



# Geologie, Boden, Georessourcen und Geogefahren

Rhein-Main-Gebiet

Band 1



# **Geologie, Boden, Georessourcen und Geogefahren**

**Rhein-Main-Gebiet**

Band 1

Wiesbaden, 2021

# Impressum

## Geologie, Boden, Georessourcen und Geogefahren

### Rhein-Main-Gebiet

#### Band 1

Bearbeitung: HLNUG Abteilung G – „Geologie und Boden, Geologischer Landesdienst“  
Dr. Gabriele Aderhold, Christina Heinrichs, M. Sc.

Mit Beiträgen von Matthias Adam; Fabian Achten; Heiner Heggemann; Christian Heller;  
Christina Heinrichs; Benjamin Homuth; Christian Hoselmann; Rouwen Lehné;  
Wolfgang Liedmann; Gudrun Radtke und Sven Rumohr

Redaktion: Christina Heinrichs

Kartographie: Michaela Hoffmann

Layout: Nadine Senkpiel

Titelbild: Mosbacher Sande, HLNUG Christian Hoselmann (oben);  
Rutschgebiet nahe Frankfurt, HLNUG Nadine Becker (links);  
Bodenerosion nahe Frankfurt, HLNUG Fabian Achten (Mitte);  
Bienenfresser als invasive Art meist in ehemaligen Sandgruben, Adobe Stock/JuergenL (rechts)

Herausgeber, © und Vertrieb:

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie  
Rheingaustraße 186  
65203 Wiesbaden

Telefon: 0611 6939-111

Telefax: 0611 6939-555

E-Mail: [vertrieb@hlnug.hessen.de](mailto:vertrieb@hlnug.hessen.de)

**[www.hlnug.de](http://www.hlnug.de)**

Das HLNUG auf Twitter:

[https://twitter.com/hlnug\\_hessen](https://twitter.com/hlnug_hessen)

Diese Broschüre wurde mit FSC-Zertifizierung gedruckt.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

# Inhalt

<b>Impressum</b> .....	<b>2</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Geologie</b> .....	<b>12</b>
2.1 Tertiär.....	12
2.2 Quartär .....	17
<b>3 Geogefahren</b> .....	<b>23</b>
3.1 Tertiäre Rutschungen .....	23
3.2 Erdfälle und Senkungsmulden .....	28
3.3 Setzungsempfindliche Schichten .....	33
3.4 Erdbeben .....	39
3.5 Radon.....	45
3.6 Artesisch gespanntes Grundwasser .....	51
<b>4 Böden und Altlasten</b> .....	<b>53</b>
4.1 Böden.....	53
4.2 Risiken durch Bodenerosion .....	56
4.3 Folgen der Flächeninanspruchnahme und Bodenversiegelung .....	60
4.4 Altlasten und Schadstoffe in Böden .....	62
<b>5 Rohstoffe und Abbaustellen</b> .....	<b>67</b>
<b>6 Geothermie und Erdwärme</b> .....	<b>71</b>

## Vorwort



Liebe Leserin, lieber Leser,

in dieser Schriftenreihe werden Themen aus dem Bereich der Abteilung Geologie und Boden und bodenkundliche Besonderheiten von ausgewählten Regionen in Hessen vorgestellt. In Band 1 wird das Ballungsgebiet Rhein-Main be-

handelt, dass durch seine hohe Bevölkerungszahl besonders auf die naturgegebenen Ressourcen achten sollte.

Das Rhein-Main-Gebiet zählt durch die Metropole Frankfurt am Main und den Frankfurter Flughafen zu der wirtschaftlich bedeutendsten Region Hessens. Durch die weiter steigende Bevölkerungszahl werden der vorhandene Wohnraum oder Industrieflächen immer knapper, so dass neue Bauflächen ausgewiesen werden müssen. Gerade bei neuen Bauvorhaben ist daher die Kenntnis über den Baugrund wichtig. Daneben sind Fragen der knapper werdenden Rohstoffe und des Bodenschutzes zu beantworten. Gerade der Boden stellt eine der wichtigsten Ressourcen dar, die wir haben. Daher beschäftigt sich der Umweltschutz im Bereich Boden und Altlasten nicht alleine mit der Sanierung von Altlasten und schädlichen Bodenveränderungen, sondern weist verstärkt – gerade bei der Neuausweisung von Flächen – auf das Spannungsfeld und teilweise auch den Nutzungskonflikt zwischen neuen Baugrundflächen und dem Bodenschutz hin. Insbesondere die Themen der Auswirkungen von Bodenversiegelungen und Schadstoffbelastungen in den Böden spielen im Rhein-Main-Gebiet eine wichtige Rolle. Darüber hinaus werden auftretende Georisiken in Form von setzungsempfindlichen Schichten, Rutschungen, Erdfällen, Erdbeben, Radonemissionen sowie Artesern thematisiert sowie der Abbau von regionalen Rohstoffen, z. B. von Sand und Kies, aber

auch die Renaturierung der zum Abbau genutzten Flächen behandelt.

Diese Broschüre liefert Ihnen einen ersten Einblick in den Untergrund des Rhein-Main-Gebietes und zeigt Ihnen einige Besonderheiten auf. Aber auch der Konflikt zwischen Flächennutzung und dem Erhalt der naturgegebenen Ressourcen sowie der Nutzen und die Gefährdung vom vorhandenen Untergrund werden behandelt.

In der Abteilung G – Geologie und Boden, Geologischer Landesdienst von Hessen – sind die Bereiche Geologie, Boden und Altlasten, Ingenieurgeologie, Rohstoffe und Geoenergien angesiedelt. In beratender Position für die Landesregierung und Landesverwaltung werden in der Abteilung G Themen wie Geopotentiale und Georisiken bearbeitet. Die Kolleginnen und Kollegen des HLNUG arbeiten an der kontinuierlichen Erfassung, Darstellung und Evaluierung der geologischen und bodenkundlichen Gegebenheiten und fertigen fachspezifische Berichte, Karten, Gutachten oder Stellungnahmen an. Auch Zukunftsthemen, die sich mit dem Klimawandel oder der Eignung des geologischen Untergrundes als Endlager für atomaren Müll beschäftigen, stehen im Fokus. Daneben berät das HLNUG die Ministerien und Aufsichtsbehörden zu Fragen der Ausweisung von Radonvorsorgegebieten und setzt den technischen Hochwasserschutz im Rahmen einer staatlich geregelten Talsperrenaufsicht um.

Weitergehende Informationen bietet das HLNUG über seine Internetseiten, über Karten und zusätzliches Informationsmaterial oder Sie wenden sich direkt an unsere Expertinnen und Experten.

A handwritten signature in black ink that reads "Thomas Schmid". The signature is written in a cursive, flowing style.

Prof. Dr. Thomas Schmid  
Präsident des Hessischen Landesamtes für Naturschutz,  
Umwelt und Geologie

# 1 Einleitung

**HEINER HEGGEMANN & CHRISTINA HEINRICHS \***

Das Rhein-Main-Gebiet ist mit seiner Metropole Frankfurt die bevölkerungsreichste und wirtschaftlich die bedeutendste Region Hessens. Die Region liegt im mittleren bis südlichen Teil des Landes und grenzt an die Bundesländer Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern. Eine allgemein gültige geographische Abgrenzung des Rhein-Main-Gebietes existiert bis heute nicht. Je nach wirtschaftlichen, politischen, geologischen oder naturräumlichen Kriterien verschieben sich die Grenzen. In dieser Broschüre wird in erster Linie der zentrale Bereich rund um Frankfurt am Main mit oberflächennah anstehenden tertiären sowie quartären Sedimenten betrachtet (vgl. Abb. 1, 2).

Durch steigende Bevölkerungszahlen wird der vorhandene Wohnraum immer knapper, so dass gerade in dem dicht besiedelten Raum des Rhein-Main-Gebietes neue Flächen für Bauvorhaben erschlossen werden müssen. Doch kann auch überall gefahrlos gebaut werden? Worauf sollte geachtet werden, bevor eine Fläche als Baugebiet ausgewiesen wird und mit

## Allgemeine Informationen

Die Broschüre betrachtet das hessische Rhein-Main-Gebiet zwischen Hanau und Wiesbaden, in dem überwiegend die Gesteine des Tertiärs und Quartärs oberflächennah anstehen. Innerhalb der so definierten Ausdehnung befinden sich die Städte Friedberg, Bad Homburg v. d. H., Hanau, Offenbach a. M., Frankfurt a. M., Hofheim a. T., Rüsselsheim und Wiesbaden (Abb. 1).

Landschaftlich wird die Region von den namensgebenden Flüssen Rhein und Main als auch der Nidda und Kinzig geprägt. In dem von Flüssen durchzogenen Senkungsgebiet liegen die Höhenmeter zwischen 80 bis 100 m ü. NN. In den Randgebieten der Mittelgebirge steigt das Relief jedoch schnell bis auf über 200 m ü. NN (am Taunusrand über 300 m ü. NN) an.

Klimatisch wird das Rhein-Main-Gebiet durch seine Beckenlage und die angrenzenden Mittelgebirge beeinflusst. Aufgrund dessen fällt in der Rhein-Main-

welchen baulichen Anpassungen können die Folgen des Klimawandels minimiert werden?

Die Informationsbroschüre befasst sich inhaltlich mit dem Untergrund des Rhein-Main-Gebietes und den dort verbreiteten typischen Gesteinsvorkommen und Bodentypen sowie den damit verbundenen geogenen Risiken. Für die Nutzerinnen und Nutzer in der kommunalen Verwaltung, in Ingenieurbüros aber auch für die allgemeine Öffentlichkeit wird ein erster Einblick in den geologischen und bodenkundlichen Aufbau des Rhein-Main-Gebietes ermöglicht. Dabei werden die in diesem Raum auftretenden Georisiken in Form von setzungsempfindlichen Schichten, Rutschungen, Erdfällen, Erdbeben, Radonemissionen sowie Artesern thematisiert. Darüber hinaus werden aufgrund der inhaltlichen Nähe die Themen Erosion, Auswirkungen von Bodenversiegelungen und Schadstoffbelastungen in den Böden betrachtet. Außerdem werden die wichtigen im Abbau befindlichen Rohstoffe Sand und Kies als auch die Gewinnung von Erdwärme (Geothermie) thematisiert.

Ebene mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 550 bis 700 mm wenig Niederschlag, wohingegen die Temperaturen höher als in den angrenzenden Regionen der Mittelgebirge sind. Dadurch herrscht fast schon ein „mediterranes“ Klima, was die Region u. a. zu einer günstigen Lage für den Weinanbau macht (Referenzperioden von 1981–2010; Datenquelle DWD 2021).

Das Rhein-Main-Gebiet wird meist als Metropolregion Frankfurt/Rhein-Main bezeichnet und ist eine wirtschaftlich starke Region im Herzen von Deutschland und Europa. Die geographisch günstige Lage macht die Metropolregion seit Jahrhunderten zu einem international bedeutenden Zentrum der Wirtschaft und des Transports. Unter anderem befinden sich in der Region die Bankenmetropole Frankfurt am Main (u. a. Sitz der Europäischen Zentralbank (EZB)), Wiesbaden (Landeshauptstadt von Hessen) und Deutschlands größter Flughafen (Frankfurt Airport).

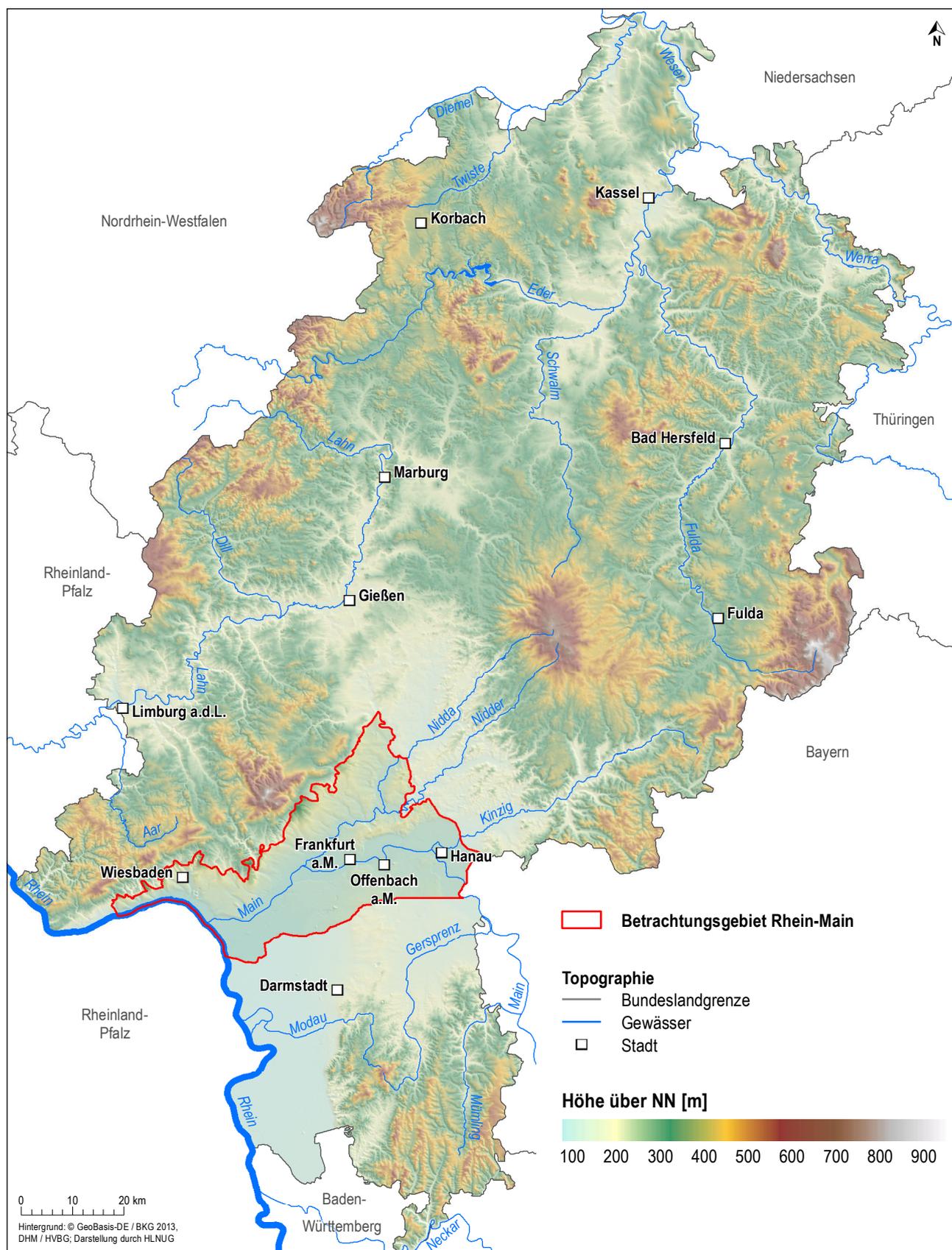


Abb. 1: Morphologische Übersichtskarte von Hessen mit dem Betrachtungsraum des Rhein-Main-Gebietes

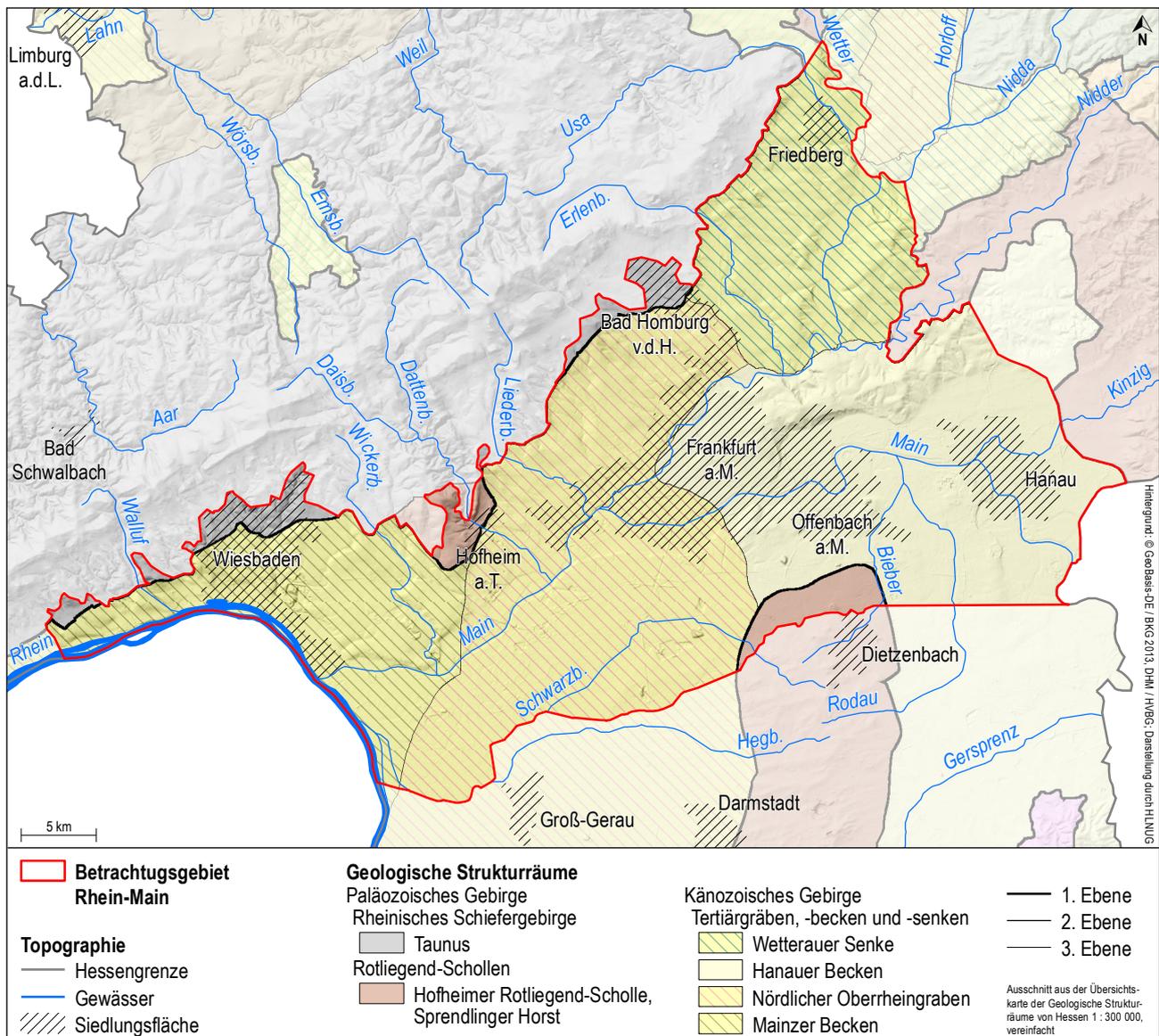
In Folge dessen unterliegt die Region einem ständigen Wandel und Wachstum, was dazu führt, dass immer mehr Flächen im Einzugsgebiet der großen Städte für neue Industrie- oder Wohnflächen freigegeben werden müssen. Aufgrund dessen ist es wichtig sich mit der regionalen Geologie, mit den Böden, Altlasten, Rohstoffen und auch den Geogefahren in der Region zu beschäftigen. Um wirtschaftlich bauen zu können, sind Informationen zu schwierigem Baugrund wich-

tig. Auch sollten lokale Gegebenheiten wie das geothermische Potenzial oder Böden für Weinbauflächen sowie wertvolle Rohstoffe genutzt, bzw. als schützenswerte Vorbehaltsgebiete bewahrt werden. Des Weiteren stellt sich die Frage, welche Folgen sich aus der voranschreitenden Bodenversiegelung und der resultierenden Austrocknung des Untergrundes ergeben und welche Anpassungen an den Klimawandel nötig sind.

## Geologische Übersicht

Das in dieser Broschüre betrachtete Gebiet entspricht im Wesentlichen dem hessischen Teil des Rhein-Main-

Gebietes. Der Betrachtungsraum liegt im Bereich verschiedener geologischer Strukturräume (Abb. 2).



**Abb. 2:** Übersichtskarte des Betrachtungsraums im Rhein-Main-Gebiet mit geologischen Strukturräumen

Vor allem die mit tertiär- und quartärzeitlichen Lockersedimenten gefüllten Becken und Senken des nördlichen Oberrheingrabens, des Mainzer und Hanauer Beckens und der Wetterau-Senke charakterisieren das hessische Rhein-Main-Gebiet. Randlich ragen Teile angrenzender Mittelgebirge wie der Taunus, die Hofheimer-Rotliegendescholle und der Spessart sowie der Sprendlinger Horst in den Untersuchungsraum. Main, Nidda und Nidder durchfließen das Gebiet von Ost nach West und der Verlauf des Rheins bildet die natürliche Grenze des Gebietes im Westen.

