

Geologische 3D - Modellierung in der Untermainebene

G1
W4

HANNAH BUDDÉ, CHRISTIAN HOSELMANN, GUDRUN RADTKE, HEINER HEGGEMANN & ROUWEN LEHNÉ

Einführung

In einem Kooperationsprojekt zwischen dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Dezernat G1 Geologische Grundlagen, und dem Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Darmstadt wurde in den letzten Jahren ein geologisches 3D-Modell des oberflächennahen bis mitteltiefen Untergrunds in der Untermainebene erarbeitet. Das Modell grenzt nahtlos an das bereits bestehende 3D-Modell des nördlichen Oberrheingrabens an (vgl. 3D_NORG, LEHNÉ et al. 2013 und Abb. 1), baut aber hinsichtlich seiner inhaltlichen Erarbeitung auf einem modifizierten methodischen Ansatz auf. Dies ist insbesondere den unterschiedlichen Anforderungen zur Abbildung des Ablagerungsraums in Bezug auf die Datendichte, Tektonik und Zielhorizonte geschuldet.

Die Untermainebene umfasst große Teile der Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main. Das flache Relief, die großen Flussläufe und die leichte Verfügbarkeit von Massenrohstoffen wie Sand und Kies, aber auch Grundwasser, schufen optimale Bedingungen für die Entwicklung des urbanen Ballungsraums. Gleichzeitig führt der steigende Flächenbedarf für Siedlungs-, Industrie- und Infrastrukturflächen gegenüber den ortsgebundenen Georessourcen zunehmend zu Nutzungskonflikten (HOPPE 2013). Das geologische 3D-Modell bietet daher eine Unterstützung bei der Bearbeitung tagtäglicher Nutzungsanfragen. Diese

betreffen sowohl den oberflächennahen bis mitteltiefen Untergrund (z. B. Erkundungsbohrungen, Brunnenbau, Baugrunderkundung), als auch eine langfristige und nachhaltige Nutzungsplanung zum Beispiel für rohstoffgeologische und wasserwirtschaftliche Fragestellungen sowie oberflächennahe Geothermie. So wird das geologische Modell der Untermainebene unter anderem für den Aufbau eines großräumigen Grundwasserströmungsmodells im Dezernat W4 (Grundwasser, Hydrogeologie) genutzt.

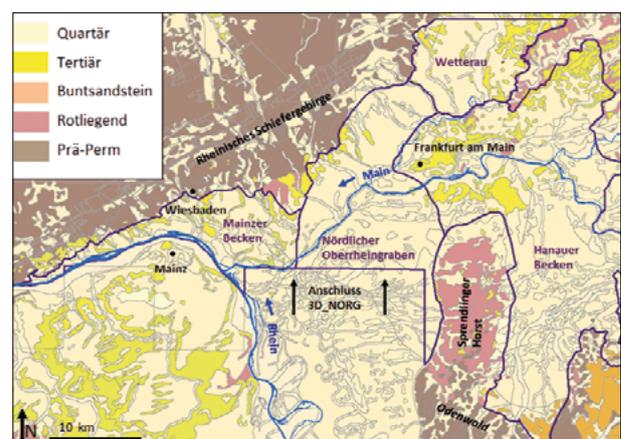


Abb. 1: Übersicht der strukturräumlichen Untergliederung des Senkungsgebietes der Untermainebene (violette Linie). Quelle: Strukturraumgrenzen und geologische Karte: Geologische Übersichtskarte des Landes Hessen 1 : 300 000, HLNUG, 2007

Projektgebiet

Die Untermainebene ist geologisch ein känozoisches Senkungsgebiet und repräsentiert den nördlichsten Ausläufer des Oberrheingrabens, dessen Öffnung und Einsenkung mit dem Tertiär begann. Neben dem Hauptgraben entstanden die Randsenken des Mainzer Beckens im Westen und des Hanauer Beckens im Osten. Die Modellumrandung orientiert sich daher im Wesentlichen an den geologischen Strukturraumgrenzen der Geologischen Übersichtskarte 1 : 300 000 (Abb. 1).

Verglichen mit den mehrere hundert Meter mächtigen Sedimentfüllungen des nördlichen Oberrheingrabens sind die tertiären und quartären Lockerseimente der Untermainebene durch eine geringere Absenkung des Ablagerungsraums, insbesondere in den Randsenken, und Hebungstektonik entlang von Horst-Strukturen z. B. des Sprendlinger und Frankfurter Horsts gekennzeichnet.

Methodik

Ziel des Projektes war die inhaltliche und räumliche Zusammenführung und Harmonisierung der verfügbaren Daten (vorwiegend Bohrungen, aber auch Karten und Literaturangaben) zur Rekonstruktion des geologischen Aufbaus und der Entwicklung einer anwendungsnahen Darstellung und Interpretation der Verteilung der känozoischen Ablagerungen in der Untermainebene. Das Modell sollte sich dabei nah und transparent an den ursprünglichen Eingangsdaten orientieren, um die mit der Erstellung

der Flächen verbundenen Schwankungsbreiten und Unsicherheiten für Dritte stets leicht nachvollziehbar zu transportieren. Im letzten, noch ausstehenden, Modellierungsschritt erfolgt der Aufbau und die Attribuierung eines Volumenmodells der Homogenbereiche, um die unterschiedlichen lithologischen Eigenschaften auch zwischen den modellierten Einheiten abzubilden und somit ein noch breiteres Anwendungsspektrum (z. B. die Identifizierung weitflächiger Geringleiter) zu ermöglichen.

