Heidelberg.

Bertermann, D.; Bialas, C.; Morper-Busch, L.; Klug, H.; Rohn, J.; Stollhofen, H.; Psyk, M.; Jaudin, F.; Maragna, C.; Einarsson, G. M.; Vikingson, S.; Orosz, L.; Jordan, G.; Vijdea, A.-M.; Lewis, M.; Lawley, R. S.; Roinevirta, S.; Declercq, P.-Y.; Petitclerc, E.; Zacherl, A.; Arvanitis, A. A.; Stefouli, M. (2013): ThermoMap – An Open-

Source Web Mapping Application for Illustrating the very Shallow Geothermal Potential in Europe and selected Case Study Areas. *European Geothermal Congress (EGC) 2013*.

Bill, R. (2016): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*. 6. Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Bill, R.; Bernard, L.; Blankenbach, J. (2014): *Geoinformationssysteme*. In: Kummer et al. (2014): *Das Deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen 2015*. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Chen, Z.; Chen, N.; Yang, C.; Di, L. (2012): Cloud computing enabled web processing service for earth observation data processing. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5 (6), S. 1637-1649.

Düber, S.; Weck-Ponten, S.; Ziegler, M.; Fichter, E.; Frisch, J.; van Treeck, C. A. (2019): Web-basiertes Planungswerkzeug für Erdwärmesonden. In: *Der Geothermiekongress DGK 2019*, 11. – 19.11.2019, München, S. 1-12.

Fichter, E.; Weck, S.; Becker, R.; Derksen, J.; Düber, S.; Frisch, J.; Koppmann, D.; Löhring, R.; Blankenbach, J.; van Treeck, C.; Ziegler, M.: (2017): Geothermal Information System for Potential Studies in Subsurface Soil Layers. In: *Proceedings of Building Simulation, 15th Conference of IBPSA 2017, San Francisco*, S. 662-671.

Fuchs, S.; Beardsmore, G.; Chiozzi, P.; Espinoza-Ojeda, O. M.; Gola, G.; Gosnold, W.; Harris, R.; Jennings, S.; Liu, S.; Negrete-Aranda, R.; Neumann, F.; Norden, B.; Poort, J.; Rajver, D.; Ray, L.; Richards, M.; Smith, J. D.; Tanaka, A.; Verdoya, M. (2021): A new database structure for the IHFC Global Heat Flow Database. In: *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applications*, 4 (1), S. 1-14. <https://doi.org/10.31214/ijthfa.v4i1.62>.

Gabriel, P.; Gietzel, J.; Ha, L. H.; Schaeben, H. (2012): Geosciences in Space and Time – Komponenten einer 3D-GDI. In: *gis.Science*, 4/2012, S. 161-164.

GeotIS Endbericht (2009): Endbericht zum Projekt „Aufbau eines geothermischen Informationssysteme für Deutschland“ (Schulz, R. & GEO-

TIS-Team (2009). Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik Hannover. https://www.geotis.de/homepage/sitecontent/info/publication_data/final_reports/final_reports_data/GeotIS_Endbericht.pdf (05.08.2022).

GeotIS Endbericht (2013): Endbericht zum Projekt „Aufbau eines Internet basierten Informationszentrums für geothermische Energienutzung“ (Schulz, R. & GEOTIS-Team). Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik Hannover. https://www.geotis.de/homepage/sitecontent/info/publication_data/final_reports/final_reports_data/GeotIS2_Endbericht.pdf (05.08.2022).

Giuliani, G.; Nativi, S.; Lehmann, A.; Ray, N. (2012): WPS mediation: An approach to process geospatial data on different computing backends. In: *Computers and Geosciences*, 47, S. 20-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2011.10.009>.

Heim, E.; Laska, M.; Becker, R.; Klitzsch, N. (2022): Estimating the Subsurface Thermal Conductivity and Its Uncertainty for Shallow Geothermal Energy Use – A Workflow and Geoportal Based on Publicly Available Data. In: *Energies* 2022, 15, 3687. <https://doi.org/10.3390/en15103687>.

Herle, S.; Becker, R.; Blankenbach, J. (2016): Smart sensor-based geospatial architecture for dike monitoring. In: *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 34 (1), 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/34/1/012014.

Jochum, P.; Lempik, J.; Böttcher, S.; Stelter, D.; Krenz, T.; Mellwig, P.; Pehnt, M.; von Oehsen, A.; Blömer, S.; Hertle, H. (2017): Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich. Endbericht. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/BeuthHS_ifeu_Anlagenpotenzial_Endbericht_2017.pdf (05.08.2022).