Die ältesten Gesteinseinheiten bilden nördlich des Untersuchungsraumes das Rheinische Schiefergebirge mit dem Taunus als seinem südlichsten Gebirgsabschnitt (Abb. 3). Das Mittelgebirge war vor ca. 330 Mio. Jahren, also während des Karbons im Erdaltertum, durch die Kollision von Kontinentalplatten entstanden. Dabei wurden die flachliegenden Meeresablagerungen zwischen den Kontinentalplatten zusammengeschoben, steil gestellt, gefaltet und an weitreichenden Störungszonen gegeneinander überschoben. Diese Vorgänge werden als sogenannte variskische Gebirgsbildung bezeichnet und führten durch erhöhte Temperaturen und Drücke zu Mineralneubildungen in den Gesteinen – sie wurden metamorph überprägt und es bildete sich die für das Gebirge namensgebende Schieferung, eine engständige und gleichmäßige Spaltbarkeit der Tonsteine, aus. Im Vordertaunus zwischen Wiesbaden, Hofheim und Bad Homburg führte dieser Prozess zu einer so engständigen und gleichmäßigen Schieferung, dass diese Gesteine als Phyllite bezeichnet werden (Abb. 3).

Mit dem Ende der variskischen Gebirgsbildungsphase und der anschließenden Hebung der Gesteine über das Meeresniveau wurde das Gebirge mit der Zeit abgetragen. Die exogenen Kräfte der Erosion führten zur Bildung von Gebirgsschuttmassen, die sich in den vorgelagerten Senken sammelten. Eine dieser Senken war die Saar-Nahe-Senke der Permzeit, die sich südlich des Hunsrück und Taunus von Südwest nach Nordost von Rheinland-Pfalz über Hessen bis nach Thüringen erstreckte. Die zumeist roten, weil oxidierten Sedimente, haben von den Bergleuten den Namen Rotliegendes erhalten. Bohrungen beweisen ihre Verbreitung unterhalb der jüngeren Lockersedimente des Rhein-Main-Gebietes. Randlich sind sie auf der Hofheimer-Rotliegendescholle und im Sprendlinger Horst an der Erdoberfläche aufgeschlossen (Abb. 2, 3).

In der Erdneuzeit ist das Rhein-Main-Gebiet Teil eines Nord-Süd gerichteten Senkungsgebietes, das sich über den Oberrheingraben, das Mainzer und das Hanauer Becken und die Wetterau-Senke erstreckt (Abb. 2). Diese Schwächezone der Erdkruste ist Teil des größeren „Europäischen Rift-Systems“. Im Bereich des Rhein-Main-Gebietes gabelt sich der nördliche Oberrheingraben in einen Nordost-Ausläufer, der über die Wetterau, den Vogelsberg bis in die Niederrheinische Senke reicht und einen Nordwest-Abschnitt, der sich über das Mittelrheintal bis in die Niederrheinische Bucht erstreckt. Die Spannungen/Senkungen der Erdkruste an diesen Schwächezonen sind die Ursache für schwache bis mittelstarke Erdbeben im Bereich des nördlichen Oberrheingrabens und des Rhein-Main-Gebietes.

Die Senkung des Rhein-Main-Gebietes begann vor 45 Mio. Jahren im Tertiär und reicht bis in die Gegenwart. Die messbaren Absenkungsbeträge liegen z. B. im Raum Darmstadt bei 0,2–0,4 mm pro Jahr, wodurch der nördliche Oberrheingraben insgesamt eine maximale Absenkung von bis zu 4 000 m seit Beginn erreicht hat. Die Absenkungen im Bereich der Strukturräume des Mainzer und Hanauer Beckens und der Wetterau-Senke waren längst nicht so groß. In Teilen des Tertiärs (Oligozän bis Miozän) führte dies zu einer zeitweiligen Meeresverbindung zwischen dem im Norden und dem im Süden Europas befindlichen Meeresraum. Das Meer erreichte die Tertiär-Senken, wodurch sich im Rhein-Main-Gebiet marine kalkreiche Ablagerungen mit einem großen Fossilreichtum bildeten. Während des Miozäns erreichten Lavaströme aus dem damals aktiven Vulkangebiet des Vogelsberges das östliche Rhein-Main-Gebiet. Die vulkanischen Gesteine finden sich in Bohrkernen aus Frankfurt und Offenbach wieder und stehen im Raum Steinheim oberflächennah an (Abb. 3). Im jüngeren Tertiär, dem Pliozän, schloss sich diese Meeresverbindung wieder und es bildeten sich vor allem fluviatile und limnische Sedimente sowie Braunkohle-Flöze aus.

Die letzten 2,6 Mio. Jahre vor Heute werden in der Erdgeschichte als Quartär-Zeit bezeichnet. Das Quartär wiederum wird in Holozän und Pleistozän gegliedert (Tab. 1, Abb. 3). Das Holozän ist die jüngste Epoche unsers Erdzeitalters und begann vor etwa 11 700 Jahren. Es ist somit das Erdzeitalter in dem wir leben. In dieser Zeit bildeten sich auch die

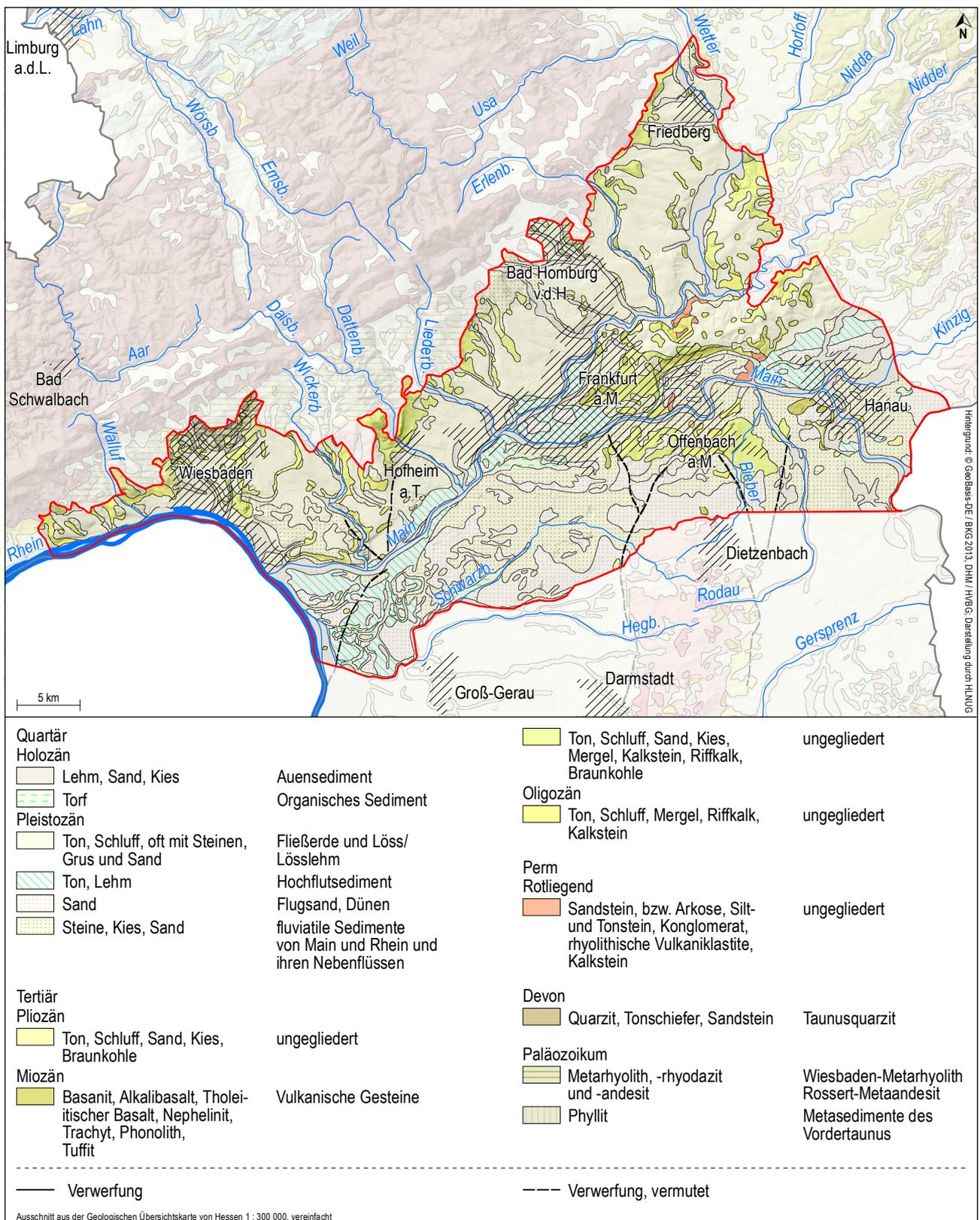


Abb. 3: Geologische Übersichtskarte des Betrachtungsraums im Rhein-Main-Gebiet

**Tab. 1:** Chronostratigraphische und lithostratigraphische Gliederung im hessischen Rhein-Main-Gebiet in Verbindung mit den wichtigsten Gesteinstypen und ihrer Genese. Daneben sind typische Rohstoffe als auch die mit den Gesteinen verbundenen Georisiken benannt.

Allgemeine Stratigraphie										
Ära	Periode	Epoche	Lithostratigraphie		Geogenese	Petrographie	Rohstoffe	Georisiken		
Känozoikum (Erdneuzeit)	Alter [Ma]	Holozän			Auenablagerungen und Moorbildungen	Schluff bis Feinsand, tonig bis mittelsandig; Torf	Sand, u. a. Mosbacher Sande und Kies			
			Quartär	Pleistozän	Untermain-Niederterrassen-Fm. t7 t6	Flussablagerungen; Windablagerungen; vulkanische Lockergesteine; Bodenbildungen	Kies und Sand, Schluff und Ton	Sand und Löss-lehm (Ziegelrohstoff, Heilerde)		
	Untermain-Mittelterrassen-Fm. t5 t4 t3 t2									
	Untermain-Hauptterrassen-Fm. t1									
	2,6	Pliozän	Iffezheim-Fm.		limnische und fluviatile Ablagerungen	Ton, Schluff, Sand, z.T. Kies und Braunkohle				
			Tertiär	Miozän	Untermain-Basalt		Ablagerungen des Vogelsberg-Vulkanismus	tholeitischer Basalt	Basalt (Baurohstoff)	
	Niederrad-Fm.	Landschneckenmergel			flachmarine Ablagerungen, Lagunensedimente, Riffbildungen	Mergel, Riffkalk	Kalkstein und Mergel (Zementrohstoff)			
	Frankfurt-Fm.	Hydrobien-Schichten				Mergelton, Riffkalk, Kalkstein, Fossilsand				
	Wiesbaden-Fm.	Inflaten-Schichten				Mergel und Kalkstein				
	Rüssingen-Fm.	Cerithien-Schichten				Kalkstein, Kalksand, Mergel und Riffkalk				
	Oberrad-Fm.		Mergelton, z.T. Kies							
	Oligozän	Oppenheim-Fm.	Cyrenenmergel-Gruppe	flachmarine Ablagerungen unter ruhigen Bedingungen	Mergelton bis Mergel, Glimmersand, Braunkohle					
		Hochheim-Fm.			Mergelton bis Ton					
		Weisenu-Fm.			Kies, Schluff, Mergel, organischer Ton					
Sulzheim-Fm.										
Eozän	Eozäner Basiston	Pechelbronn-Fm.		erster Meereseinbruch	Ton und Schluff					
		Schichtlücke								
Paläozoikum (Erdaltertum)	Perm	Rotliegend	ungegliedert		kontinentale, terrestrische Ablagerungen von Sedimenten und Vulkaniten	Sandstein, Arkose, Silt- und Tonstein, Konglomerat, Vulkanit				
			Devon	Unterdevon	Taunusquarzit		Meeresablagerungen, infolge der Gebirgsbildung schwach metamorph überprägt	Quarzit	Taunusquarzit (Bau-, Glas- u. Keramikrohst.)	
	Metasedimente im Vordertaunus					Tonschiefer, Phyllit				
	Silur	Wiesbaden-Metarhyolith			metamorphe Gesteine entstanden durch Umwandlung anderer Gesteine infolge erhöhter Druck- und/oder Temperaturbedingungen	Metarhyolith, Metarhyodazit	Serizit (Naturwerkstein)			
		Rosser-Metaandesit		Metaandesit						
Ordoviz	Bierstadt-Phyllit			Phyllit, Tonschiefer						

Erhöhtes Radonpotenzial entlang von tiefreichenden Störungszonen

**Georisiken:** ■ rutschgefährdet ■ setzungempfindliche Schichten ■ Verkarstung ■ Suffosion ■ Steinschlag/Felssturz

Auenlandschaften der rezenten Flusssysteme aus. Den größten Teil des Quartärs macht das Pleistozän aus. Es dauerte von 2,6 Mio. Jahren bis 11 700 Jahren. Vor allem die immer wieder wechselnden Klimabedingungen von Kalt- und Warmzeiten haben diese erdgeschichtliche Epoche geprägt. In den Kaltzeiten wurde feiner Staub aus den Flussauen, den Vorlandgebieten der Gletscher in Nordeuropa und den Alpen durch Windtransport bis in das Rhein-Main-Gebiet verfrachtet. Dieses äolische Sediment wird als Löss bezeichnet und bildet in der Wetterau mehrere Meter mächtige Ablagerungen, auf denen sich wiederum sehr fruchtbare Böden entwickelt haben. Die Wetterau ist eine der landwirtschaftlich ertragreichsten Landschaften Deutschlands und wird weitflächig und intensiv genutzt. Im Rhein-Main-Gebiet schütteten die Flussläufe von Rhein und Main mächtige Ton-, Sand- und Kiespakete in den sich absenkenden Graben- und Beckenzonen auf (Abb. 3). Diese Sedimente, die im nördlichen Oberrheingraben bis zu 300 m mächtig werden können, enthalten

eines der größten Grundwasservorkommen Hessens. Hier wird das Grundwasser in den Porenräumen der Kies- und Sandlagen mehrerer Grundwasserleiter gespeichert und transportiert. Zwischengeschaltete, wenig wasserwegsame Tonschichten gliedern den Sedimentkörper in mehrere Grundwasserstockwerke und schützen diese vor Verunreinigungen.

Die Nutzung des Rohstoffes Grundwasser ist im Ballungsraum des Rhein-Main-Gebietes intensiv. Sand und Kies sind aber gleichzeitig begehrte Rohstoffe für die Bauwirtschaft. Die Rohstoffgewinnung steht daher gerade in den Ballungsräumen oft in konfliktträchtiger Konkurrenz zu anderen Nutzungsansprüchen der Oberfläche.

Dieses einführende Kapitel zur Geologie des Rhein-Main-Gebietes verdeutlicht, dass die Gesteinsschichten, welche an der Erdoberfläche ausgebildet sind, große Auswirkungen auf unsere Lebensbedingungen haben.

## 2 Geologie

### 2.1 Tertiär

**GU DRUN RADTKE \***

#### Einleitung

Das Tertiär ist ein Abschnitt der Erdneuzeit (Känozoikum) und zwischen 66 und 2,6 Mio. Jahre alt. Für das Rhein-Main-Gebiet (von ca. 32–15 Mio. Jahre dokumentiert) lassen sich aus dieser Zeit verschiedene Folgen von Sedimenten beschreiben (RADTKE 2021).

Diese Zeit war durch dramatische Ereignisse geprägt. Nach einer sehr langen, durch Abtragung geprägten ruhigen Phase hat sich im Laufe des Tertiärs durch Öffnung des Nordatlantik und Auffaltung der Alpen ein Spannungsfeld entwickelt, das ein längs durch Europa reichendes Grabensystem entstehen ließ. Ein Teil dieses Bruchsystems, der Oberrheingraben, wurde zu einem 50 km breiten und durch kontinuierliche Absenkung bis zu 3000 m tiefen Graben. Verwerfungszonen an seinen Rändern sind bis heute aktiv und für (leichte) Erdbeben bekannt. Das Meer aus Norden – Vorgänger der Nordsee, ehemals bis in die Kasseler Gegend reichend – und das aus dem Vorgänger des Mittelmeers, der Tethys, nahm hier den Raum ein und veränderte ihn. Das Meer bildete verschiedene Teilbereiche aus, die gegliedert werden in das Mainzer Becken (heute größtenteils linksrheinisch) (KELLER & RADTKE 2007, GRIMM & RADTKE 2014), das Hanauer Becken (Raum Frankfurt a. M.–Hanau) (KÜMMERLE & RADTKE 2001, 2012) und die Wetterau (Bad Vilbel–Friedberg–Vogelsberg). Es wurden fossilreiche Schichten abgelagert, die schon im frühen 19. Jahrhundert berühmte Forscher zu Aufsammlungen inspirierten, z. B. die Gebrüder Sand-

berger (1858–1863). Viele dieser Fossilien sind u. a. im Landesmuseum Wiesbaden ausgestellt (FÖRSTERLING & RADTKE 2012).

Zu Beginn des Tertiärs lag der Ablagerungsraum deutlich südlicher als heute, etwa auf der Höhe Siziliens. Das Klima war insgesamt tropisch bis subtropisch, sodass fast karibische Verhältnisse herrschten. Es bildeten sich typische Sedimente eines flachen Meeres mit Kalksteinen, Kalksandem, Mergeln und Riffgesteinen. In tieferen, von der Strömung weniger erfassten Bereichen sind die Sedimente eher tonig mit Tonmergeln bis Mergelton. Alle Sedimente sind kalkhaltig und führen z. T. sehr schöne Fossilien in guter Erhaltung und hoher Biodiversität (KÜMMERLE & RADTKE 2012). Von den nahe gelegenen Festlandsbereichen wie z. B. dem Taunus wurden Gesteinsmaterial und Reste landbewohnender Lebewesen eingeschwemmt.

Das damalige Meer kann man sich lang und schmal vorstellen, ähnlich dem heutigen Roten Meer, reich an Fauna und Flora. Über lange Zeiträume war der Oberrheingraben in Absenkung begriffen, so dass mächtige Sedimentfolgen entstanden. Randlich, auf den Grabenschultern, bildeten sich als Ausbuchtungen das Mainzer und Hanauer Becken sowie die Wetterau aus mit ihren charakteristischen Flachwassersedimenten (KÜMMERLE & SEIDENSCHWANN 1993, 2009, RADTKE 2009).

#### Mergeltertiär (Eozän – oberes Oligozän)

Zwei besondere Sedimentfolgen sind prägend für die Tertiärzeit. Zunächst entwickelte sich das Mergel-tertiär mit Tonmergeln und Mergeltonen, die in

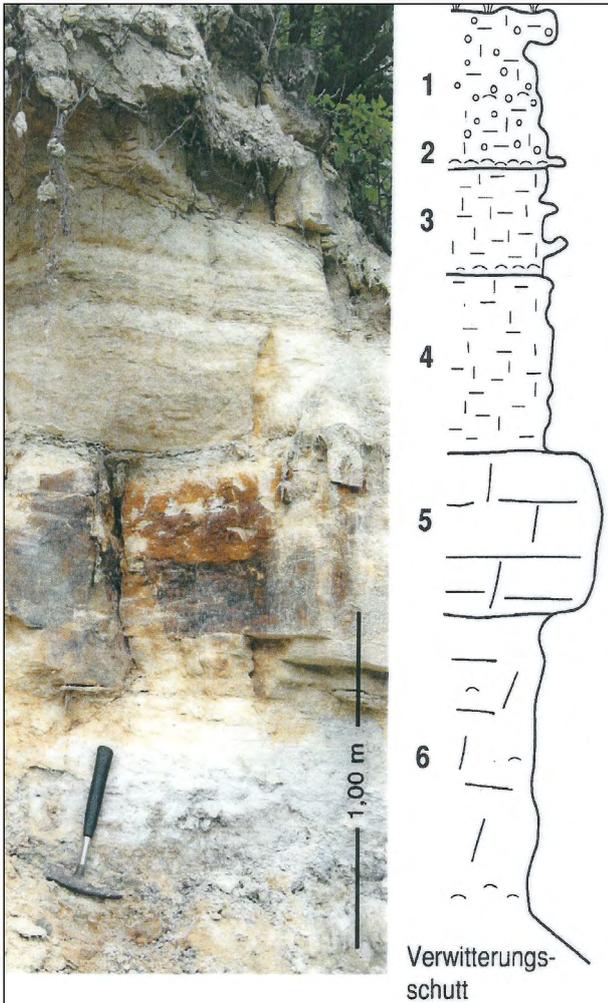
einem ruhigen, vergleichsweise tieferen Ablagerungsraum entstanden. Zu Beginn und besonders zur Zeit des „Rupel“-Meeres lebten sowohl vielgestal-



**Abb. 1:** Die *Glycymeris* sind typische Muscheln des Meeresandes. Sie lebten flach eingegraben im Sediment und waren dadurch besser vor Brandung und starken Wellenbewegungen geschützt (Mergeltertiär).