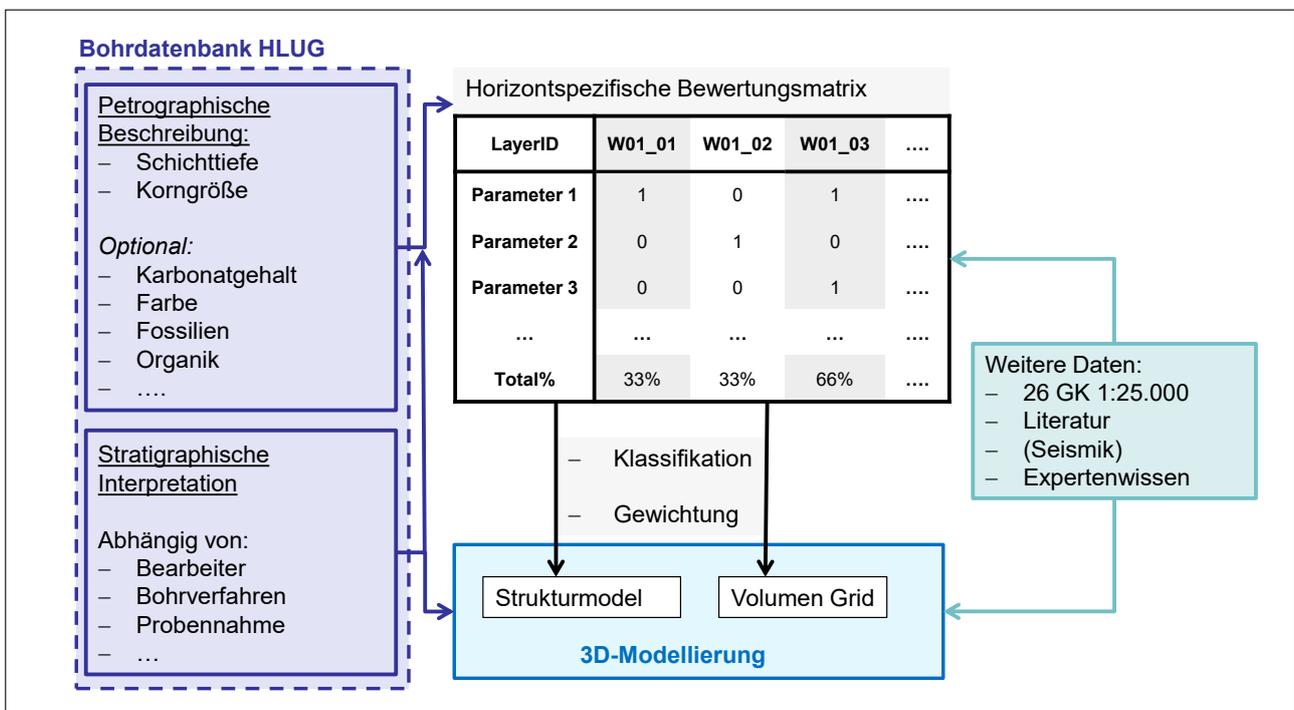


Abb. 2: Schematisches Vorgehen zur Auswahl und Klassifikation der Marker mittels Bewertungsmatrix

Das Modell besteht aus verschiedenen geologischen Leithorizonten, die zur Unterteilung des Ablagerungsraums und Abbildbarkeit der Geoarchitektur ausgewählt wurden. Kriterien dabei waren neben einer ausreichenden Datengrundlage vor allem die gute Identifizierbarkeit in den Schichtenverzeichnissen oder ihre Bedeutsamkeit hinsichtlich späterer Nutzung. Als flächendeckende Leithorizonte wurden folgende Schichtgrenzen definiert:

- Basis quartärer Ablagerungen
- Basis pliozäner Ablagerungen
- Basis mächtiger, toniger Schichten des Miozäns (Wiesbaden-Formation bzw. Frankfurt-Formation, ehemals auch Hydrobien-Schichten)
- Basis der Rüssingen-Formation
- Basis des Kalktertiärs (Hochheim-Formation bzw. Cerithien-Schichten)

Zur weiteren Unterteilung des Ablagerungsraumes wurden darüber hinaus folgende lokal auftretende Einheiten ergänzt:

- Basis äolischer Ablagerungen (Löss, Flugsand)
- Basis der fluviatilen Ablagerungen (Haupt-, Mittel-, Niederterrasse des Mains und Rheins)
- Basis des Untermain-Basalts
- Kohle-Flöze innerhalb der Bockenheim- und Praunheim-Formation

Die wichtigste Datengrundlage für die Modellierung bildet die Bohrdatenbank Hessen (BDH) des HLNUG. Die Datenbank umfasst im Projektgebiet etwa 10 000 Bohrungen für die digitale Schichtenverzeichnisse vorliegen. Die Bohrungen sind räumlich unterschiedlich dicht verteilt und unterscheiden sich zudem in der erreichten Endteufe und dem Bohrverfahren. Zur Sicherstellung einer hohen Qualität der Eingangsdaten wurde jeder Bohrungseintrag der Datenbank manuell mit den originalen Bohraufnahmeprotokollen verglichen und auf Vollständigkeit und Eingabefehler geprüft. Dabei lag ein besonderes Augenmerk auf dem Höhen- und Lagebezug der Bohrung sowie der korrekten Beschreibung der Petrographie.