Kaufmann, O.; Martin, T. (2008): 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. In: *Computers & Geosciences*, 34 (3), S. 278-290.

Khronos Group (2013): WebGL – OpenGL ES 2.0 for the Web. <http://www.khronos.org/webgl>.

Laska, M.; Hérlé, S.; Blankenbach, J.; Fichter, E., Jérôme, F. (2019): WhizPS: An Architecture for Well-conditioned, Scalable Geoprocessing Services Based on the WPS Standard. In: *GEO-Processing 2019*, S. 29-34.

Lehfeldt, R.; Melles, J. (2018): MDI-DE – Marine Daten-Infrastruktur Deutschland. In: *Die Küste*, 86, S. 33-48.

Lee, S. C.; Nevatia, R. (2004): Extraction and integration of window in a 3D building model from ground view images. In: *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2004.1315152>.

Liu, L.; Li, G.; Xie, J. (2014): Design & implementation of distributed spatial computing node based on WPS. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 17 (35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE35)), 22. – 26. April 2013, Beijing, China, S. 1-8.

McCarthy, J. D.; Graniero, P. A. (2006): A GIS-based borehole data management and 3D visualization system. In: *Computers & Geosciences*, 32 (10), S. 1699-1708.

Meixner, P.; Leberl, F. (2011): 3-Dimensional building details from aerial photography for Internet maps. In: *Remote Sensing*, 3, S. 721-751. <https://doi.org/10.3390/rs3040721>.

Ming, W.; Qingquan, L. I.; Qingwu, H. U.; Meng, Z. (2013): Quality analysis of open street map data XL. In: *ISPRS Archives*, XL-2/W1, S. 155-158. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-2-W1-155-2013.

OGC (2012): OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. <https://doi.org/OGC12-019>.

Schleyer, A.; Luckhardt, T.; Thiel, F.; Welzel, R.-W. (2014): Geodateninfrastruktur. In: Kummer et al. (Hrsg.): *Das Deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen 2015*. Wichmann, Berlin/Offenbach, S. 829-871.

SIG3D (2011): Ableitung, Migration und Fortführung von 3D-Stadtmodellen aus ALKIS-Daten. https://www.sig3d.eu/files/media/downloads/SIG3D/AG-Fortfuehrung/Stadtmodell_ALKIS_V2_1_1.pdf (05.08.2022).

Stadt Aachen (2022): *Wärmewende Aachen. Eckpfeiler für eine klimaneutrale Energieversorgung 2030*. Aachen.

Tellez-Arenas, A.; Quique, R.; Boulahya, F.; Le Cozannet, G.; Paris, F.; Le Roy, S.; Dupros, F.; Robida, F. (2018): Scalable Interactive Platform for Geographic Evaluation of Sea-Level Rise Impact Combining High-Performance Computing and WebGIS Client. Springer International Publishing, Cham, S. 163-175. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74669-2_12.

Van Treeck, C.; Frisch, J.; Weck-Ponten, S.; Fichter, E.; Ziegler, M.; Düber, S.; Derksen, J.; Juárez, O.; Blankenbach, J.; Becker, R.; Laska, M.; Hein, N. (2020): GeTIS – Geothermisches Informationssystem zur Bemessung, Modellierung, Bewertung und Genehmigung vernetzter geothermischer Energiesysteme auf Gebäude- und Stadtquartiersebene. Schlussbericht. DOI: 10.2314/KXP.1738225658.

Weck-Ponten, S.; Becker, R.; Herle, S.; Blankenbach, J.; Frisch, J.; van Treeck, C. A. (2018): Automatisierte Datenaggregation zur Einbindung einer dynamischen Gebäudesimulation in ein Geoinformationssystem. In: *Tagungsband BauSIM 2018* (7. deutsch-österreichische IBPSA Konferenz, 26. – 28. September 2018, Karlsruhe; Hrsg.: Both, P. von; Wagner, A.; Red.: Graf, K.). S. 516-523.

Welsh, M.; Culler, D.; Brewer, E. (2001): Seda: An architecture for well-conditioned, scalable internet services. In: *Proceedings of the Eighteenth ACM Symposium on Operating Systems Principles*, Ser. SOSP '01. ACM, New York, NY, S. 230-243.

Wenzel, S.; Förstner, W. (2008): Semi-supervised incremental learning of hierarchical appearance models. In: *21st Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, Beijing, China, B3b-2, S. 399-404.

Witte, B.; Sparla, P.; Blankenbach, J. (2020): *Vermessungskunde für das Bauwesen mit Grundlagen des Building Information Modeling (BIM) und der Statistik*. 9. Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.