**Abb. 2:** Überblick über den Kalksteinbruch Kalkofen bei Wiesbaden, nördlich der A66 gelegen: Monotone Wechselfolge von Kalksteinbänken und Mergeln (Kalktertiär)



**Abb. 3:** Wechselfolge von Kalkmergeln und Kalksteinen der gebankten Fazies der Oppenheim-Formation im Steinbruch **Falkenberg** bei Hochheim a. M. (Kalktertiär)



**Abb. 4:** Die Turmschnecke gehört zu den „Cerithien“ – namensgebend für die Cerithienschichten im Kalktertiär; sie stehen für brackisch-marines Wasser

tige einzellige Kleinstlebewesen wie Foraminiferen (Kammerlinge) als auch aktive Schwimmer wie Haie, die sich in Form ihrer Haifischzähne verewigten (RADTKE et al. 2021). An den Küsten kam es aufgrund von Wellenbewegung und stärkeren Strömungen zu grobkörnigeren Meeressanden, die mehr dickschalige Mollusken beherbergten (Abb. 1). Im späteren Mergeltertiär zog sich das Meer wieder zurück, das

Wasser wurde brackisch infolge der Zuflüsse von Süßwasser von der Landseite her. Dokumentiert wird das von den glimmerreichen Mergeln, deren Tonminerale meist schichtparallel eingeregelt sind und somit leicht zu Hangrutschungen neigen wie z. B. in Weinbergen und an Straßenböschungen im sog. „Schleichsand“.

## Kalktertiär (oberes Oligozän - unteres Miozän)

In einer zweiten Meereseinbruchphase bildeten sich mächtige Kalksteine, Mergelsteine und Riffkalke, dazwischen Kalksande (Abb. 2, 3). Die Sedimente sind jetzt mehr von heller Farbe. Sie wurden in einem flachen, kalk-übersättigten lagunenartigen Meer gebildet, wo eine Unmenge von Mollusken lebte, wie sie die Ablagerungen des Mainzer Beckens berühmt gemacht haben (Abb. 4).

Eine Besonderheit dieses Zeitabschnitts waren die Riffgesteine (Abb. 5), die von gemeinschaftlich organisierten, Photosynthese betreibenden Cyanobakterien (Blaugrün-Algen) gebildet wurden. Sie fingen mit ihren schleimigen Fäden immer wieder aufgewirbeltes feinstes Sediment ein, wuchsen dann darüber hinaus dem Licht entgegen. Mit etwas Glück findet man in den Kalksteinen die sehr kleinen biogen gefällten Kalkröhren, die, von oben betrachtet, blumenkohlartige Strukturen bilden. Solche Organismen gab es schon seit mehr als 3,5 Mrd. Jahren, sie sind die ältesten Bewohner unserer Erde.

Die sehr kompakten und harten Gesteine dieser Einheit bilden örtlich den Baugrund für Hochhäuser z. B. in Frankfurt. Zu bedenken ist, das Kalk leicht wasserlöslich ist, was zu Verkarstung, Dolinen und Kavernen im Untergrund führen kann (Abb. 6) (RADTKE

2009, 2018, RADTKE & KÜMMERLE 2010, RADTKE & REISCHMANN 2011).

Im weiteren Verlauf des Tertiärs und fortschreitender Hebung der Alpen zog sich das Meer zurück in Richtung auf die heutigen Küstenlinien. Es bildete sich ein Restmeer mit nur noch geringem Salzgehalt. Auf beiden Seiten des Oberrheingrabens wurden unterschiedliche Sedimente ausgebildet. Auf der Seite des Mainzer Beckens blieb es bei den flachmeerischen Kalkgesteinen wie der Wiesbaden-Formation (Abb. 2, Abb. 7–9). Im Frankfurter und Hanauer Gebiet bestand der Ablagerungsraum viel länger, bis in das Mittel-Miozän mit den Vogelsberg-Vulkanen, deren Laven bis hierher vorgedrungen sind. Die Sedimente bleiben weiterhin tonig-mergelig. In den Landschneckenmergeln finden sich oft sehr poröse Riffgesteine (Abb. 5). Danach hat sich das Meer endgültig zurückgezogen und es entstanden Flusssedimente oder große Delta-Areale, in denen kalkfreie Sedimente mit Tonen, Schluffen, Sanden und Feinkiesen zur Ablagerung kamen.

Fluviatile Sedimente kennzeichnen auch das jüngere Pliozän z. T. mit vereinzelt gebildeten Braunkohlen und Funden von Pflanzenresten und Holzfragmenten (RADTKE 2018).



**Abb. 5:** Anschnitt eines Algenriff-Kalksteins mit Algenfilamenten im Wechsel mit stromatolithischen Krusten; sie kommen nur im Kalktertiär vor



**Abb. 7:** Das massenhafte, individuenreichen aber artenarmen Vorkommen der kleinen Wattschnecke *Hydrobia* ist namensgebend für die Hydrobien-Schichten (Wiesbaden-Formation) im Dyckerhoff-Steinbruch und Anzeiger für Brackwasserablagerungen (Kalktertiär)



**Abb. 6:** Verkarsteter Kalkstein mit offenen Kluft- und Auslaugungshohlräumen und Verheilungsprozessen mit sekundären Kalzit-Rasen; Hydrobien-Schichten aus dem Untergrund im Vorfeld des Frankfurter Hauptbahnhofs



**Abb. 8:** Abdruck von Trockenrissen auf der Unterseite einer Kalksteinbank; sie sind Anzeiger von Trockenfallen im Ablagerungsraum am Ende des Kalktertiärs (Dyckerhoff-Steinbruch)



**Abb. 9:** Detail aus dem Dyckerhoff-Steinbruch: Wechselfolge von dünnbankigen Mergeln in einer wechselnden hell/dunkel Schichtung unterhalb einer Kalksteinbank (Kalktertiär)

## Literatur

- FÖRSTERLING, G. & RADTKE, G. (2012): Der tertiäre Lebensraum im Mainzer Becken und seine Fossilien. – In: Streifzüge durch die Natur von Wiesbaden und Umgebung (175 Jahre Nassauischer Verein für Naturkunde). – Jb. nass. Ver. Naturkde., Sonderbd. 2, 2. Aufl.: 19–32, 28 Abb.; Wiesbaden.
- GRIMM, K.I. & RADTKE, G. (2014): The Tertiary of the Mainz Basin. Tertiäre Sedimente – Das Mainzer Becken. – In: RÖHLING, H.-G. (ed.): GeoFrankfurt 2014 – Dynamik des Systems Erde. – EDGG, Exkursionsführer Veröff. dt. Ges. Geowiss., **252**: 51–58, 7 figs.; Hannover.
- KELLER, T. & RADTKE, G. (2007): Quartäre (Mosbach-Sande) und kalktertiäre Ablagerungen im NE Mainzer Becken (Exkursion L am 14. April 2007). – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. **89**: 307–333, 9 Abb., 3 Taf.; Stuttgart.
- KÜMMERLE, E. & SEIDENSCHWANN, G. (1993): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Bl. 5818 Frankfurt a. M. Ost. – 3. Aufl., 308 S., 31 Abb., 36 Tab., 3 Beibl.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & RADTKE, G. (2001): Mit dem Main durch Frankfurt – ein geologischer Spaziergang. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **122**: 5–21, 12 Abb.; Wiesbaden.
- KÜMMERLE, E. & SEIDENSCHWANN, G. (2009): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen, 1 : 25 000, Bl. 5817 Frankfurt a.M. West. – 3. Aufl.: 308 S., 43 Abb., 33 Tab., 3 Beibl.; Wiesbaden (Hess. L.-Amt Umwelt Geologie).
- KÜMMERLE, E. & RADTKE, G. (2012): Die Fossilien des Tertiärmeeres im Hanauer Becken. – Jber. wetterau. Ges. ges. Naturkde. (Jubiläumsband), **162**. Jg.: 59–77, 21 Abb., 1 Tab.; Hanau.
- RADTKE, G. (2009): Standardprofil der tertiären Abfolge. – In: KÜMMERLE, E. & SEIDENSCHWANN, G. (2009): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Bl. 5817 Frankfurt a.M. West. – 3. Aufl.: Beibl. 2; Wiesbaden.
- RADTKE, G. (2018): Geologischer Untergrund der Stadt Frankfurt am Beispiel des Europaviertels. – Altlasten annual, **2018**: 105–113, 8 Abb.; Wiesbaden.
- RADTKE, G. (2021): 5.1.2.1 Sedimentgesteine. – In: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hrsg.): Geologie von Hessen: 330–404, 39 Abb., 9 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- RADTKE, G. & KÜMMERLE, E. (2010): Geologische Karte Stadt Frankfurt a.M. – Jahresbericht 2009 des HLUG: 115–121, 7 Abb.; Wiesbaden.
- RADTKE, G. & REISCHMANN, T. (2011): Unter Oberursel – Aufbau des geologischen Untergrundes von Oberursel. – Umwelt und Geologie: Jahresbericht 2011 des HLUG: 113–118, 10 Abb.; Wiesbaden.
- RADTKE, G., PIPPÈRR, M. & SCHMIDT, L. (2021): Die Foraminiferen-Vergesellschaftungen vom Kaiserlei und Riederwald (Unter-Oligozän, Hanauer Becken). – Geol. Jb. Hessen, **140**: 195–219, 6 Abb., 4 Tab., 3 Taf., Anh.; Wiesbaden.

## 2.2 Quartär

CHRISTIAN HOSELMANN \*

### Einleitung

Das Quartär ist der jüngste Abschnitt der Erdgeschichte und begann vor rund 2,6 Mio. Jahren (Tab.1). Somit ist es auch das Erdzeitalter, in dem wir derzeit leben. Geprägt wird dieser Zeitabschnitt durch eine charakteristische Wechselfolge von Kalt- und Warmzeiten. Diese klimatische Entwicklung hat auch auf die Ablagerungen im Rhein-Main-Gebiet starken Einfluss. Einerseits dominieren hier Sande und Kiese und zum Teil feinkörnige Sedimente, die vom Main und seinen Nebenflüssen sowie vom Rhein abgelagert wurden. Diese fluviatilen Ablagerungen erfolgten in den Kalt- und untergeordnet auch in den Warmzeiten. Andererseits wurden in den Kaltzeiten äolische, also durch den Wind transportierte Sande und Schluffe abgelagert. Die klimatischen Bedingungen des Rhein-Main-Gebietes während der Kaltzeiten sind mit den heutigen Bedingungen im nördlichen Kanada, Teilen Sibiriens und auf Spitzbergen vergleichbar. In diesem sog. Periglazialraum kam es insbesondere in den sommerlichen Auftauphasen zu internen Verwürgungen (Kryoturbation) der Sedimentabfolge sowie in Abhängigkeit vom Relief zum Bodenfließen (Solifluktion). Gletscher, die es im Quartär in Nord- und Süddeutschland gegeben hat, gab es hier dagegen nicht. In den letzten Jahrhunderten, und verstärkt in den letzten Jahrzehnten, beeinflusst der Mensch die Ablagerungen des oberflächennahen Untergrundes, indem er Rohstoffe abbaut, Deponien anlegt und große Flächenanteile

versiegelt – hier dominieren oberflächennah anthropogene Ablagerungen. In der folgenden Vorstellung der quartären Sedimente des Rhein-Main-Gebietes sollen aber die geogenen Ablagerungen im Vordergrund stehen.

Die Mächtigkeiten quartärer Sedimente schwanken zwischen den geologischen Strukturräumen des Rhein-Main-Gebietes recht stark. Dies ist auf unterschiedliche Senkungsraten der geologischen Strukturräume zurückzuführen. Die größten Mächtigkeiten mit 70 m sind im Teilgebiet des nördlichen Oberrheingrabens bei Mörfelden-Walldorf und Rüsselsheim bekannt und Absenkungen der Erdoberfläche sind hier bis heute noch zu messen. Im Gegensatz dazu liegen in Hebungsgebieten nur sehr geringmächtige quartäre Bedeckungen im Dezimeterbereich vor. Solche Hebungsgebiete sind in Teilbereichen des Hanauer Beckens vorzufinden. In weiten Teilen der Untermainebene sind fluviatile Sedimente des Mains in einer Mächtigkeit von 20 bis 40 m anzutreffen.

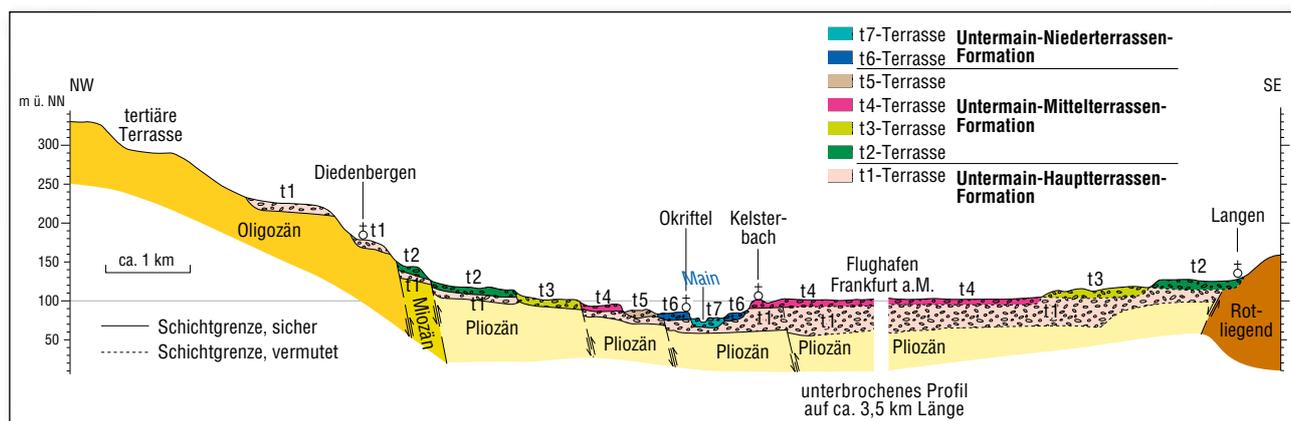
Der oberflächennahe Untergrund des Rhein-Main-Gebietes wird in verschiedenen Exkursionsführern detailliert beschrieben (SEMMELE 2001, 2006, ANEFELD et al. 2018, HOSELMANN et al. 2018), so dass der Raum auch selbständig geologisch erkundet werden kann.

### Fluviatile Ablagerungen

Im Rhein-Main-Gebiet dominieren oberflächennah die fluviatilen Ablagerungen vom Main sowie seinen größeren Zuflüssen Nidda und Kinzig (Abb. 3 Kap. Einleitung Geologie). Im nördlichen Oberrheingraben und Mainzer Becken kommen zusätzlich Sedimente des Rheins hinzu.

Die Ablagerungen des Mains können in drei geologische Formationen unterteilt werden (Tab. 1): a) in

die unterpleistozäne Untermain-Hauptterrassen-Formation, b) in die mittelpleistozäne Untermain-Mittelterrassen-Formation sowie c) in die oberpleistozäne Untermain-Niederterrassen-Formation. Zur Ablagerungszeit der Untermain-Hauptterrassen-Formation war der Ablagerungsraum Senkungsgebiet, so dass eine Stapelung der fluviatilen Sedimente bis zu 40 m möglich war. Aufgrund nachfolgender tektonischer Hebungsprozesse schnitt sich der Main in



**Abb. 1:** Geologischer NW-SE-Schnitt durch die pleistozäne fluviatile Terrassenabfolge des Mains im Bereich von Diedenbergen–Kelsterbach–Frankfurter Flughafen–Langen (umgezeichnet nach SEMMEL 1974). Nach SEMMEL (u. a. 1974 und 2006) lassen sich die Formationen noch weiter untergliedern: die Untermain-Hautterrassen-Formation in die t1-Terrassen a bis e; die Untermain-Mittelterrassen-Formation in die t2- bis t5-Terrasse, die Untermain-Niederterrassen-Formation in die t6- und t7-Terrasse.

Teilgebieten in den älteren Untergrund ein, so dass sich eine Terrassentreppe ausbilden konnte (Abb. 1).

Die petrographische Zusammensetzung der Sande und Kiese spiegelt das Einzugsgebiet der Flusssysteme wieder. Dabei bestehen die Kiese hauptsächlich aus Sandsteinen des Buntsandsteins, Quarz, Quarzit und Lydit (Kieselschiefer) des Karbons und Devons. Hierbei tragen die Lyditgerölle im Hanauer Becken wichtige Informationen zum Einzugsgebiet des Mains bei. Da der Ursprung des Lydits im Frankenwald liegt, kann aus diesen auf eine rückschreitende Erosion im Pleistozän und somit auf eine Erweiterung des Einzugsgebietes über den Obermain und die Regnitz geschlussfolgert werden (LANG 2007). Zudem sind in der Untermain-Hauptterrassen-Formation in Rinnen wiederholt warmzeitliche Tonlagen enthalten.

Makroskopisch lassen sich die pleistozänen Terrassensedimente nicht immer gut von den liegenden pliozänen Sanden und kiesigen Sanden unterscheiden, da auch im Quartär viel liegendes Material aus dem Pliozän erodiert und engräumig wieder in jüngeren fluviatilen Sedimenten abgelagert wurde.

Bis auf die jüngeren Abschnitte der Untermain-Mittelterrassen-Formation sowie der Untermain-Niederterrassen-Formation sind die Ablagerungen karbonatfrei. Ab dem Frankfurter Stadtwald sind sämtliche fluviatilen Ablagerungen in der Regel karbonatfrei.