Die Anzahl verfügbarer Bohrungen ist im oberflächennahen Untergrund sehr hoch, so dass für die quartären Ablagerungen vergleichsweise viele Bohrungen zur Verfügung stehen. Die Qualität der Bohrungen und die räumliche Konsistenz der Schichtinformationen variieren jedoch stark. Gründe dafür sind z. B. Unterschiede im Bohrverfahren und der Detaillierungsgrad in der Schichtbeschreibung, sowie Unterschiede in der lithostratigraphischen Ansprache über die Zeit und die Erfahrung des Bearbeiters bei der regionalgeologischen Interpretation. Um sicher zu stellen, dass in der Modellierung stets die gleichen Schichten korreliert werden, mussten die Schichtenverzeichnisse daher unter diesem Gesichtspunkt ebenfalls kontrolliert, bewertet und interpretiert werden. Da der Datensatz mit mehr als 200 000 Schichteinträgen zu groß für eine manuelle Korrelation ist, wurde die Entwicklung eines semi-automatischen Ansatzes zur Vorselektion der Marker im Hinblick auf die Ableitung belastbarer Schichtinformationen für die oberflächennahen Ablagerungen gewählt (Abb. 2). Fragliche Marker wurden sowohl bei diesem, als auch dem semi-automatischen Ansatz in Rücksprache mit dem jeweils zuständigen Bearbeiter am HLNUG neu interpretiert oder verworfen.

Die semiautomatische Auswertung der Schichtinformationen basiert auf der Definition und Abfrage von Charakteristiken für jeden Schichteintrag und der Auswertung hinsichtlich ihrer wahrscheinlichen Zuordnung zu einer stratigraphischen Einheit. Dazu werden die definierten Kriterien in einer Matrix zusammengestellt, jeder Schichteintrag auf das Zutreffen des Kriteriums hin abgefragt und mit 1 oder 0 (Kriterium erfüllt/nicht erfüllt) bewertet. Über das gewichtete Aufsummieren der Bewertungen kann eine Angabe über die wahrscheinliche Zugehörigkeit eines Schichteintrags gemacht werden. Hierbei wird die ursprüngliche stratigraphische Interpretation ebenfalls berücksichtigt, tritt aber neben den petrographischen Kriterien vermehrt in den Hintergrund. Dabei konnten die einzelnen Kriterien über einen Faktor gewichtet werden. Erreichte eine Schicht hier den Wert von 70 % oder mehr, wurde sie als entsprechender Marker im Modellierungsprozess verwendet. Die Vorgehensweise ist schematisch in Abb. 2 dargestellt. Die Ergebnisse wurden im Anschluss anhand von Referenzbohrungen auf Plausibilität geprüft.

Ablagerungen des Miozäns und Oligozäns wurden aufgrund ihrer größeren Tiefenlage sehr viel seltener erbohrt als die quartären und pliozänen Einheiten.

Sämtliche Schichtenverzeichnisse mit Angaben zum Miozän oder Oligozän wurden daher manuell überprüft.

Ergebnisse

Quartäre Zielhorizonte

Die quartären Sedimente sind überwiegend fluvial und durch die Flüsse Main und Rhein sowie ihrer Nebenflüsse geprägt. Zusätzlich bedeutsam sind

Hangeinträge vom Taunus- und Odenwaldrand sowie dem Sprendlinger Horst.

Quartärbasis

Etwa 70 % (6403) der berücksichtigten Bohrungen enthalten direkte Informationen zur Basis des Quartärs. Die übrigen 30 % können als indirekte Hinweise auf eine tiefer liegende Basis verwendet werden.

Bei der Betrachtung der modellierten Quartärbasisfläche wird ein starker Einfluss der Flüsse Rhein und Main hinsichtlich der Tiefenlage der Quartärbasis deutlich. Die Tiefenlage liegt entlang der ehemaligen und heutigen Flussverläufe bei 48 m bis 120 m über NN, während sie zu den Beckenrändern auf 120 m

bis 200 m über NN ansteigt (Abb. 3). In der westlichen Untermainebene fällt die Quartärbasis nach Süden ein und ist im Übergangsbereich zum nördlichen Oberrheingraben zusätzlich nach Südwesten in Richtung der westlichen Haupttrandverwerfung des Grabens geneigt. Das Quartär besitzt hier auch seine größte Mächtigkeit. In der östlichen Untermainebene liegt die Quartärbasis relativ konstant bei 100 m über NN und steigt erst im südlichen Teil, dem Dieburger Becken, auf 140–160 m über NN an.

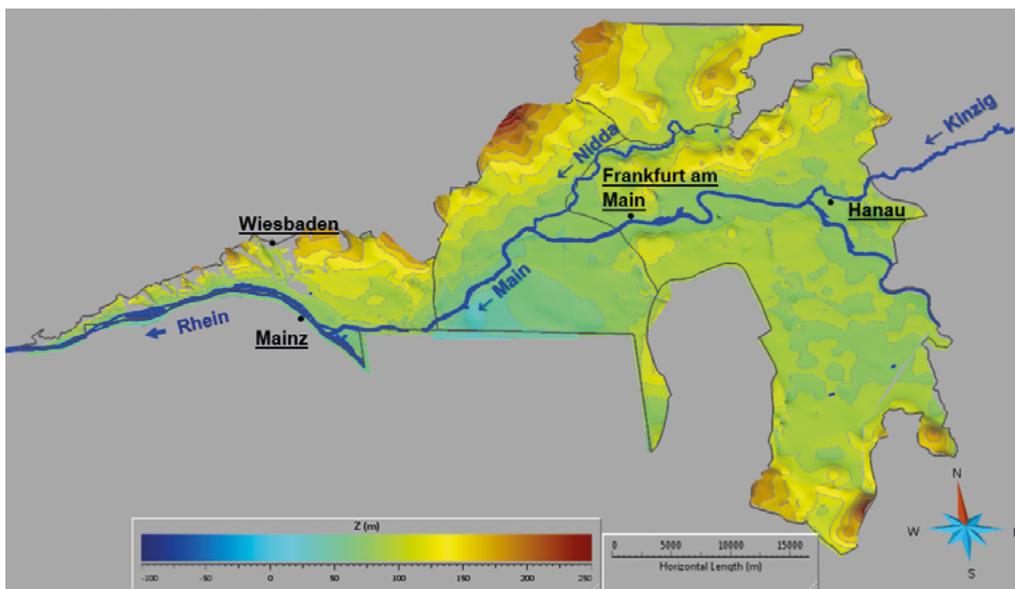


Abb. 3: Basisflächen der quartären Sedimente in GOCAD. Die Farbskala zeigt Tiefenangaben in [m NN].
Quelle: Strukturraumgrenzen und geologische Karte: Geologische Übersichtskarte des Landes Hessen 1 : 300 000, HLNUG, 2007

Terrassenflächen

Durch die Modellierung der Terrassenflächen lässt sich der quartäre Ablagerungsraum weiter unterteilen und genetisch beschreiben (Abb. 4). Insgesamt 2116 Schichteinträge erfüllen die Kriterien für die Basis der Terrassensedimente und wurden nach einer weiteren Differenzierung in die Haupt-, Mittel- und Niederterrassen-Formation als belastbare Marker zur 3D-Modellierung verwendet. Für die Untergliederung der Terrassen-Formationen wurde dabei auf die morphologische Kartierung von SCHEER (1974) und Angaben zur Höhenlage von SEMMEL (1974) zurückgegriffen und mittels des DGM5 und lokal mittels des DGM1 verfeinert. Darüber hinaus wurden weitere Stützstellen in den Bohrungen über fining-upwards Zyklen ermittelt und mit Referenzbohrungen korreliert.

Die Basis der Hauptterrassen-Formation ist im südlichen Bereich des Hanauer Beckens und in der westlichen Untermainebene auf Blatt Neu-Isenburg, Blatt Kelsterbach und Blatt Hochheim verbreitet. Sie zeichnet den ursprünglichen Verlauf des Mains während des frühen Pleistozäns nach. Damals querte der Fluss den Frankfurter Horst südlich des Sachsenhäuser Bergs durch die sogenannte Neu-Isenburger Pforte und lagerte seine Sedimentfracht als weitflächig verzweigtes Braided-River-System in der Ebene ab. In der Folgezeit verlagerte der Fluss sein Bett weiter nach Norden bis zu seinem heutigen Verlauf durch das Stadtgebiet Frankfurt. Abgesehen von den Randbereichen zum Sprendlinger Horst werden die Sedimente der Hauptterrassen-Formation daher