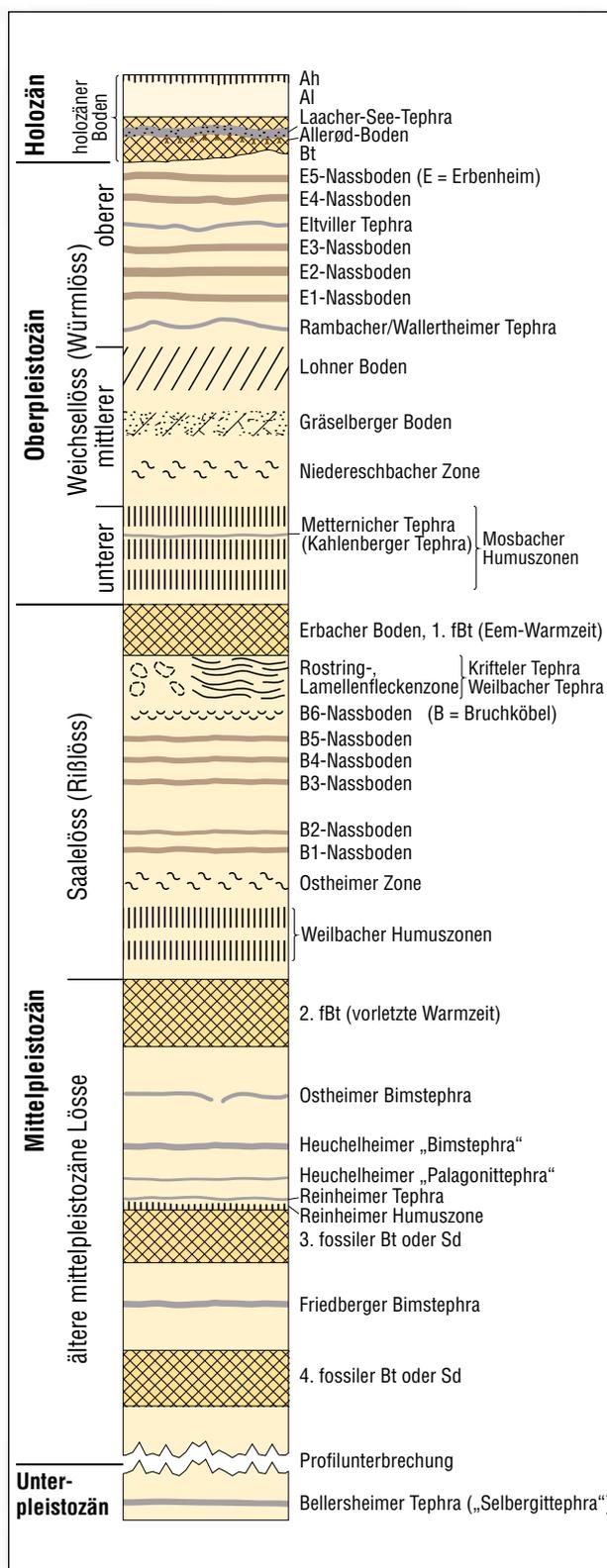
Im geologischen Strukturraum des nördlichen Oberrheingrabens treten die fluviatilen Sedimente des Rheins auf. Diese setzen sich aus karbonathaltigen Sanden und kiesigen Sanden zusammen, in denen auch feinkörnige limnisch-fluviatile Ablagerungen auftreten. Die gesamte Abfolge wurde wiederholt im Rahmen von Forschungsbohrungen des HLNUG durchbohrt und untersucht (u. a. Viernheim, Pfungstadt, Groß-Rohrheim und jüngst bei Riedstadt-Erfelden). Die Ergebnisse zu den Bohrungen wurden vielfach veröffentlicht (u. a. GABRIEL et al. 2013, HOSELMANN 2021). Im Bereich Mörfelden-Walldorf bis zum Frankfurter Flughafen im nördlichen Oberrheingraben, aber auch im Bereich Wiesbaden-Amöneburg und -Biebrich verzahnen sich die fluviatilen Sedimente des Rheins mit den Ablagerungen des Mains. Anhand vielzähliger Bohrungen konnten fluviatile Sedimente des Mains bis in den Raum nördlich von Gräfenhausen nachgewiesen werden. Dagegen konnten aber auch eindeutig rheinische Sedimente bis südlich des Frankfurter Flughafens beschrieben werden. Beispielsweise zeigte eine Bohrung in der Nähe der Startbahn West, unterhalb der unterpleistozänen Untermain-Hauptterrassen-Formation, pleistozäne karbonatische Sedimente des Rheins an. In einer nördlich von Mörfelden abgeteuften Forschungsbohrung (UTM: E 468662 N 5537203) konnten ebenfalls Main- und Rheinsedimente beschrieben werden. Unterhalb der Quartärbasis bei 64,5 m unter GOK folgen hier limnisch-fluviatile und fluviatile Sedimente der Iffezheim-Formation (Pliozän).

## Windablagerungen

Löss, Flugsand und seine Mischformen (Lösssand, Sandlöss und Sandstreifenlöss) treten oberflächennah weit verbreitet im Rhein-Main-Gebiet auf (Abb. 3 Kap. Einleitung Geologie). Klimatisch handelt es sich um kaltzeitliche Ablagerungen des Periglazialraums. Liefergebiete sind die fluviatilen Ebenen der Flusstäler, beim Löss ist aber auch mit einem nicht unerheblichen Anteil an Ferntransport zu rechnen; Liefergebiete hierfür dürften daher auch die freigelegten Schelfe der west- bis nordwesteuropäischen Küsten sein, bedingt durch den um mehr als 100 m tiefer liegenden Meeresspiegel während den Kaltzeiten.

Die größten Löss-Mächtigkeiten von über 10 m treten im südlichen Taunusvorland und flächig weit verbreitet in der Wetterau auf. Beispielsweise war im Lössprofil bei Bad Soden über 20 m mächtiger Löss aufgeschlossen. Charakteristisch für Lössablagerungen sind Ausbildungen vielzähliger fossiler Böden, die zur Alterseinstufung der Lössse und zur Deutung des Paläoklimas genutzt werden können (Abb. 2). Für diese Untersuchungen ist das Rhein-Main-Gebiet ein klassisches Forschungsgebiet, das mit vielen Standardprofilen der Lössforschung Mitteleuropas aufwarten kann (u. a. in den Weilbacher Kiesgruben, Dyckerhoff-Aufschluss in Wiesbaden-Amöneburg, in Wiesbaden-Gräselberg, in Bad Soden und in der Wetterau Bruchköbel, Bellersheim, Münzenberg und Rockenberg). Oftmals sind die Lössprofile heutzutage nicht mehr zugänglich, so dass die Informationen zum weiterführenden Studium aus der Literatur gewonnen werden müssen (u. a. bei BIBUS 1973, SEMMEL 1974, 2007, ANEFELD et al. 2018, LOMAX et al. 2018). In Abbildung 2 wird ein Sammelprofil für das Rhein-Main-Gebiet vorgestellt. Wie aus der Abbildung ersichtlich, sind in den Lössen auch immer wieder vulkanische Ablagerungen beschrieben worden, welche dem pleistozänen Vulkanismus der Osteifel zugerechnet und aufgrund ihrer charakteristischen geochemischen Zusammensetzung zur Korrelation der Lössprofile verwendet werden können.

Im nördlichen Oberrheingraben und örtlich auch im Hanauer Becken treten insbesondere südlich des Mains Flugsande von wenigen Metern Mächtigkeit auf, die teilweise zu Dünen aufgeweht sind. Die Flugsande dürften überwiegend ein oberpleistozänes Alter (Weichsel-Kaltzeit) aufweisen. Auswehungsge-



**Abb. 2:** Sammelprofil der pleistozänen Lössse im Untermaingebiet und der Wetterau mit schematischen Eintragungen der Paläoböden und vulkanischen Lagen (umgezeichnet und zusammengefasst nach BIBUS u. a. 1973 und SEMMEL u. a. 2007)

biete dieser Sande sind die fluviatilen Schotterkörper der Untermain-Niederterrassen-Formation. Im Kelsterbacher Stadtwald werden von SEMMEL (2001) Flugsande, Dünen und z. T. Lösslehme beschrieben,

die vulkanische Ablagerungen des Laacher-See-Vulkans enthalten. Diese vulkanischen Produkte sind vor rund 12 900 Jahren auch in das Rhein-Main-Gebiet verblasen worden.

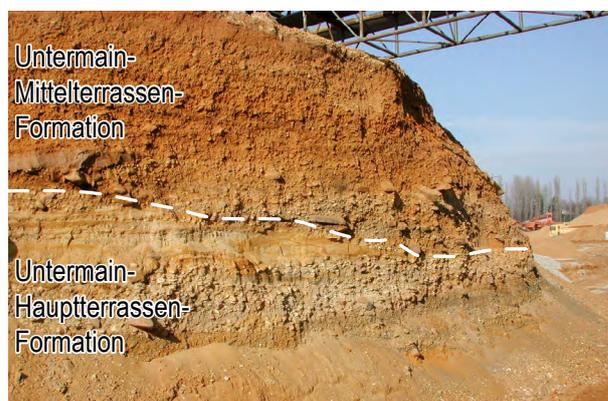
## Frostbodenbildungen

Das Rhein-Main-Gebiet zählte in den pleistozänen Kaltzeiten zum Periglazialraum. In diesem Gebiet kam es im oberflächennahen Untergrund zu Kryoturbationen, Bildung von Eiskeilpseudomorphosen und in Abhängigkeit vom Relief zu solifluidalen Umlagerungen: hierfür sind Hangneigungen von mindestens 1–2° erforderlich. Diese Umlagerungen werden als periglaziale Fließerden bezeichnet. In ebener Lage, z. B. auf Terrassenoberflächen, kommt es zu einer in situ Vermischung der anstehenden Gesteine, die mehrere Meter mächtig sein kann. Diese periglaziären Durchmischungshorizonte werden als Solimixtionsdecken bezeichnet und treten im Rhein-Main-Gebiet weit verbreitet auf. Antreiber dieser Prozesse sind die häufigen Gefrier- und Auftauprozesse.

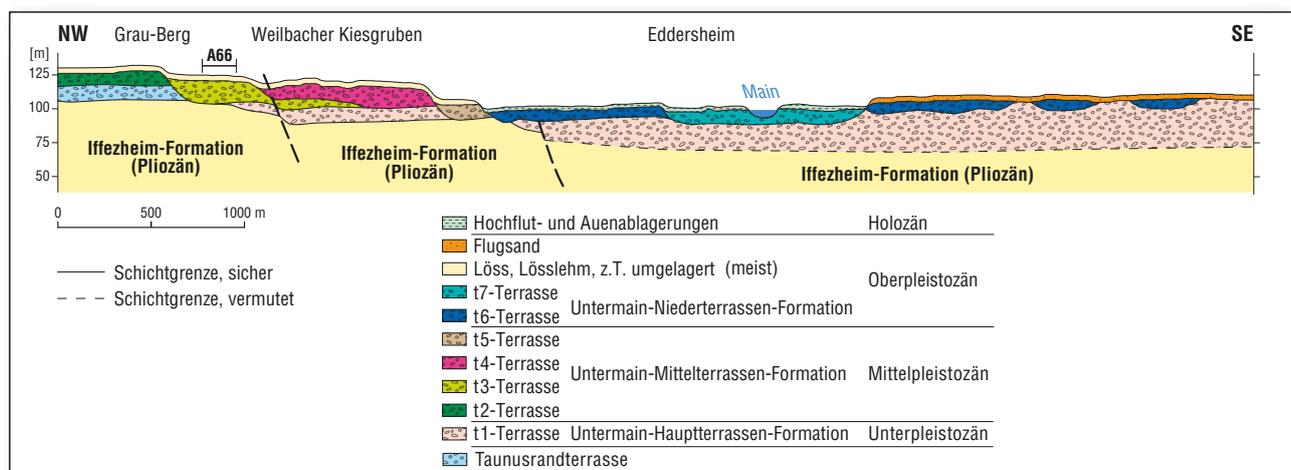
schichten durchstoßen und die vulkanische Asche des Laacher-See-Vulkans verdrängt. Dieser Kryoturbationsvorgang kann daher nur in der zuletzt aufgetretenen Kaltphase, der Jüngeren Dryas (Tundrenzeit), vor rund 12 000 Jahren vor heute stattgefunden haben.

Die Aufschlussverhältnisse im Rhein-Main-Gebiet haben sich in den letzten Jahrzehnten sehr stark verschlechtert, da es kaum noch Sand- und Kiesgruben gibt.

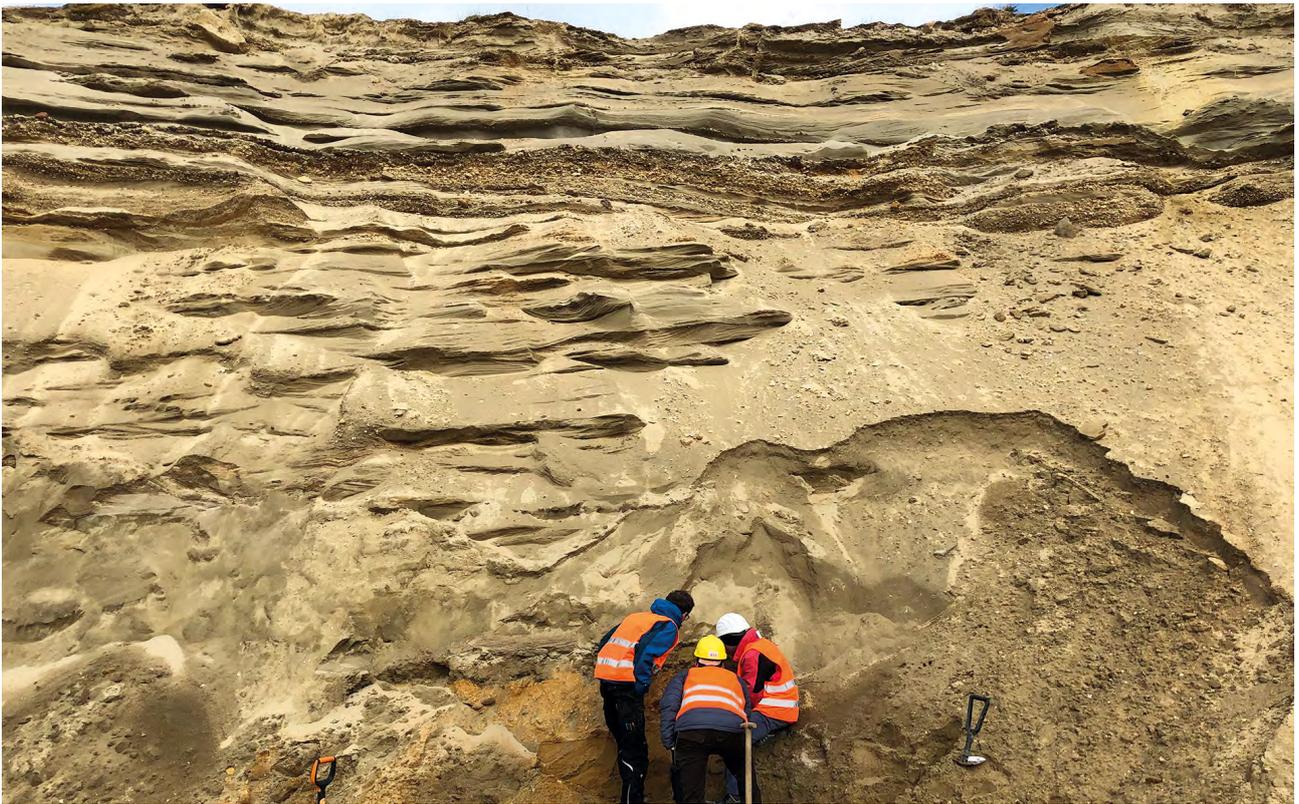
Von SEMMEL (2006) werden für das Gebiet des Frankfurter Stadtwaldes verschiedene Frostbodenbildungen beschrieben. Aus Aufschlüssen beim Bau des ICE-Bahnhofs am Frankfurter-Flughafen beschreibt SEMMEL mittelpleistozäne rund 300 000 Jahre alte Ablagerungen der Untermain-Mittelterrassen-Formation, die vor 20 000–13 000 Jahren von Flugsanden überdeckt wurden. Durch Kryoturbationsprozesse haben die Terrassensedimente die äolischen Deck-



**Abb. 3:** In den Weilbacher Kiesgruben wird die unterpleistozäne Untermain-Hauptterrassen-Formation von der mittelpleistozänen Untermain-Mittelterrassen-Formation gekappt und überlagert



**Abb. 4:** Geologischer Schnitt durch die fluviatile Terrassenabfolge des Mains im Gebiet der Weilbacher Kiesgruben südlich von Hofheim (umgezeichnet und ergänzt nach SEMMEL 2001)



**Abb. 5:** a) Fluviale Sedimente der mittelpleistozänen Haupt-Mosbach-Subformation im Dyckerhoff-Steinbruch bei Wiesbaden-Amöneburg; in diesem Abschnitt des Profils stehen karbonatische Sande und kiesige Sande rheinischer Herkunft an. b) An der Basis der Abfolge treten karbonatfreie fluviale Ablagerungen der Untermain-Hauptterrassen-Formation auf.

Durch den hohen Grundwasserstand in der Region erfolgt die Förderung zumeist im Nassabbau, so dass die Schichtabfolge nicht aufgeschlossen ist. Viele Jahrzehnte schon wird im Bereich der Weilbacher Kiesgruben (UTM: E 460965 N 5544450) insbesondere Sand und Kies der Mainterrassen abgebaut (Abb. 3). In den Deckschichten sind Löss, Paläoböden, Tephren und Frostbodenbildungen zu beobachten. Die geologische Situation wird im geologischen Schnitt der Abbildung 4 dargestellt. Als Exkursionsziel für weiterführende Informationen dient das Naturschutzhaus Weilbacher Kiesgruben ([grkw.de/weilbacher-kiesgruben/](http://grkw.de/weilbacher-kiesgruben/)).

Im Mainzer Becken ist der Dyckerhoff-Steinbruch in Wiesbaden-Amöneburg (UTM: E 447665 N 5543935) mit seinen marinen Sedimenten des Tertiärs, den pleistozänen fluviatilen und äolischen Ablagerungen, sowie den quartärpaläontologischen Funden seit über 100 Jahren überregional bekannt (HOSELMANN et al. 2018, HOSELMANN 2021). In den fluviatilen Sedimenten können Ablagerungen des Rheins und Mains beobachtet werden (Abb. 5).

## Literatur

- ANEFELD, C., BERGER, C., FRITZSCH, D., FUCHS, M., KADEREIT, A., SCHNEIDER, R., SEIDENSCHWANN, G., SIMON, C., STEUP, R. & THIEMEYER, H. (2018): Exkursionsführer – 37. Tagung der AG Paläopedologie der DBG. – 34 S., 22 Abb., 4 Tab.; Frankfurt a. M. ([www.dbges.de/de/system/files/AG\\_Palaeopedologie/2018\\_37jt\\_hanau\\_flugsand\\_loess.pdf](http://www.dbges.de/de/system/files/AG_Palaeopedologie/2018_37jt_hanau_flugsand_loess.pdf))
- BIBUS, E. (1973): Ausbildung und Lagerungsverhältnisse quartärer Tuffvorkommen in der Wetterau. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **101**: 346–361, 6 Abb.; Wiesbaden.
- GABRIEL, G., ELLWANGER, D., HOSELMANN, C., WEIDENFELLER, M., WIELANDT-SCHUSTER, U. & The Heidelberg Basin Project Team (2013): The Heidelberg Basin, Upper Rhine Graben (Germany): a unique archive of Quaternary sediments in Central Europe. – Quatern. Int., **292**: 43–58, 8 Abb., 1 Tab.; Amsterdam.
- HOSELMANN, C. (2021): 5.2 Quartär. – In: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hrsg.): Geologie von Hessen: 416–461, 21 Abb., 3 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- HOSELMANN, C., LAUPENMÜHLEN, T., BOHATÝ, J., RADTKE, G., WEBER, G., & WEIDENFELLER, M. (2018): Field Trip C (27 September 2018): Fluviale und äolische Ablagerungen im Rhein-Main-Gebiet. – DEUQUA Spec. Pub., **1**: 29–52, 20 Abb.; Göttingen. ([deuquasp.copernicus.org/articles/1/29/2018/](http://deuquasp.copernicus.org/articles/1/29/2018/))
- LANG, S. (2007): Die geologische Entwicklung der Hanau-Seligenstädter Senke (Hessen, Bayern). – Dissertation TU Darmstadt, FB Material- und Geowissenschaften: 97 S.; Darmstadt. ([elib.tu-darmstadt.de/diss/000782/](http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000782/))
- LOMAX, J., STEUP, R., SHUMILOVSKIKH, L., HOSELMANN, C., SAUER, D., DIEDENHOVEN, V.V. & FUCHS, M. (2018): Field Trip B (27 September 2018): Quaternary environments of Giessen and its surrounding areas. – DEUQUA Spec. Pub., **1**: 15–28, 12 Abb., 4 Tab.; Göttingen. ([deuquasp.copernicus.org/articles/1/15/2018/deuquasp-1-15-2018.pdf](http://deuquasp.copernicus.org/articles/1/15/2018/deuquasp-1-15-2018.pdf))
- SEMMEL, A. (1974): Der Stand der Eiszeitforschung im Rhein-Main-Gebiet. – Rhein-Main. Forsch., **78**: 9–56, 4 Abb. in Anh.; Frankfurt a. M.
- SEMMEL, A. (2001): Der oberflächennahe Untergrund in der Rhein-Main-Landschaft – Ein Exkursionsführer. – Rhein-Mainische Forschungen, **121**: 100 S., 5 Abb., 19 Fotos; Frankfurt a. M. ([uni-frankfurt.de/61565622/RMF\\_121.pdf](http://uni-frankfurt.de/61565622/RMF_121.pdf))
- SEMMEL, A. (2006): Die Erde im Frankfurter Stadtwald. – Frankfurter geowiss. Arb., **D 29**: 71 S., 6 Abb., 24 Fotos; Frankfurt a. M.
- S Emmel, A. (2007): Löß als Indikator der Landschaftsentwicklung in der Wetterau und am Unterrhein. – Jber. Wetterau. Ges. Naturkde., **155–157**: 7–35, 22 Abb.; Hanau.

## 3 Geofahren

### 3.1 Tertiäre Rutschungen

CHRISTINA HEINRICHS \*

#### Definition

Rutschungen sind hangabwärts gerichtete, gleitende Bewegungen, die in Locker- oder Festgesteinen auftreten können (Abb. 1). Die Ursache solcher gravitativen Massenverlagerungen ist stets die Änderung des natürlichen Hanggleichgewichtes, das durch einen bestimmten Faktor oder meist einer Kombina-

tion verschiedener Faktoren hervorgerufen wird. In Hessen stellen Rutschungen ein nicht selten auftretendes Phänomen dar, das in seiner Häufigkeit zusammen mit dem Klimawandel möglicherweise noch zunehmen kann.