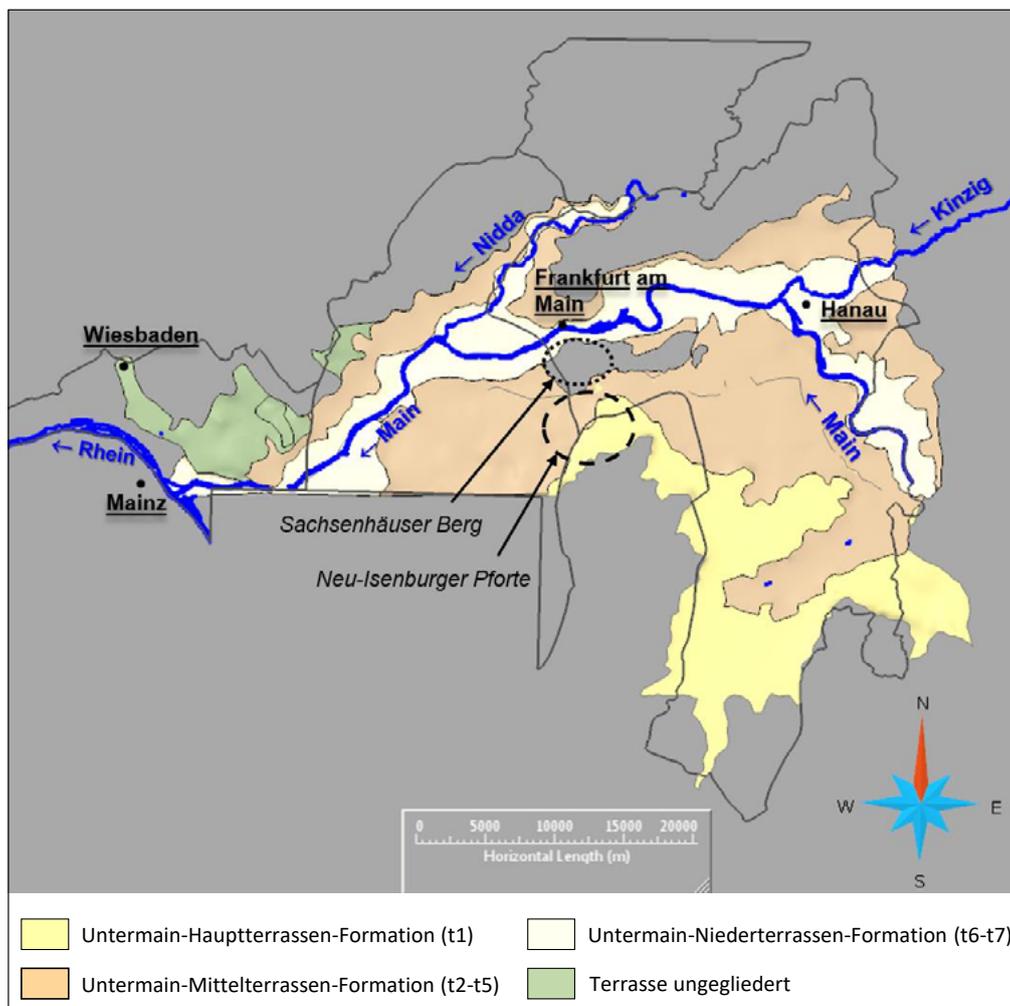


Abb. 4: Basisflächen der Terrassen-Formationen in GOCAD. Quelle: Strukturraumgrenzen und geologische Karte: Geologische Übersichtskarte des Landes Hessen 1 : 300 000, HLNUG, 2007

heute von den Sedimenten der Mittelterrassen- und auf dem Blatt Hochheim auch der Niederterrassen-Formation überlagert. Neben der Verlagerung des Mains nach Norden zeigt sich auch eine nordwestlich gerichtete Verschiebung des Flusses in der westlichen Untermainebene. Während der Main im Unterpleistozän in einem breiten Flusssystem südlich Kelsterbach bei Trebur in den Rhein floss, verläuft

das heutige Flussbett weiter nördlich nah am Schiefergebirgsrand. Die Ablagerungen der Mittelterrasse finden sich überwiegend im nordwestlichen Teil des Hanauer Beckens sowie in der westlichen Untermainebene. Sie wurde zum Teil von den Sedimenten der Niederterrasse erodiert, die im Verlauf des heutigen mäandrierenden Flussbettes zu finden ist.

Äolische Deckschichten

In der Untermainebene sind Löss und Flugsand als Deckschichten verbreitet. Im Projektgebiet weisen 943 digital vorliegende Schichtenverzeichnisse Flugsand auf, 1 475 Schichtenverzeichnisse enthalten Löss (Abb. 5). Sie zeigen ein sehr deutliches Bild der räumlichen Verteilung äolischer Sedimente. Während der Löss überwiegend auf die Hangbereiche am Südrand des Rheinischen Schiefergebirges und des Odenwaldes konzentriert ist, sind Flugsande im zentralen Bereich des Betrachtungsraumes zu finden. Im Übergangsbereich des Odenwaldes zum Hanauer Becken treten beide Sedimenttypen auf und verzahnen sich kleinräumig. Zusätzlich kam es durch Um-

lagerung zu einer Durchmischung. Um dies in der Flächenmodellierung zu berücksichtigen, wurde das Teilstück der Fläche hier als Übergangsbereich ausgewiesen. Das Auftreten dieser Einheiten ist oft deutlich lokal abgegrenzt. Eine detaillierte Auskartierung der äolischen Deckschichten, wie sie auf den GK25 zu finden ist, ist aufgrund der Größe des Betrachtungsraums für die Modellierung nicht sinnvoll. Daher wurden Gebiete potenzieller äolischer Sedimente in das Modell integriert und Bereiche, in denen Bohrungen das Auftreten von Flugsand oder Löss widerlegen, entsprechend ausgeschnitten.

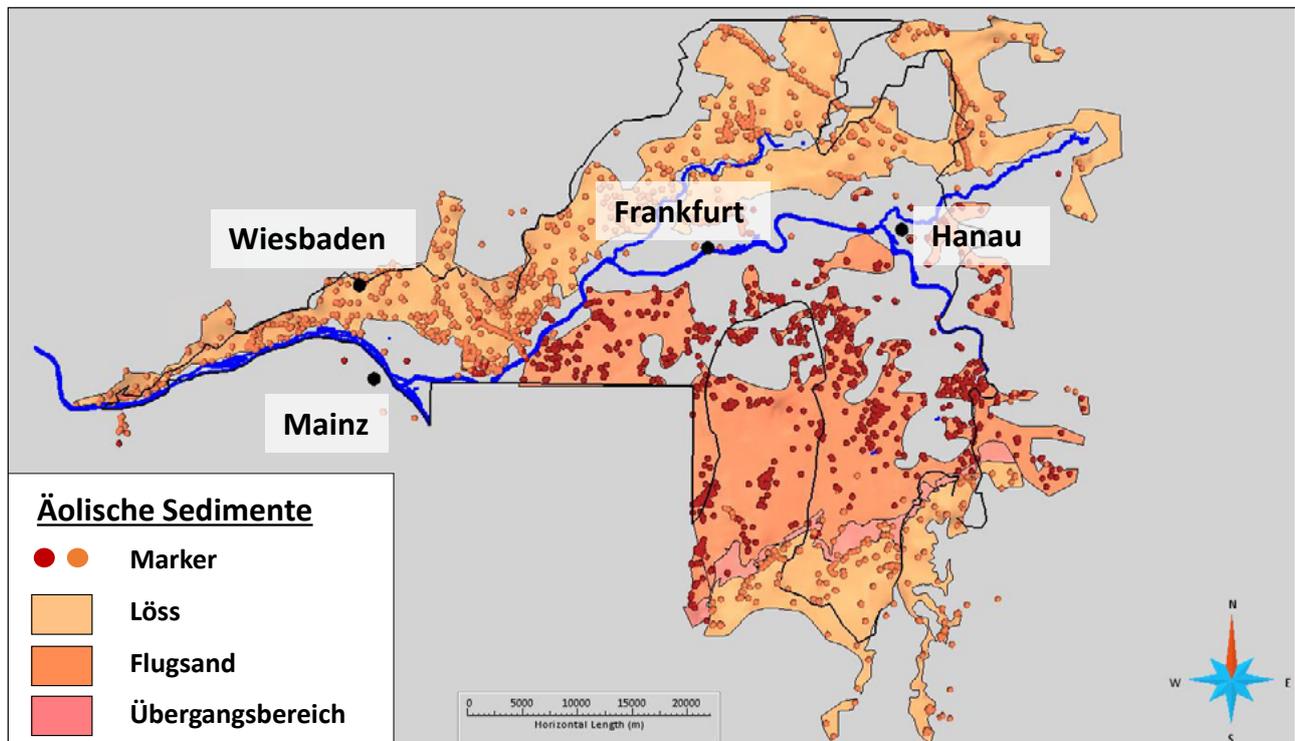


Abb. 5: Modellierte Basisflächen der Löss- und Flugsandverbreitung. Die Punkte geben das Auftreten der Einheiten in den Bohrungen an. Quelle: Strukturraumgrenzen und geologische Karte: Geologische Übersichtskarte des Landes Hessen 1 : 300 000, HLNUG, 2007

Tertiäre Zielhorizonte

Für die flächendeckende Modellierung der tertiären Horizonte im Senkungsbereich standen aufgrund der größeren Tiefenlage häufig nur wenige Daten zur Verfügung. Teilweise, insbesondere im Bereich des nördlichen Oberrheingrabens, konnte die flächen-

hafte Modellierung nur anhand von Mächtigkeitsannahmen erfolgen. Im Bereich der Hebungsstrukturen wie dem Frankfurter Horst hingegen, an denen die Schichten teilweise sogar an der Oberfläche ausbleiben, ist die Datenlage oft sehr detailliert.

Pliozänbasis

Die meisten Bohrungsinformationen (499) für tertiäre Ablagerungen liegen für die relativ oberflächennah verbreiteten pliozänen Sedimente vor. Hier lässt sich die Geometrie eines weitflächigen Rinnensystems mit einzelnen kleineren Ausläufern rekonstruieren, die in die liegende verschiedene miozäne Abfolgen eingegriffen haben. Im Raum Frankfurt Ost, Neu-Isenburg und nordwestlich von Seligenstadt

sind die pliozänen Ablagerungen von den fluvialen Sedimenten des Pleistozäns aufgearbeitet und teilweise erodiert. Auf dem Frankfurter Horst sind pliozäne Abfolgen nicht zur Ablagerung gekommen (RADTKE 2018). Die Tiefenlage im nördlichen Oberrheingraben schwankt von ca. 55 m unter NN bis 200 m über NN und fällt im Frankfurter Raum fast sprunghaft nach Süden hin ab.

Untermain-Basalt

Für die Verbreitung des Untermain-Basalts stehen ebenfalls ausreichend Daten zur Verfügung. Neben dem Antreffen als Festgestein wurde der Basalt oft auch in verwitterter Form als grünlicher Ton oder Schluff erbohrt. Die Ergebnisse zeigen eine Verbrei-

tung in der westlichen und östlichen Untermainebene mit den größten Mächtigkeiten (>30 m) im Raum Hanau. Auf dem Frankfurter Horst tritt der Untermain-Basalt aufgrund tektonischer Lagerungsprozesse nicht auf (Abb. 6).