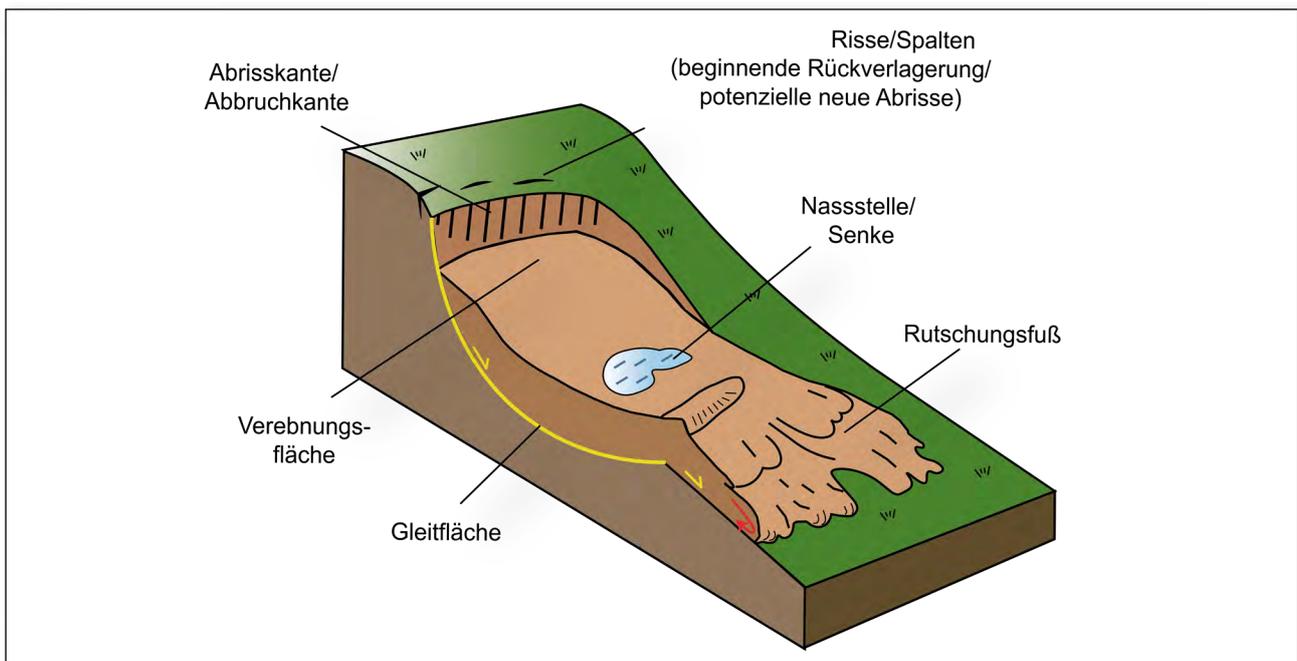


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Rutschung

#### Entstehung

Im beschriebenen Raum des Rhein-Main-Gebietes besteht eine Gefährdung durch Rutschungen überwiegend in der rutschungsanfälligen Schicht „tertiäre Tone“, mit Wasser als auslösendem Faktor. Als besonders anfällig sind hier die Wechsellagerungen von Tonen und Feinsanden sowie Mergeltonen mit

gebankten Kalkmergeln zu benennen. Wasserführende Schichten liegen hier im scharfen Kontakt über wasserstauenden, tonigen Schichten auf. Bei einer Zuführung von Wasser, z. B. durch Niederschlag oder defekte Leitungen, versickert das Wasser durch die oberen Schichten und wird an den Tonen

gestaut. Das Wasser verursacht eine Aufweichung der quellfähigen Tone und führt zu einer Erhöhung der Plastizität und Verringerung des Reibungswinkels. Hierdurch kann die Scherfestigkeit der tonführenden Schichten derart stark herabgesetzt werden, dass es zu einer Massenverlagerung kommt. Die tonig-schluffigen Serien weisen bereits im Vorhinein niedrige Scherfestigkeiten auf, sodass sich daraus aufgebauete Hänge vielfach in einem ungünstigen Hanggleichgewicht befinden (PRINZ & STRAUB 2018).

Innerhalb des Rhein-Main-Gebietes treten Rutschungen in den tertiären Tonen sowohl als flache (bis zu 5 m) als auch tiefgreifende Ereignisse auf. Die flacheren Rutschungen verlaufen größtenteils in den obersten Schichten (teils auch nur Deckschichten) ab. Es handelt sich meist um abgeflachte Rotationsrutschungen oder kombinierte Rutschungen, die häufig zu mehrfach rückschreitenden, großflächigen Rutschungen zusammengewachsen sind. Eine Vielzahl dieser Rutschungen, insbesondere ältere, sind aufgrund ihrer flachen Hangformen, Überlagerung und Überprägung nur schwer zu erkennen. Oft genügen jedoch nur kleine Eingriffe in das Hanggleichgewicht oder stärkere Niederschläge, um diese inaktiven/latenten Rutschungen wieder in Bewegung zu bringen.

## Verbreitung

Rutschungen in den tertiären Tonen können überall auftreten, wo wasserführende Schichten auf tonige Lagen treffen. Als besonders anfällig im Rhein-Main-Gebiet sind die Schichten der Cyrenenmergel-Gruppe unter Schleichsand, Hydrobien-Schichten (Wiesbaden-/Frankfurt-Fm.) und Rupeltone (Bodenheim-Fm.), wobei die Übergänge der einzelnen Einheiten teilweise fließend sind. Innerhalb dieser Formationen sind im hessischen Rhein-Main-Gebiet die meisten Ereignisse dokumentiert. Gravitative Massenverlagerungen innerhalb der Cerithien-Schichten (Oberrad-/Oppenheim-/Hochheim-/Weisenau-Fm.) sind dagegen eher selten. Bei vielen Rutschungen mit Abrissen im Bereich der Cerithien-Schichten gelten

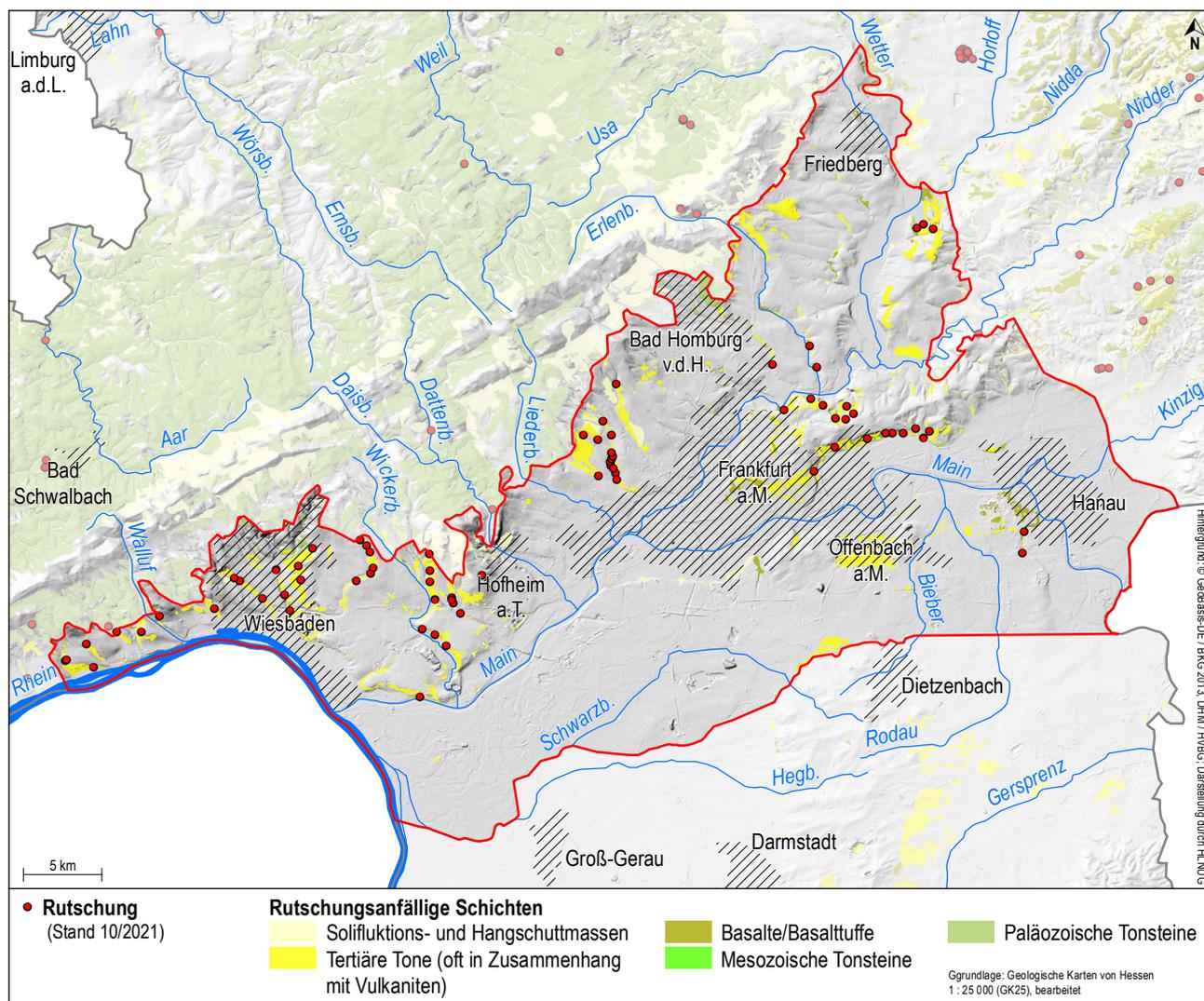
Außer den weit verbreiteten Flachrutschungen treten im Tertiär auch immer wieder tiefreichende Rutschungen auf. Diese tiefgreifenden Rutschungen liegen meist unter jüngeren, kleineren Rutschungen verborgen und weisen vereinzelt rezent noch schleichende Bewegungen auf. Bei ausreichend starker Störung des Hanggleichgewichtes können auch solche, meist durch Überprägung unentdeckten Rutschungen, wieder in Bewegung geraten.

Besonders auffällig ist, dass sich Rutschungen im tertiären Raum vermehrt in feuchten Jahren ereignet haben. Auch im Rhein-Main-Gebiet lässt sich aufgrund der archivierten Gutachten im geowissenschaftlichen Archiv des HLNUG eine Korrelation der Rutschungsereignisse mit den niederschlagsstarken Jahren herstellen.

Eine Besonderheit bei Rutschungen innerhalb von tertiären Tonen ist die meist sehr flache Hangneigung, in denen die Massenverlagerungen auftreten können. Hangneigungen von  $6^\circ$  bis  $10^\circ$  stellen hier keine Seltenheit dar. Darunter ist sogar eine Rutschung nachgewiesen, die eine generelle Hangneigung von lediglich  $2^\circ$  aufwies.

die darunterliegenden Einheiten der Cyrenenmergel-Gruppe und Stackeden-Formation (Schleichsand) als auslösende Einheiten (Abb. 2).

Schäden, die aufgrund von tertiären Rutschungen im Rhein-Main-Gebiet entstanden sind, sind insbesondere nordöstlich von Frankfurt a.M. bis Bad Vilbel, Limesstadt/Schwalbach (am Taunus) und im Raum Wiesbaden und Umgebung dokumentiert. Vereinzelt Ereignisse sind auch südwestlich von Hanau und südöstlich von Friedberg, nahe der Nidda verzeichnet. Weitere vereinzelt Vorkommen rutschungsanfälliger Schichten gibt es u. a. im Raum Offenbach.



**Abb. 2:** Karte der rutschungsanfälligen Schichten mit Augenmerk auf die tertiären Tone und den dokumentierten Rutschungen (rote Punkte)

## Gefährdung

Die Gefährdung durch Rutschungen im Rhein-Main-Gebiet ist verhältnismäßig hoch. Bereits flache Hänge können nach geringen Einwirkungen in das Hanggleichgewicht in Bewegung geraten. Zudem sind vorhandene Rutschungen meist anthropogen überprägt oder weisen nur geringe Rutschungsmerkmale auf, die nur geübte Augen erkennen können. Vereinzelt werden Rutschungen nur anhand der charakteristischen Schäden an Infrastruktur oder Gebäuden erkannt. Ein zusätzliches Risiko besteht darin, dass bislang nicht nachgewiesene, inaktive Rutschgebiete wieder reaktiviert werden können und weitere Schäden verursachen.

Die auftretenden Schäden sind manchmal geringfügig und lassen sich mit einfachen Mitteln wieder ausbessern oder sanieren. In anderen Fällen können jedoch Schäden auftreten, die eine umfangreiche Sanierung und Stabilisierung der betroffenen Objekte erfordern. Beim Auftritt eines Schadens ist daher dringend dessen Ursache festzustellen, um keine unnötigen Maßnahmen durchzuführen, die weitere Schäden im Nachhinein nicht verhindern.

## Erkundung

Für Bauvorhaben in urbanen bzw. überbauten Bereichen muss grundsätzlich berücksichtigt werden, dass potenzielle Rutschhänge aufgrund der starken anthropogenen Überprägungen unter Umständen weder im Gelände noch im digitalen Geländemodell sichtbar sind. Aufgrund dessen ist es erforderlich sich mit der vorhandenen Geologie auseinanderzusetzen und potenzielle rutschungsanfällige Horizonte oder Schichtabfolgen vorab zu erkunden. Auch ist es empfehlenswert, mögliche Gleitflächen, die auf ältere oder rezente Rutschungen hinweisen, zu ermitteln. Das besondere Augenmerk gilt hierbei der Feststellung wasserstauender Schichten und ihrer Rutschanfälligkeit. Die geeignetste Aufschlussform bildet hierfür die Kernbohrung. Weitere, möglichst auf das geplante Bauvorhaben abgestimmte Erkundungsmethoden und -grundlagen sind:

- Kartierung – Morphologie, Geologie, Tektonik, Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, Risskartierung der vorhandenen Schäden
- Historische Aufzeichnungen – archivierte Gutachten, historische Karten/Aufzeichnungen
- Fernerkundung – Digitales Geländemodell, Luftbilder, Satellitenbilder

## Sicherungs- und Stabilisierungsmaßnahmen

Bei den meist flachen Rutschungen im Rhein-Main-Gebiet ist aufgrund der oft kleineren Ausdehnung gelegentlich eine einfache Sicherung in Form einer massiven Bodenplatte, eines Stützbauwerks oder durch Massenausgleiche (Aufschüttungen oder Abtragungen) ausreichend (Abb. 3). Daneben sind auch solche überlagernde oder tiefgreifendere Rutschungen in den tertiären Tonen anzutreffen, die umfangreichere Sicherungsmaßnahmen erforderlich machen. Hierzu zählen:

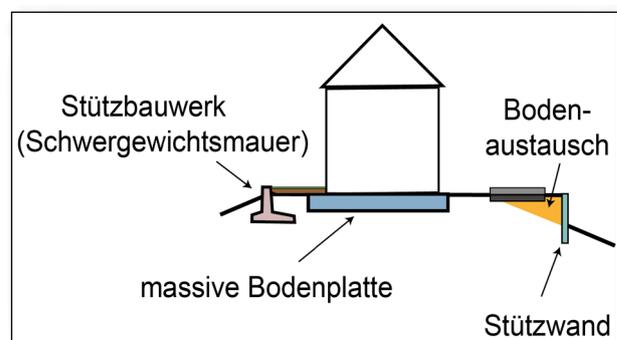
- Spezielle Gründungskonstruktionen – massive Bodenplatte, Pfahlgründung, Injektionen
- Entwässerung – (Oberflächen-)Dränage, Entwässerungstollen
- Stützbauwerke – Mauer, Stützwinkel, Damm, Ankerung, Dübel, Bohrpfahlwand

- Kartenwerke – Geologische Karten, topographische Karten, Spezialkarten (z. B. Gefahrenhinweiskarten, Hangstabilitätskarten)
- Geologische Aufschlüsse – Schürfe und Bohrungen
- Messstellenausbau – Inklinometer, Extensometer, Grundwassermessstelle, geodätisches Messnetz
- Geophysikalische Erkundung
- Ermittlung bodenmechanischer Kenngrößen – Reibungswinkel, Kohäsion, (Rest-) Scherfestigkeit
- Baugrundmodelle/Simulation – Standsicherheitsberechnung

Wichtig für das weitere Vorgehen und für die Planung der Bauvorhaben ist, dass die Ausmaße und Tiefe der Massenverlagerungen bekannt sind. Auch sollte die Rutschungsaktivität und Geschwindigkeit der Bewegung z. B. durch geodätische Messungen oder Inklinometer ermittelt werden. Grundsätzlich sollte eine Störung des Hanggleichgewichts durch das Bauvorhaben in Form von Anschnitten oder Auflasten vermieden werden oder deren Auswirkungen vorab untersucht bzw. mit entsprechenden Sicherungsmaßnahmen begegnet werden.

- Massenausgleich – Aufschüttung, Abtragung, Bodenaustausch

Die Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen sind auf die jeweiligen Baugrundverhältnisse und das Bauvorhaben abzustimmen.

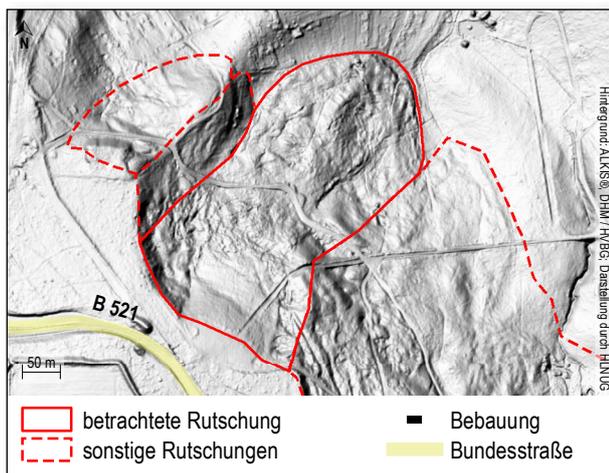


**Abb. 3:** Beispielhafte angepasste Bauweise in rutschungsgefährdeten Gebieten

## Fallbeispiel (Bad Vilbel - Hainwinkel)

Mitte der 1960er Jahre traten südlich von Bad Vilbel vermehrt Rutschungen auf und zerstörten unter anderem eine Zufahrtstraße auf einer Länge von etwa 170 m (Abb. 4). Ende September 1968 sollte geklärt werden, in welchem Umfang und mit welchem Aufwand der Hang gesichert werden kann. Geologisch stehen hier die tertiären Sedimente der graugrünen bis grauen Cyrenenmergel in Mächtigkeiten von bis zu 50 m an. Geringmächtig sind stellenweise Braunkohlenflöze eingelagert. Überlagert werden diese Schichten mit geringmächtigen sandig-kiesigen Flussablagerungen oder Löss/-lehm.

Erkundet wurde die Rutschung mittels einer Geländebegehung, bei der festgestellt wurde, dass sie sich



**Abb. 4:** Das digitale Geländemodell zeigt deutlich die Ausmaße und Elemente der Rutschung bei Bad Vilbel. Weitere Rutschungen sind in der nahen Umgebung kartiert worden.