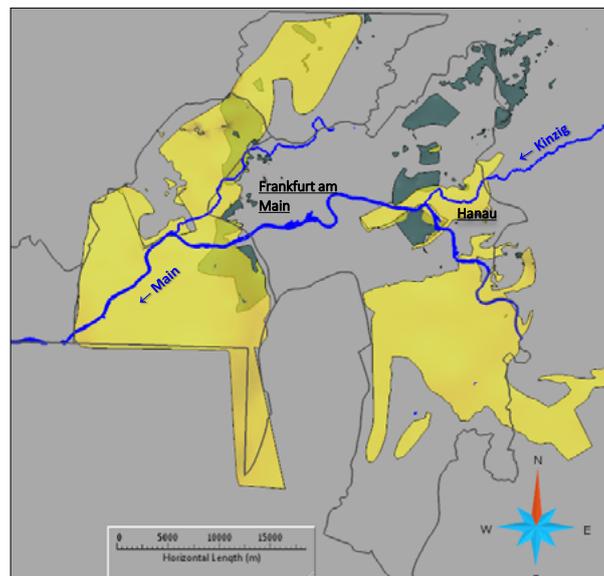


Abb. 6: Verbreitung des Pliozäns (gelb) und des Untermain-Basalts (olivgrün). Vorkommen der Untermain-Basalte im Liegenden des Pliozäns (hellgrün). Quelle: Strukturraumgrenzen und geologische Karte: Geologische Übersichtskarte des Landes Hessen 1:300 000, HLNUG, 2007

Tektonik

Für das Projektgebiet wurde ein tektonisches Konzept erarbeitet, in dem Hinweise aus Literatur und Karten zusammengetragen und mit Versätzen in den Bohrdaten verglichen wurden. Diese einzelnen Hinweise wurden anschließend zu einem vernetzten Gesamtkonzept zusammengestellt, in dem jedoch nur Störungen verwendet wurden, die durch entsprechende Bohrungsinformationen belegt sind. Demnach handelt es sich um bruchtektonisch beanspruchte Sedi-

mente von meist gleichbleibenden Mächtigkeiten. Die Störungsflächen reichen von etwa 250 m über NN bis 450 m unter NN. Die Hauptverwerfungen des nördlichen Oberrheingrabens sind aufgrund der hier tiefer reichenden Basisflächen bis etwa 600 m unter NN modelliert. Da der Einfallswinkel weitestgehend unbekannt ist, wurden die Störungen als steilstehend mit etwa 80° angenommen (Abb. 7).

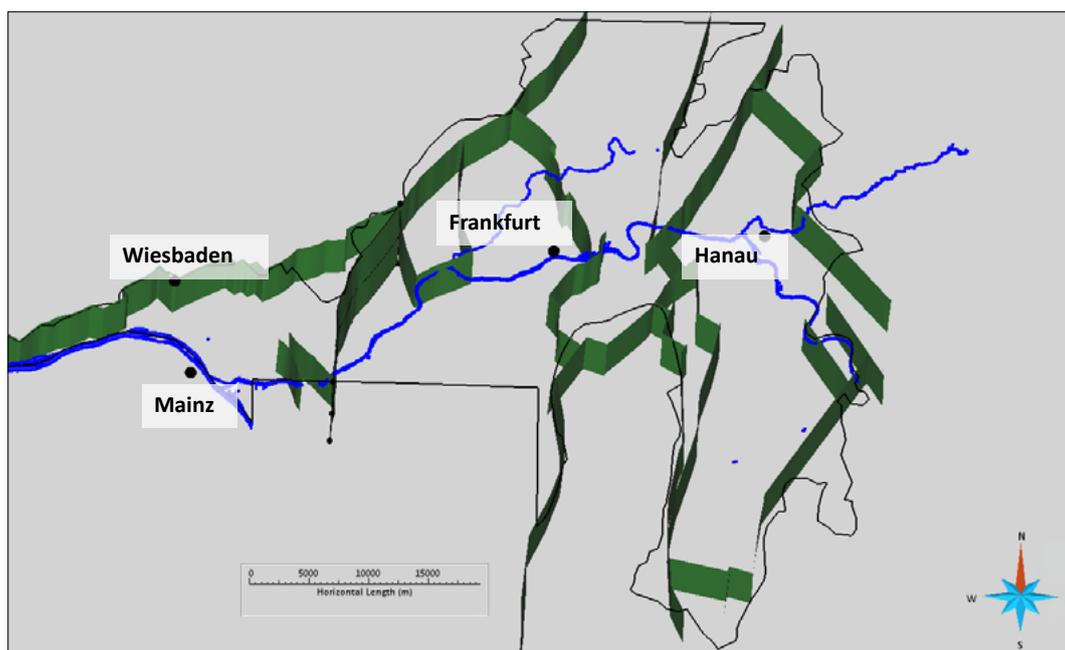


Abb. 7: Modellierte Störungsflächen in GOCAD. Quelle: Strukturraumgrenzen und geologische Karte: Geologische Übersichtskarte des Landes Hessen 1:300000, HLNUG, 2007

Fazit und Ausblick

Das 3D-Modell führt die verfügbaren geologischen Informationen im Untersuchungsgebiet zusammen und harmonisiert diese. So gehen sowohl „harte Daten“ wie Bohrungen in den Modellierungsprozess ein, als auch daraus entstandene geologische Interpretationen in Form von Karten und Fachpublikationen. Der Nutzer erhält folglich eine leicht zugängliche, harmonisierte Zusammenstellung der Datenvielfalt sowie eine strukturelle Interpretation des Betrachtungsraums. Dabei besteht jedoch die

Gefahr, dass die Belastbarkeit überschätzt und das Verständnis der Aussagegenauigkeit verloren geht. Es ist daher wichtig, die modellierten Inhalte stets im Kontext der Eingangsdaten zu sehen. Bezogen auf die stratigraphischen Horizonte lassen sich die Bohrungen als wichtigste Stützstellen und Maß für die Aussagegenauigkeit heranziehen. Die Aufbereitung und Qualitätskontrolle dieser Daten war daher ein unerlässlicher Schritt in der Vorbereitung für die Modellierung. In größeren Tiefen nimmt die Anzahl

der Stützstellen schnell ab und die räumlichen Abstände zwischen den Markern werden größer. Damit nehmen die theoretischen Freiheitsgrade in der Interpolation entsprechend zu. Aufgrund der marinen bis marin-brackischen Ablagerungsverhältnisse ist das miozäne und oligozäne Tertiär gegenüber dem quartären Ablagerungssystem deutlich homogener (KÜMMERLE & RADTKE 2012). Deshalb kann man für die tiefer liegenden marin-geprägten Sedimente eine gewisse Vorhersagegenauigkeit trotz weniger Stützstellen annehmen. Die Belastbarkeit eines Modells kann daher nicht allein aus der Entfernung der Stützstellen abgeschätzt werden, sondern ist immer ein Zusammenspiel aus Eingangsdaten und Komplexität des Ablagerungsraums.

Die Unterteilung des Ablagerungsraums in verschiedene Faziesräume bietet eine Grundlage für vielfältige Nutzungsmöglichkeiten. So geben die Flächen der Terrassensedimente Aufschluss über die Verbreitung und Mächtigkeit der sandig-kiesigen Sedimente, die für rohstoffgeologische und wasserwirtschaftliche

Fragstellungen relevant sein können. Das Auftreten sehr mächtiger toniger Schichten im Bereich des Tertiärs oder Festgestein, wie Kalkstein oder Basalt, können aus ingenieurgeologischer Sicht wertvolle Informationen liefern (z. B. bei Gründungsmaßnahmen, Tunnelbauwerken). Allerdings gibt es insbesondere in den fluviatilen, quartären und pliozänen Sedimenten eine große Heterogenität im Korngrößenspektrum. Um auch kleinere Strukturen, wie Rinnenfüllungen, abbilden zu können, soll das Modell daher um ein attribuiertes Volumenmodell erweitert werden.

Um die Zugänglichkeit der Daten zu erhöhen, werden die Modellergebnisse in die 3D-Datenbank GST überführt über einen an die Datenbank angebotenen Viewer (GST Web) zunächst für die interne browsergestützte Erreichbarkeit bereitgestellt. Eine Veröffentlichung der 3D-Inhalte im Internet wird angestrebt. Weiterhin sollen abgeleitete 2D-Karten (z. B. Isolinienpläne, Verbreitungskarten, etc.) auch im Geologie-Viewer (geologie.hessen.de) veröffentlicht werden.

Literatur

- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2007): Geologische Übersichtskarte des Landes Hessen 1 : 300 000, überarbeitete, digitale Ausgabe.
- HOPPE, A. (2013): Cities and geology. – Z. Dt. Ges. Geowiss., **164** (4): 517–524.
- KÜMMERLE, E. & RADTKE, G. (2012): Die Fossilien des Tertiärmeeres im Hanauer Becken. – Jber. Wett. Ges. ges. Naturkunde, **162**. Jg.: 59–77, 21 Abb., 1 Tab.; Hanau.
- LEHNÉ, R.J., HOSELMANN, C., HEGGEMANN, H., BUDDÉ, H. & HOPPE, A. (2013): Geological 3D Modelling In The Densely Metropolitan Area Frankfurt/Rhine-Main. – Z. Dt. Ges. Geowiss. **164**(4): 591–603.
- RADTKE, G. (2018): Geologischer Untergrund der Stadt Frankfurt am Beispiel des Europaviertels. – Altlasten annual, 2018: 105–113, 8 Abb.; Wiesbaden.
- SCHEER, H. D. (1974): Pleistozäne Entwicklung Der östlichen Untermainebene. Dissertation. 173 S.; Frankfurt a. M.
- SEMMELE, A. (1974): Der Stand Der Eiszeitforschung Im Rhein-Main-Gebiet. – Rhein-Mainische Forsch., **78**: 9–56; Frankfurt a. M.