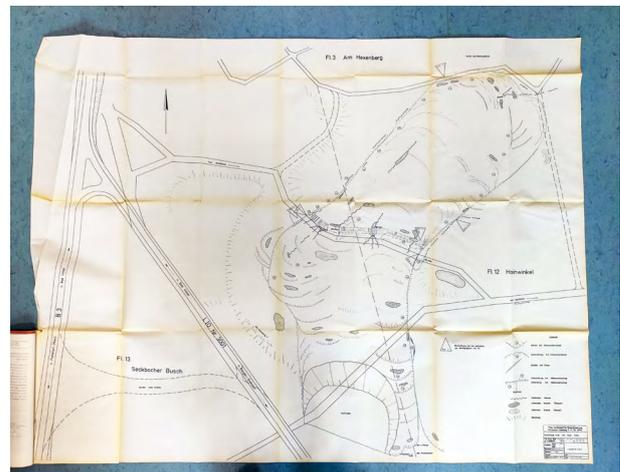
## Ausblick

Als Folge der Klimaerwärmung und der vermehrten Extremwetterereignisse ist damit zu rechnen, dass sich die Gefährdung durch Erdrutsche in den näch-

## Literatur

BEURER (1968): Rutschung in Flur 12 Hainwinkel und Flur 13 Seckenbacher Busch südlich von Bad Vilbel, Landkreis Friedberg. – Im Archiv des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Gutachtenarchiv-Nr. **5818/361**; Wiesbaden [unveröffentlicht].

aus zahlreichen Einzelrutschungen zusammensetzt (Abb. 5). Insgesamt besitzt das Ereignis eine Breite von etwa 200 m und eine Länge von 450 m. Innerhalb des bewegten Bereiches sind zahlreiche mehr oder weniger bogenförmig verlaufende Abrisse, Aufwulstungen und Wassertümpel auszumachen. Im Zuge einer hydrologischen Geländeerkundung wurde festgestellt, dass das Oberflächenwasser teilweise durch Spalten oder Risse verschwindet und als Quelle im tieferen Niveau wieder austritt. Hierzu passt auch der Vermerk einer Quelle am jetzigen Hangfuß in einer älteren geologischen Karte, die zwischenzeitlich durch die Rutschung überdeckt und im Gelände nicht mehr festzustellen ist (BEURER 1968).



**Abb. 5:** Ausschnitt der Kartierung der Rutschung aus dem Gutachten von BEURER 1968

sten Jahren auch im Rhein-Main-Gebiet erhöhen wird, da gerade die tertiären Rutschungen in einem engen Zusammenhang mit dem Niederschlag stehen.

PRINZ, H. & STRAUB, R. (2018): Ingenieurgeologie. – 6. Aufl.: 898 S., 415 Abb., 84 Tab.; Heidelberg.

## 3.2 Erdfälle und Senkungsmulden

CHRISTINA HEINRICHS \*

### Definition

Als Karst wird ein natürlicher unterirdischer Hohlraum bezeichnet, der durch Auflösung und Verfrachtung wasserlöslicher Gesteine wie Steinsalz, Gips, Anhydrit und Kalkstein durch Grundwasser oder versickerndes Oberflächenwasser entstanden ist. Als Folge von Verkarstungen im Untergrund können an

der Geländeoberfläche Senkungsmulden oder Einbrüche (Erdfälle/Dolinen) entstehen (Abb.1). Zu kleinräumigen Senkungen, insbesondere in Gebieten mit Lockergesteinen kann es zudem in Folge von unterirdischer/innerer Erosion und Suffosion von feinkörnigen Substraten kommen.

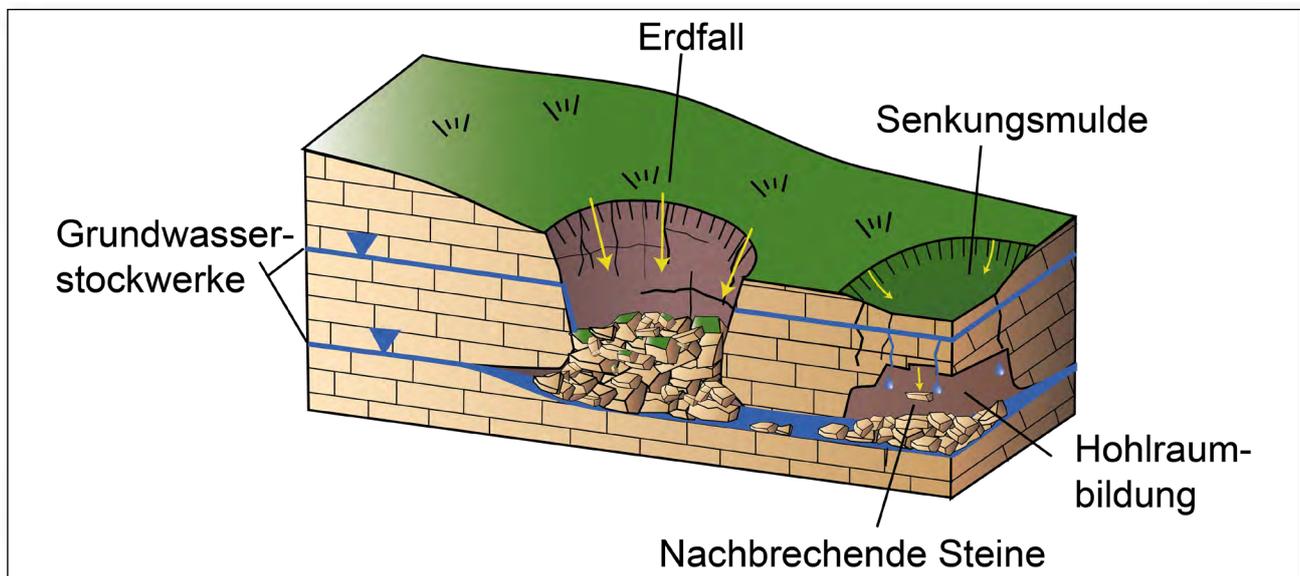


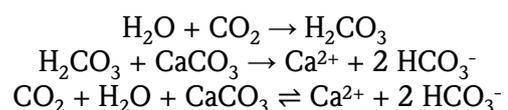
Abb. 1: Schematische Darstellung einer Verkarstung im Festgestein

### Entstehung

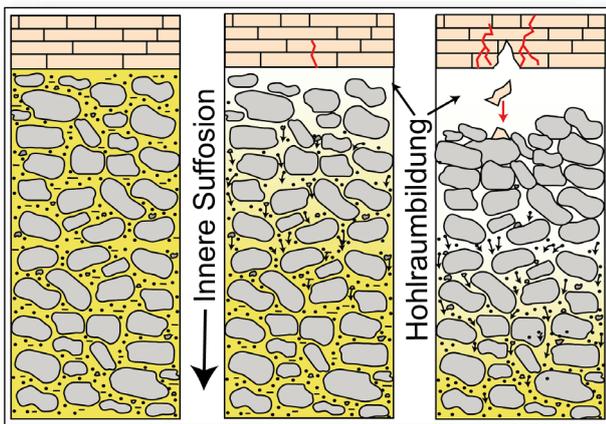
Im beschriebenen Raum des Rhein-Main-Gebietes entsteht die Gefährdung durch Erdfälle und Senkungen vorrangig durch **Karbonatkarst** im anstehenden Kalkmergelgestein des Kalktertiärs und durch unterirdische Erosionen und Suffosionen im Lockergestein.

Die Lösbarkeit von Karbonatgesteinen (Kalkmergel, sowie Kalkstein und Dolomitstein) und Bildung von Karbonatkarst ist stark von der Konzentration von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) im Wasser (H<sub>2</sub>O) – aus z. B. dem Niederschlagswasser oder der Vegetationszone und deren Gehalt an Sulfationen und Huminsäuren

– abhängig. Bei einer chemischen Reaktion von freiem Kohlendioxid mit Wasser entsteht Kohlensäure (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), die in Verbindung mit dem Calciumkarbonat (CaCO<sub>3</sub>) zum wasserlöslichen Calciumhydrogencarbonat (Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) umgewandelt wird.



Neben Hohlraumbildungen in Folge von Karbonatkarst können im Rhein-Main-Gebiet auch **unterirdische Erosion** oder **Suffosion** auftreten, die



**Abb. 2:** Schematische Darstellung der inneren Suffosion mit der Bildung eines Hohlraumes. Das hangende Festgestein oder Lockergesteine können in den Hohlraum nachbrechen und zu einem Erdfall oder einer Senkung an der Geländeoberfläche führen.

Senkungen und seltener auch Erdfälle verursachen können (Abb. 3). Die bekannteste Form der unterirdischen Erosion ist die innere Erosion im Löss. Bei diesem Prozess wird entlang von Fließpfaden das gesamte Lockermaterial abtransportiert und es bilden sich kleine Hohlräume. Als Suffosion hingegen wird die Ausspülung von feinkörnigen Materialien bezeichnet, bei denen die grobkörnigeren Bestandteile der Matrix im Untergrund zurückbleiben (Abb. 2). Sowohl Suffosions- als auch Erosionsanfälligkeit der Lockergesteine sind u. a. abhängig von der Korngröße, der Korngrößenverteilung, der Lagerungsdichte, von der Plastizität und Kohäsion sowie der Größe der Porenkanäle bzw. Wasserdurchlässigkeit (ADERHOLD 2001; PRINZ & STRAUB 2018).

## Verbreitung

Erdfälle oder Senkungen in Folge einer Karbonatverkarstung treten im Rhein-Main-Gebiet meist punktuell auf und weisen eher geringe Tiefen und Durchmesser auf. Die Karsterscheinungen im Karbonat sind überwiegend an die oberflächlich austreichenden tertiären Karbonatgesteine, wie die Oberrad-/Oppeheim-/Hochheim-/Weisenau-Fm. (Cerithien-Schichten), Rüssingen-Fm. (Inflata-Schichten), Wiesbaden-/Frankfurt-Fm. (Hydrobien-Schichten) und Niederrad-Fm. (Landschneckenmergel) gebunden. Diese untermiozänen Kalke streichen flächenhaft in großen Teilen des Stadtgebietes von Frankfurt, Bad Soden, Offenbach-Bieber, Mühlheim, Lämmerspiel

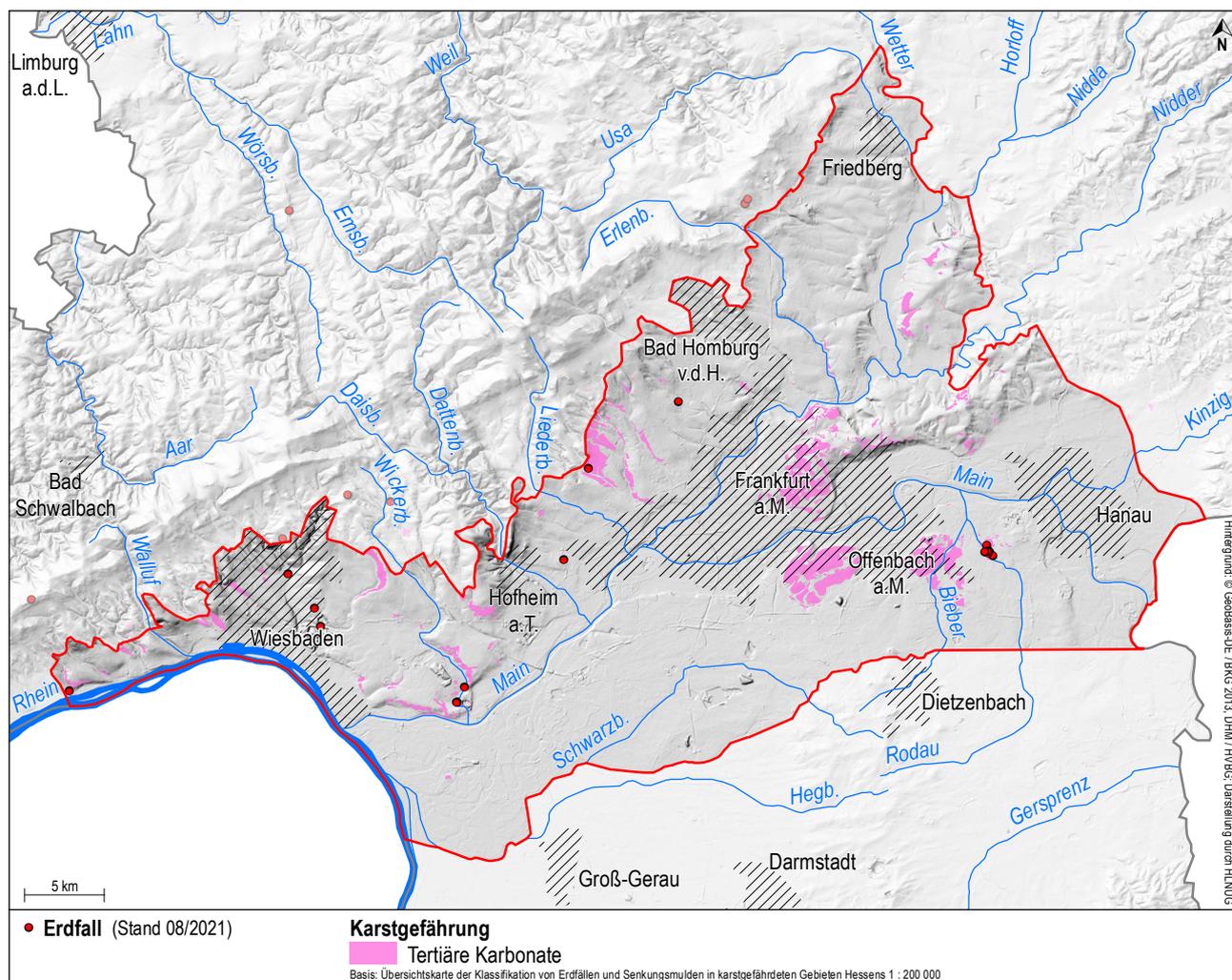


**Abb. 3:** Karst im Festgestein

Gerade in Ballungsgebieten wie dem Rhein-Main-Gebiet können unterirdische Erosion und Suffosion auch durch menschliche Eingriffe ausgelöst oder beschleunigt werden, indem zusätzliches Wasser durch (undichte) Leitungen, Versickerungen, Kanäle oder Quelfassungen in den Untergrund eingetragen werden. Auch Altbergbau kann durch verstärkten Sickerwasserabfluss in tagesnahe Abbauhohlräume rückschreitende Erosion in den Deckschichten hervorrufen.

und Hausen unter geringmächtigen Deckschichten (maximal 10 m) aus. Kleinere Randvorkommen auf Randschollen sind bei Hochstadt, Langen und Bauschheim sowie im südlichen Wiesbaden bekannt (Abb. 4).

Innere Erosion und Suffosion stehen dagegen in einem engeren Zusammenhang mit der Zusammensetzung des Bodens, den oberflächennahen (Deck-) Schichten und der vorherrschenden Hydrogeologie. Suffosionen treten oft im Zusammenhang mit tiefergelegenen Hohlräumen, wie erweiterten Spalten/Klüften oder Schichten mit größeren Porenraum auf,



**Abb. 4:** Karte der zur Verkarstung neigenden Schichten mit den dokumentierten Erdfallereignissen (rote Punkte)

durch die sich das ausgespülte Material fortbewegen und später an einem anderen Ort ablagern kann.

Schäden aufgrund von Verkarstungen, unterirdischer Erosion und Suffusion im Rhein-Main-Gebiet sind insbesondere im Raum Wiesbaden und Offenbach dokumentiert, die von rezenten, nackt-seichten Erdfällen und Senkungen verursacht worden sind. Ver-

einzelte Ereignisse in Folge von innerer Erosion im Löss sind insbesondere am Taunusrand nördlich des Mains dokumentiert.

Weitere Hohlräume wurden u. a. in Frankfurt (Sachsenhäuser Warte), Flörsheim-Hochheim und Wiesbaden erbohrt. Nach heutigem Kenntnisstand haben diese noch keine Auswirkungen auf die Geländeoberfläche.

## Gefährdung

Bei einer Hohlräum- oder Ausspülung von Lockergestein im Untergrund kann es zu Bodensenkungen oder auch Erdfällen kommen. Die bislang im Rhein-Main-Gebiet aufgetretenen Ereignisse sind meist geringmächtig und eher punktuell. Dennoch können diese zu Setzungsschäden an Gebäuden oder

Infrastruktur führen, die sich als Risse unterschiedlicher Intensität darstellen.

## Erkundung

Bei geplanten Bauvorhaben in bekannten von Karbonatkarst gefährdeten Bereichen sind objektbezogene geotechnische Baugrunderkundungen, insbesondere im Hinblick auf oberflächennahe Hohlräume, sinnvoll. Schürfe oder Bohrungen in ausreichende Tiefe bilden diesbezüglich die besten geologischen Aufschlüsse, da diese sowohl etwaige Hohlräume aufschließen, als auch Hinweise auf solche, z. B. in Form von Auslaugungsrückständen liefern können. Auch können mit Bohrungen und weiteren geotechnischen Untersuchungen die Mächtigkeit und insbesondere die Tragfähigkeit der Überdeckung erkundet werden. Weitere Methoden und Grundlagen zur Erkundung der Karstgefährdung bilden:

- Kartierung – Morphologie, Geologie, Tektonik, Hydrogeologie, Ingenieurgeologie
- Kartenwerke – Geologische Karten, topographische Karten, Spezialkarten (z. B. Gefahrenhinweis-, Gefährdungs-, Risswerkarten)
- Recherchen über unterirdische Bauwerke – Bergbau, Tunnel, alte Gewölbe
- Geologische Aufschlüsse – Schürfe, Bohrungen
- Geophysikalische Untersuchungen
- Geodätische Messnetze
- Geotechnische Untersuchungen – z. B. zur Filterstabilität (Suffosion/Erosion)

## Sicherungs- und Stabilisierungsmaßnahmen

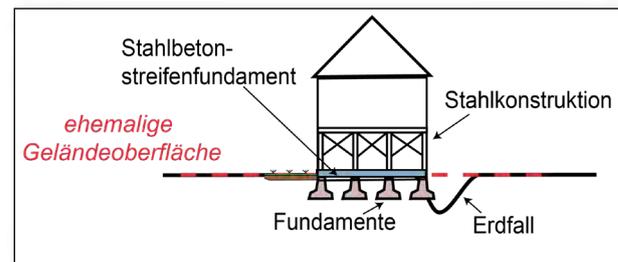
Bei vielen der im Rhein-Main-Gebiet typischerweise kleinen Erdfälle ist aufgrund der meist kleinen Dimensionen eine Verfüllung die einfachste und effektivste Methode zur Sicherung des Erdfalles. Dennoch sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass auch weitere Hohlräume in unmittelbarer Umgebung vorhanden sein können, die im Laufe der Zeit zu weiteren Senkungen oder Einbrüchen führen können.

Bei geplanten Baumaßnahmen in betroffenen Bereichen sollten nach den vorherigen Erkundungen geeignete Maßnahmen zur Sicherung mit eingeplant werden (Abb. 5). Dazu zählen u. a.:

- Spezielle Gründungskonstruktion – massive Bodenplatte, Pfahlgründung, Injektionen, spezielle Fundamente

## Fallbeispiel (Lämmerspiel)

Im Raum Offenbach traten in den 1960er Jahren innerhalb kürzester Zeit 23 Erdfälle und einige Senkungserscheinungen in Folge eines Hochwassers in einem begrenzten Raum auf. Die Erdfälle wiesen eine maximale Tiefe von 3,5 m auf und wurden zeitnah mit unterschiedlichen Materialien (Bauschutt, Baugrubenaushub und Abfallstoffen) wieder aufgefüllt. Geologisch stehen hier die Rüssingen-Fm. aus Wechselfolgen von Ton, Tonmergel, Mergel, Kalk-



**Abb. 3:** Beispielhafte angepasste Bauweise in rutschungsgefährdeten Gebieten

- Verfüllung der Hohlräume – Injektionen, Auffüllung
- Stützbauwerke – Pfeiler, starrer Kasten
- Erosionsschutz – geotextile Filter

mergelschichten und Kalksteinen an, die von geringmächtigen quartären Lehmen und Sand-/Kies-Zwischenlagen überdeckt werden.

Zur Erkundung des Untergrundes wurden 17 Erkundungsbohrungen mit einer maximalen Tiefe von 9 m unter GOK abgeteuft. Mit Hilfe dieser Sondierungsbohrungen konnte nachgewiesen werden, dass die Mächtigkeiten der Auslaugungszonen

(Korrosionszonen) zwischen wenigen Dezimetern und 6 m schwankt und unterschiedlich mächtige Überdeckungen aufweisen. Die Lösungshohlräume enthielten neben tonigen Auslaugungsrückständen (breiiger Kalkmergelschlamm) auch vereinzelt Schluff-, Sand- und Kies-Material, das von den Deckschichten eingespült worden ist.

Aufgrund der fortschreitenden Auslaugung und Vergrößerung der unterirdischen Hohlräume war die Standsicherheit der Deckschichten soweit gemindert, dass die hangenden Schichten nachsacken konnten. Die Suffosion und unterirdische Erosion führten zudem zu einem Massendefizit, das flachere Bodensenkungen verursachte, so dass in dem Untersuchungsgebiet neben den Erdfällen auch Bodensenkungen aufgetreten sind.

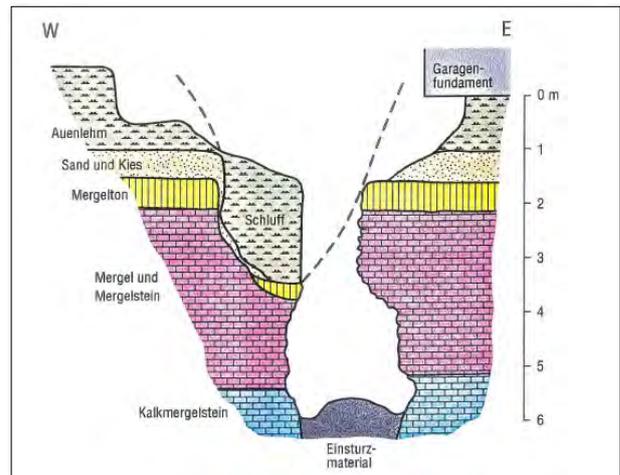
Über die bislang durchgeführte Verfüllung der Erdfälle hinaus wurde insbesondere für das neue Baugebiet eine sorgfältige Baugrunduntersuchung bis zu einer angemessenen Tiefe empfohlen. Damit soll speziell das Vorhandensein etwaiger Hohlräume im Untergrund ausgeschlossen oder deren Dimensionen erkundet

## Ausblick

Eine verstärkte Verkarstung von löslichem Gestein hat vor allem während Phasen erhöhter Temperatur und Niederschläge stattgefunden. Im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung und damit eventu-

## Literatur

ADERHOLD, G. (2001): Ingenieurgeologische Bewertung der Erdfälle und Senkungsmulden in Hessen sowie deren Nutzbarmachung für die Bebaubarkeit in karstgefährdeten Gebieten. – Dissertation eingereicht an der Technischen Universität Darmstadt – 285 S., 64 Abb., 29 Tab., 3 Anl.; Darmstadt. [unveröffentlicht]



**Abb. 5:** Schnitt durch einen schlotförmigen Erdfall bei Lämmerpiel nach dem Hochwasserereignis (aus GOLWER & PRINZ 1969 in ADERHOLD 2001)

werden, um ggf. geeignete bauliche Anpassungen bei den Objekten vorzunehmen. Neben der Erdfall- und Senkungsgefährdung wurde auch auf die weichplastischen, torfigen und schlickigen Tonlagen hingewiesen, die eine hohe Setzungsempfindlichkeit aufweisen und ebenfalls zu Setzungsschäden führen können.

ell vermehrter Extremwetterereignisse ist es wahrscheinlich, dass sich auch die Gefährdung durch Erdfälle und Senkungen erhöhen wird.

PRINZ, H. & STRAUB, R. (2018): Ingenieurgeologie – 6. Aufl.: 898 S., 415 Abb., 84 Tab.; Heidelberg.

### 3.3 Setzungsempfindliche Schichten

CHRISTINA HEINRICHS \*

#### Definition

Als besonders setzungsempfindlich gelten Böden mit einem hohen Maß an organischem Anteil oder einem Feinkornanteil (Ton) > 20%. In Hessen gehören dazu die tertiären Tone, Auensedimente, tonig-schluffige Verwitterungsprodukte und organische Böden. Diese

geologischen und bodenkundlichen Einheiten treten in ganz Hessen, insbesondere in Tälern und Senken auf. Zusätzlich zu diesen Schichten können auch künstliche Aufschüttungen oder Auffüllungen bei geringer Lagerungsdichte einer Schrumpfung unterliegen.

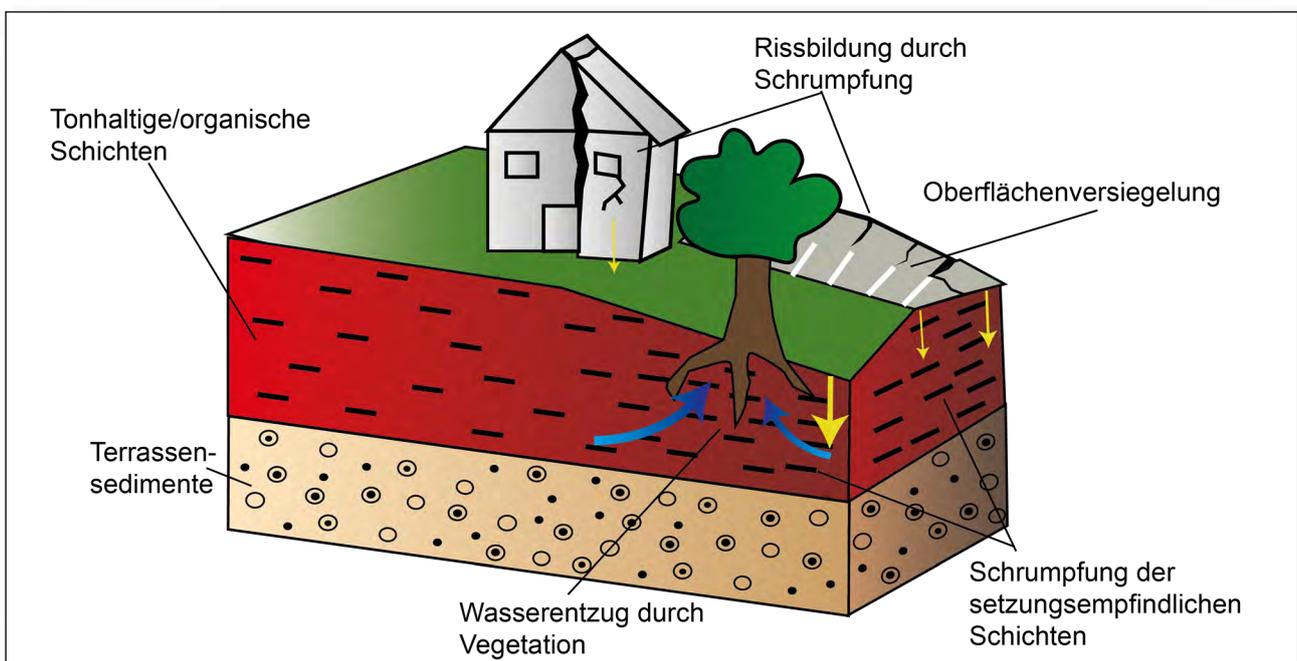


Abb. 1: Schematische Darstellung über die Auswirkung von setzungsempfindlichen Schichten

#### Entstehung

Im hier betrachteten Teil des Rhein-Main-Gebietes entsteht die Gefährdung durch setzungsempfindliche Schichten überwiegend durch die tonhaltigen und organischen Schichten. Bestimmte Tonminerale reagieren stark auf Änderungen des Wassergehaltes. Bei einer Zunahme des Wassergehaltes kommt es zu einer Quellung der Tonschichten, so dass eine Hebung der Geländeoberfläche die Folge ist. Reduziert sich der Wassergehalt, fangen die Schichten an zu schrumpfen und es kommt zu Setzungen. Je höher der Anteil quellfähiger Tone in den jeweiligen Einheiten ist, desto setzungsempfindlicher sind die Schichten.



Abb. 2: Trockenrisse in den Auensedimenten des Rheins

Mithilfe von Schrumpfversuchen, bei denen Tonproben in einem Trockenschrank kontrolliert das Wasser entzogen wird, wurden teilweise Volumenreduzierungen von > 50% beobachtet, was je nach Mächtigkeit der Schichten erhebliche Setzungen an der Oberfläche zur Folge hätte (Abb. 4).

Die Ursachen für eine Zunahme des Wassers innerhalb der tonhaltigen Schichten haben nicht selten einen anthropogenen Ursprung, z. B. durch defekte wasserführende Leitungen oder Bohrungen.

Setzungen hingegen, die durch eine Austrocknung der setzungsempfindlichen Schichten hervorgerufen werden, haben sich in den letzten Jahren im Rhein-Main-Gebiet stark vermehrt. Grund hierfür ist zum einen der fehlende flächendeckende und dauerhafte

Niederschlag, der sowohl für eine Durchfeuchtung der oberflächennahen Schichten, als auch für die Neubildung des Grundwassers verantwortlich ist. Infolge der niederschlagsarmen Jahre wurde eine verstärkte Grundwasserabsenkung festgestellt, die auch innerhalb der Wintermonate, in denen es normalerweise zur Grundwasserneubildung kommt, nicht aufgefüllt werden konnte. Dies hat zur Folge, dass die Wassersättigung stetig zurückgegangen ist und es zu vermehrten Setzungserscheinungen kommt. Zum anderen verhindern Bodenversiegelungen gerade in den urbanen Gebieten vielfach die Versickerung des Niederschlagswassers in den Untergrund. Auch eine „falsche“ Vegetation kann Setzungen verursachen; mächtige, alte Laubbäume entziehen dem Boden unter Umständen verhältnismäßig viel Wasser (Abb. 1).

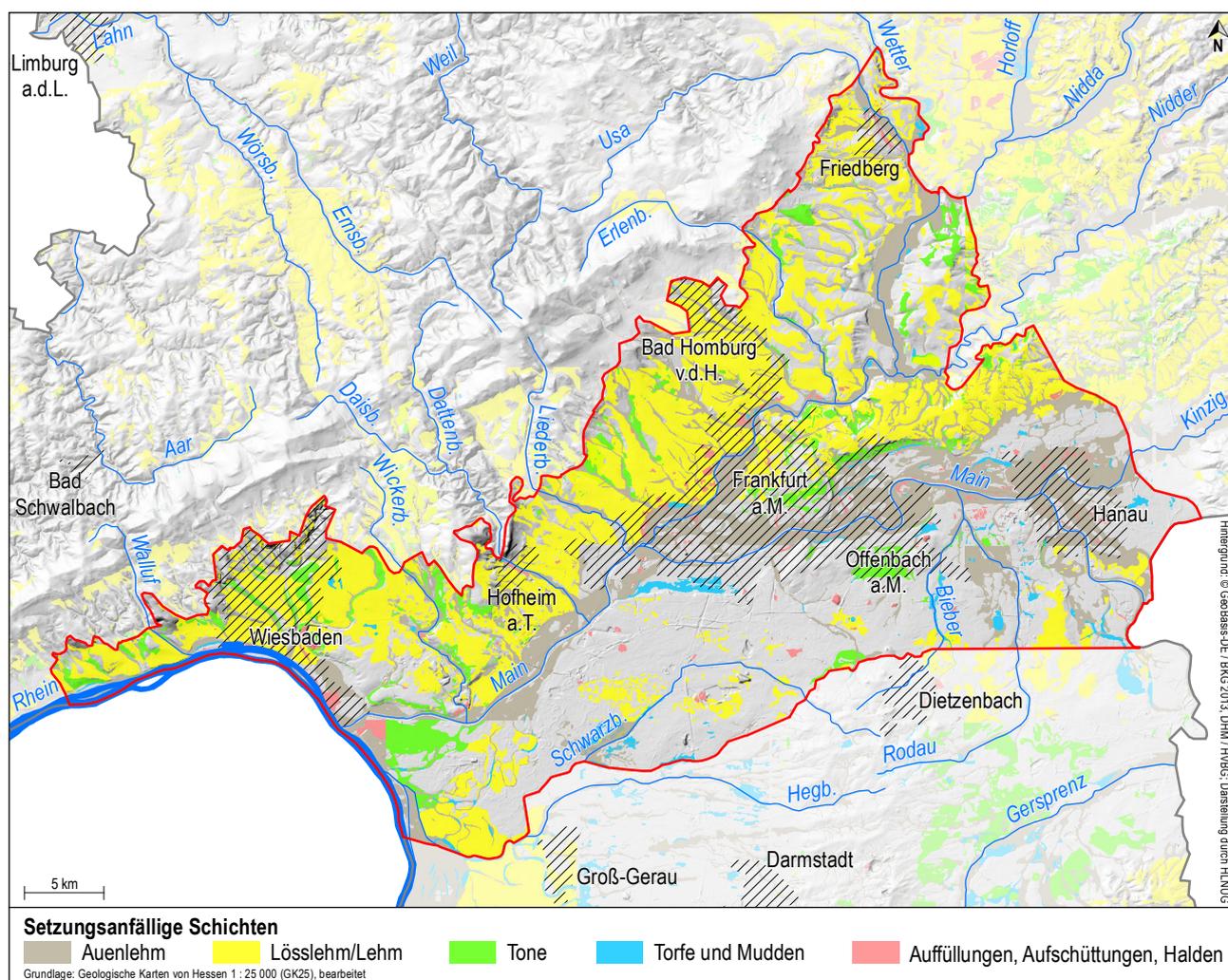


Abb. 3: Verbreitung der setzungsempfindlichen Schichten im Rhein-Main-Gebiet

Neben den feinkornhaltigen Schichten gelten auch die organischen Schichten als setzungsempfindlich. Hierbei spielt sowohl der Anteil der organischen Bestandteile, der Zersetzungsgrad, als auch der Wassergehalt eine entscheidende Rolle. Organische Böden

stellen aufgrund ihrer geringen Tragfähigkeit einen schwierigen Baugrund dar, in dem langzeitliche Setzungen auftreten können. Auch künstliche Aufschüttungen oder Auffüllungen können bei einer geringen Lagerungsdichte Setzungen hervorrufen.

## Verbreitung

Schichten mit feinkörnigen oder organischen Bestandteilen sind im Rhein-Main-Gebiet weit verbreitet. Als besonders anfällige geologische Einheiten gelten in erster Linie Auensedimente mit einem hohen Feinkornanteil, tertiäre Tone und organische Böden.

Schäden aufgrund von setzungsempfindlichen Schichten im Rhein-Main-Gebiet sind insbesondere im Raum Frankfurt a.M., Bad Vilbel, Offenbach und Wiesbaden dokumentiert. Vereinzelt Ereignisse sind auch südwestlich von Hanau und südöstlich von Friedberg, nahe der Nidda verzeichnet. Weitere Vorkommen setzungsempfindlicher Schichten sind u. a. im Raum Offenbach bekannt.

## Gefährdung

Die Gefährdung durch setzungsempfindliche Schichten im Rhein-Main-Gebiet ist sehr hoch, da sie hier fast flächendeckend vorhanden sind. Zudem zählt die Region zu einer der niederschlagsärmeren Bereiche von Hessen. Besonders in den letzten, relativ trockenen Jahren hat die Gefährdung durch Setzungen zusätzlich stark zugenommen. Wie stark die Setzungen an der Oberfläche letztendlich ausfallen, hängt in hohem Maße von der geochemischen und -technischen Zusammensetzung der einzelnen geologischen und bodenkundlichen Schicht ab. Auch deren Mächtigkeit und die Höhe des Grundwasserspiegels spielen hierbei eine entscheidende Rolle.

Im Vergleich zu anderen Geofahren treten Bauwerksschäden aufgrund setzungsempfindlicher Schichten oft einen längeren Zeitraum nach der

Fertigstellung auf, da die Setzungen verhältnismäßig langsam voranschreiten und zudem Restsetzungen erst nach Fertigstellung des Bauwerks auftreten können. Des Weiteren kann ein Bauwerk die Grundwasserhältnisse oder Wassersättigung der Schichten so beeinflussen, dass sich eine Änderung des Wassergehaltes einstellt, was sich wiederum auf die Tonminerale und den vorhandenen Untergrund auswirkt.

Insbesondere im Ballungsraum Rhein-Main werden immer mehr Bauflächen aufgrund der steigenden Nachfrage wegen der stetig wachsenden Bevölkerung und dem industriellen Wachstum auch in weniger geeigneten Flächen ausgewiesen. Daher ist bei der Planung neuer Baugebiete die Kenntnis über den vorhandenen Untergrund und dessen potenzieller Geofahr essenziell.

## Erkundung

Bei einem Bauvorhaben ist die geotechnische Erkundung des Baugrundes durch ein geeignetes Ingenieurbüro einer der ersten und wichtigsten Schritte. Anhand dieser Untersuchungen kann ermittelt werden, wie tragfähig der Baugrund letztendlich ist, ob setzungsempfindliche Schichten anstehen und welche Sicherungs- und Stabilisierungsmaßnahmen bei einer potenziellen Geofahr die geeignetste ist.

Diese geotechnischen Baugrunduntersuchungen werden u. a. in der DIN 1054 und DIN 4020 geregelt. Setzungsempfindliche Schichten mit hohem Anteil an Ton oder Schluff zählen hierbei zu den bindigen Böden. Unter Druckbelastung verformen sich diese bindigen Böden zusätzlich zu den lastbedingten Setzungen über einen längeren Zeitraum relativ stark und gelten im Gegensatz zu den nicht bindigen

Böden als weniger guter Baugrund, so dass eine vorherige Bestimmung der Korngrößenverteilung sowie der Wassergehalt und die Hydrogeologie wichtig sind.

Innerhalb der DIN 1054 werden in dieser Hinsicht Aufschlüsse in Form von Bohrungen mit leichter Rammsondierung und Schürfen empfohlen, die in Abhängigkeit mit den bodenkundlichen und geologischen Verhältnissen sowie dem Bauvorhaben eine ausreichende Tiefe besitzen sollten.

Auch sind geotechnische Laboruntersuchungen zur Ermittlung der bodenmechanischen Kenngrößen, des Schrumpf- und Quellvermögens sowie der mineralischen und chemischen Zusammensetzung empfehlenswert, da diese Ergebnisse relativ genaue Aussagen darüber treffen können, welche Setzungen von dem Baugrund zu erwarten sind (Abb. 4).

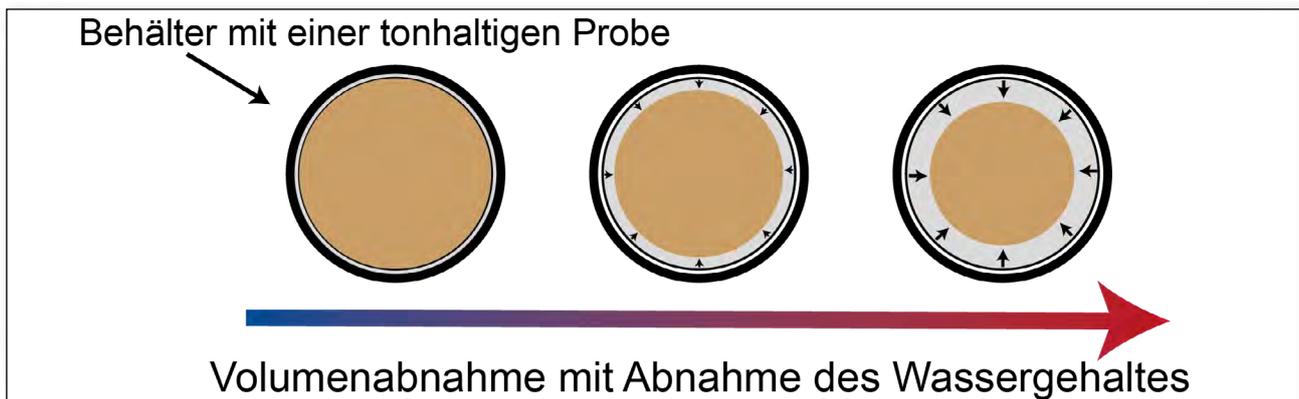


Abb. 4: Schrumpfversuch einer tonhaltigen Probe

## Sicherungs- und Stabilisierungsmaßnahmen

Im Rhein-Main-Gebiet können die setzungsempfindlichen Schichten mehrere zehner Meter Mächtigkeiten aufweisen. Eher unproblematisch ist dies, wenn die Setzungen unterhalb eines Bauwerkes gleichmäßig stattfinden. Kritisch wird es jedoch, wenn die Setzungen ungleichmäßig sind. Dies kann z. B. passieren, wenn unter einem Bauwerk an der einen Seite setzungsempfindliche Schichten und an der anderen Seite ein fester Boden vorhanden sind. In diesem Fall kann es zu einem „Zerreißen“ des Gebäudes durch ungleiche Setzungen kommen. Daher ist bei der Wahl der richtigen Gründung, bzw. Sicherung/Stabilisierung insbesondere darauf zu achten, ob:

- gleichmäßige oder ungleichmäßige Setzungen zu erwarten sind,
- mit einer Tieferlegung der Gründung tragfähiger Baugrund erreicht wird,

- das Bauvorhaben die vorhandene Wassersättigung des Baugrundes beeinflusst.

Geplante Bauvorhaben oder auch vorhandene Objekte können gegebenenfalls mit geeigneten Maßnahmen gesichert oder stabilisiert werden. Dazu zählen unter anderem:

- Spezielle Gründungen – starre/massive Bodenplatte, Pfahlgründung, Ringanker
- Stabilisierung des Untergrundes – Injektionen
- Baugrundverbesserung – Bodenaustausch, Ab-/Verdichtung, Regulierung des Wasserhaushalts – Entsigelung von Flächen und verstärkter Einsatz von versickerungsfähiger Verkehrsfläche, wie z. B. Pflastersteine oder Drainsphaltschichten, Entfernung der vorhandenen wasserentziehenden Vegetation und Ersetzung durch geeignete Begrünung, Vermeidung von Grundwasserabsenkung

## Fallbeispiel (Offenbach am Main)

In der Stadt Offenbach treten immer wieder Setzungen auf. Im geowissenschaftlichen Archiv des HLNUG liegen mehrere Gutachten vor, die Setzungsberechnungen und daraufhin empfohlene Gründungen aufgrund des Vorhandenseins setzungsempfindlicher Schichten zum Inhalt haben. Beim Neubau des Finanzamtes wurde z. B. bei der Baugrunduntersuchung mittels 21 Kernbohrungen festgestellt, dass im Baugrund setzungsempfindliche Schichten anstehen. Wörtlich heißt es *„Bei der vorliegenden, dem tonigen und setzfähigen Baugrund wenig abgepaßten Verteilung der Bauwerkslasten sind Setzungsunterschiede zwischen benachbarten Fundamenten zu erwarten. Sie gehen teilweise über das als erfahrungsgemäß noch bauwerksverträglich geltende Maß der Winkelverdrehung = 1 : 500 hinaus.“* (WESTRUP 1985). Ein nahegelegener Neubau wies zu dieser Zeit bereits erhebliche Setzungsschäden aufgrund des Schrumpfverhaltens der anstehenden 6–7 m mächtigen Tone auf, weshalb u. a. bei dem neuen Bauvorhaben das Verformungsverhalten durch einen Kompressionsversuch (KD-Versuch) untersucht wurde. Die damaligen Gründungsempfehlungen vom HLfB (Hessisches Landesamt für Bodenforschung) waren Zerrbalken, die eine Abminderung der voraussichtlichen Setzungsunterschiede bewirken sollten, die Verwendung eines durchlaufenden Streifenfundamentes zur Abminderung der Setzungsdifferenz oder eine Tiefgründung mittels Bohrpfählen anstelle der bis dato geplanten Flachgründung, was allerdings mit erheblichen Aufwand verbunden gewesen wäre (WESTRUP 1985).

Auch in den letzten Jahren gingen bei der Stadt Offenbach vermehrt Meldungen über neue Schäden an Bauwerken ein. Vermutete Ursache waren auch hier regelmäßig die anstehenden setzungsempfindlichen

## Ausblick

Der Klimawandel hat auf die setzungsempfindlichen Schichten einen besonders starken Einfluss. Die immer weiter steigenden Temperaturen und die verhältnismäßig immer geringeren Niederschläge stellen gerade den Städten und Kommunen im Ballungsraum des Rhein-Main-Gebietes mit seiner weiten Verbreitung an setzungsempfindlichen Schichten vor



**Abb. 5:** Gebäudeschaden in Form von Rissen durch Setzungen des Untergrundes

Schichten, die aufgrund der lang anhaltenden Trockenheit zu Setzungen und letztendlich zu Rissen in Gebäuden und Infrastrukturen geführt haben.

Die Stadt Offenbach hatte sich daraufhin entschlossen, innerhalb eines Pilotprojekts an Beispielhäusern mit Hilfe von verschiedenen Untersuchungen eine Ursachenanalyse für die Schäden an der Bebauung durchzuführen. Bei den durch die Stadt beauftragten Gutachten stellte sich heraus, dass nicht alle Gebäudeschäden aufgrund von Setzungen durch setzungsempfindliche Schichten hervorgerufen wurden. Erste Hinweise auf die Ursache gibt nicht selten das charakteristische Rissbild. Die Stadt hat dementsprechend einen Leitfaden herausgebracht, um Hausbesitzern erste Hinweise auf die Ursache zu geben, Tipps für das weitere Vorgehen zu geben und bei der Wahl der richtigen Maßnahme zu unterstützen (Stadtverwaltung Offenbach 2021).

große Herausforderungen. Folgen des Klimawandels sind u. a. die sinkenden Grundwasserstände und die Austrocknung der oberflächennahen Schichten. Daher ist es wichtig ein Konzept zur Anpassung an den Klimawandel zu entwickeln, dass die Schäden durch die setzungsempfindlichen Schichten vermindert, aber auch das Stadtklima allgemein positiv verändert.

## Literatur

- PRINZ, H. & STRAUB, R. (2018): Ingenieurgeologie – 6. Aufl.: 898 S., 415 Abb., 84 Tab.; Heidelberg.
- Stadtverwaltung Offenbach (2021): Extreme Trockenheit fördert Risse an Häuser. – Internet: [https://www.offenbach.de/leben-in-of-umwelt-klima/Bauen\\_\\_Umweltschutz/Risse-2019.php](https://www.offenbach.de/leben-in-of-umwelt-klima/Bauen__Umweltschutz/Risse-2019.php) (Stand: 01.09.2021).
- WESTRUP (1985): Baugrunderkundung und allgemeine Gründungsberatung für den Neubau des Finanzamtes Offenbach Bieberer Straße 59 in Offenbach. – 2. Bericht: Vorläufige Setzungsermittlung und weitere Gründungshinweise für den 2. Bauabschnitt – Im Archiv des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Gutachtenarchiv-Nr. **5818/632**; Wiesbaden [unveröffentlicht].

## 3.4 Erdbeben

**BENJAMIN HOMUTH \***

### Entstehung und Verbreitung

Die Erdbebenaktivität in Hessen (hauptsächlich im nördlichen Teil des Oberrheingrabens und an seinen Rändern und damit auch im Ballungsraum Rhein-Main) ist eine Folge des Wechselspiels zwischen dem aus der Kollision von afrikanischer und europäischer Platte resultierenden Spannungsfeld und alten Bruchstrukturen. Aufgrund dieser großräumigen Bewegungen erfährt der Oberrheingraben von Süden her einen Druck. Dieser erzeugt eine Spannung, welche sich über Jahrzehnte oder Jahrhunderte aufbaut und in wenigen Sekunden ruckartig in Form eines Erdbebens löst. Erdbeben treten vermehrt an vorhandenen Schwächezonen, sogenannten Störungen, in der Erdkruste auf.

In Hessen treten pro Jahr statistisch gesehen mehrere mäßig starke Erdbeben auf, die örtlich von der Bevölkerung wahrgenommen werden. Etwa einmal in zehn Jahren ist mit einem mittelstarken Erdbeben zu rechnen, das Gebäudeschäden und Betriebsstörungen verursachen kann. Starke Erdbeben sind sehr selten, aber auch in Hessen und im Rhein-Main-Gebiet nicht völlig ausgeschlossen. Dort wo schwache Erdbeben auftreten, sind auch stärkere Erdbeben möglich. Schwache Erdbeben sind sehr viel häufiger und lassen deshalb besonders gefährdete Gebiete erkennen. Darunter fallen auch einige Teile des Ballungsraum Rhein-Main.

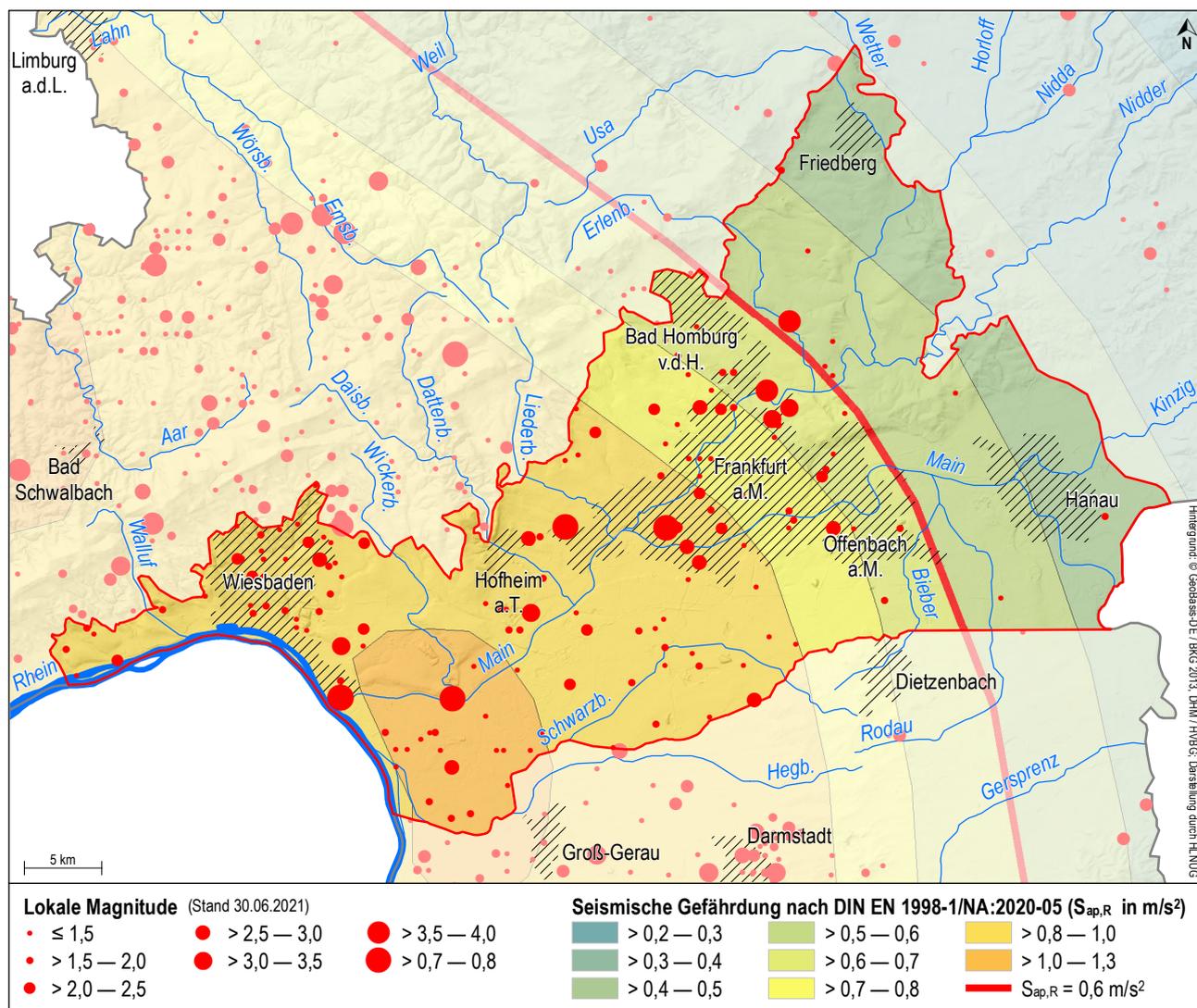
### Besondere historische Ereignisse und seismische Gefährdung im Ballungsraum Rhein-Main

Der Hessische Erdbebenkatalog ist eine Zusammenstellung historischer und aktueller Informationen zu Erdbeben in Hessen und direkter Umgebung von Hessen. Er wird vom Hessischen Erdbebendienst (HED) geführt und regelmäßig aktualisiert. Für den

Ballungsraum Rhein-Main enthält der Hessische Erdbebenkatalog einige bekannte historische (aus Überlieferungen/Chroniken abgeleitete) und aktuelle (instrumentell erfasste) Erdbeben (Abb. 1). Die stärksten dieser Ereignisse sind in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tab. 1:** Besondere historische Erdbeben im Ballungsraum Rhein-Main

Datum	Uhrzeit (UTC)	Breite (°)	Länge (°)	Lokation	Herdtiefe (km)	Magnitude ( $M_L$ )	Intensität (EMS-98)
23.12.2010	01:36	49.99	8.22	Mainz	9,0	3,4	IV
29.06.2010	00:42	50.05	8.47	Hattersheim	5,0	3,2	–
29.05.1990	06:14	50.17	8.70	Frankfurt a. Main	10,0	3,5	V
26.05.1990	11:44	50.18	8.68	Frankfurt a. Main	10,0	3,8	V
04.11.1979	02:24	50.03	8.30	Wiesbaden	10,0	3,3	IV–V
18.01.1789	15:00	50.10	8.50	Frankfurt a. Main	–	4,9	V–VI
23.12.1788	02:00	50.10	8.50	Frankfurt a. Main	–	3,6	–
12.05.1727	06:00	50.10	8.59	Frankfurt a. Main	–	4,2	V
28.11.1642	23:00	50.00	8.38	Rüsselsheim	–	4,9	V–VI
19.01.1528	02:00	50.00	8.30	Wiesbaden	–	3,5	V



**Abb. 1:** Seismische Ereignisse (rote Punkte, Durchmesser entsprechend der lokalen Magnitude  $M_L$ ) und seismische Gefährdung (Gefährdungsniveaus als Plateau-Werte der elastischen spektralen Antwortbeschleunigung  $S_{ap,R}$  für eine mittlere Wiederholungsperiode von 475 Jahren nach DIN EN 1998-1/NA:2020-05 in  $m/s^2$ ). Die rote Konturlinie ( $S_{ap,R} = 0,6 m/s^2$ ) stellt den Anwendungsbereich der DIN EN 1998-1 dar. Bereiche mit höheren Werten sind von der DIN-Norm betroffen, Bereiche mit niedrigeren Werten sind davon ausgenommen.

Anhand von Erdbebenkatalogen kann die seismische Gefährdung für den Ballungsraum Rhein-Main mit mathematischen (probabilistischen) Verfahren berechnet werden. Die aktuellste Berechnung stammt aus dem Jahr 2018 (GRÜNTAL et al. 2018) und zeigt eine leicht erhöhte seismische Gefährdung des Rhein-Main-Gebietes im Vergleich zu vielen anderen Regionen von Hessen. Im hier betrachteten Ballungsraum Rhein-Main ist die seismische Gefährdung südlich der Stadt Hofheim a. T. am höchsten (Abb. 1). Hier ist mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10% in den nächsten 50 Jahren mit Bodenbeschleunigungen von über  $1,0 m/s^2$  in Folge eines

Erdbebens zu rechnen. Lediglich der südlich angrenzende Bereich des nördlichen Oberrheingrabens und Teile des westlichen Hintertaunus weisen in Hessen vergleichbare Werte auf.

Neben der instrumentellen Erfassung von Erdbeben ist es ebenfalls möglich, die Auswirkungen von Erdbeben auf Mensch und Umwelt zu erfassen. Bei spürbaren Ereignissen ist eine Auswertung der Folgen von Erdbeben über makroseismische Fragebögen möglich. Ein solcher Fragebogen kann auf den Internetseiten des HED von der Bevölkerung ausgefüllt werden. Basierend auf den makroseismischen Fra-

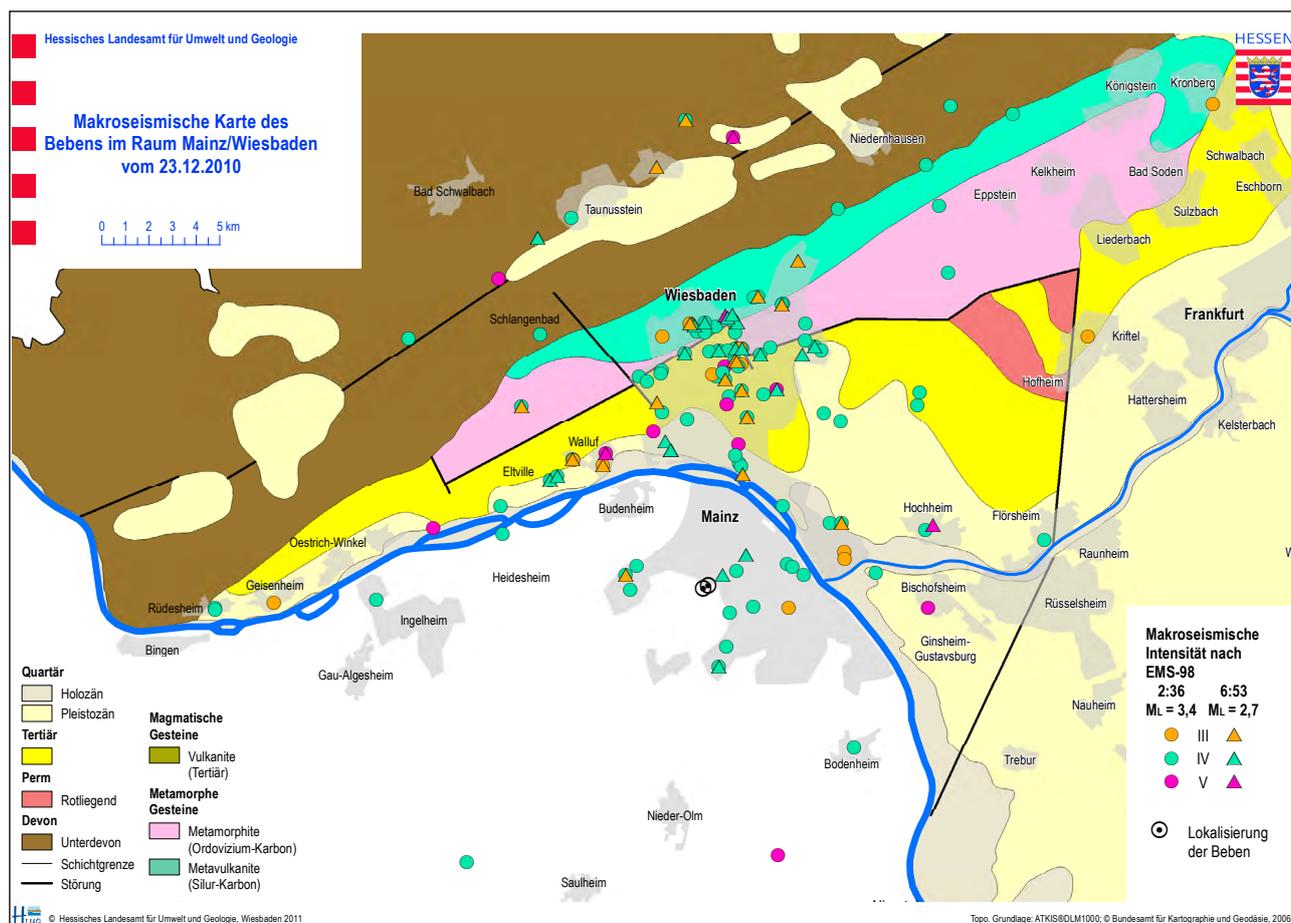


Abb. 2: Makroseismische Karte des Erdbebens vom 23.12.2010 im Raum Mainz/Wiesbaden (Quelle: HOMUTH et al. 2014)

gebögen werden makroseismische Karten erstellt, die den Beobachtungen makroseismische Intensitäten zuweisen. So können von einem Erdbeben besonders betroffene Gebiete ausgewiesen werden. Im folgenden Abschnitt wird ein Beispiel einer solchen makroseismischen Auswertung aufgezeigt.

Am Morgen des 23. Dezember 2010 erschütterten zwei Erdbeben mit einer Magnitude von  $M_L = 3,2$  bzw.  $M_L = 2,5$  um 2:36 Uhr bzw. 6:53 Uhr die Re-

gion um Mainz/Wiesbaden. Gespürt wurden die Erdbeben von vielen Menschen in den Städten Wiesbaden und Mainz. Das erste Erdbeben wurde dabei meist als Grummeln, das zweite Erdbeben als kleiner „Rums“ wahrgenommen. Mehr als 120 Meldungen zu dem Erdbeben wurden dem HED in Form von makroseismischen Fragebögen übermittelt. Die meisten der Meldungen konnten verwertet und zu einer makroseismischen Karte (Abb. 2) zusammengetragen werden (HOMUTH et al. 2014).

## Überwachung

Die Erdbebenaktivität in Hessen wird mit seismischen Stationen des Hessischen Erdbebendienstes am HLNUG überwacht. An diesen Standorten werden Erdbeben, aber auch Bodenerschütterungen anderen Ursprungs, automatisch registriert. Der Aufbau einer Station besteht in der Regel aus Seismometer, Digitalisierer, GPS-Empfänger (Zeitzeichen) und Mo-

dem (Datenübertragung). Die Messdaten werden kontinuierlich von den Messstationen online an die Zentrale nach Wiesbaden übertragen. Dort werden die Seismogramme analysiert und ausgewertet. Für Erdbeben mit Epizentrum im Ballungsraum Rhein-Main liegt die Erfassungsschwelle etwa bei Magnitude 0,5. Abbildung 3 zeigt die Verteilung von

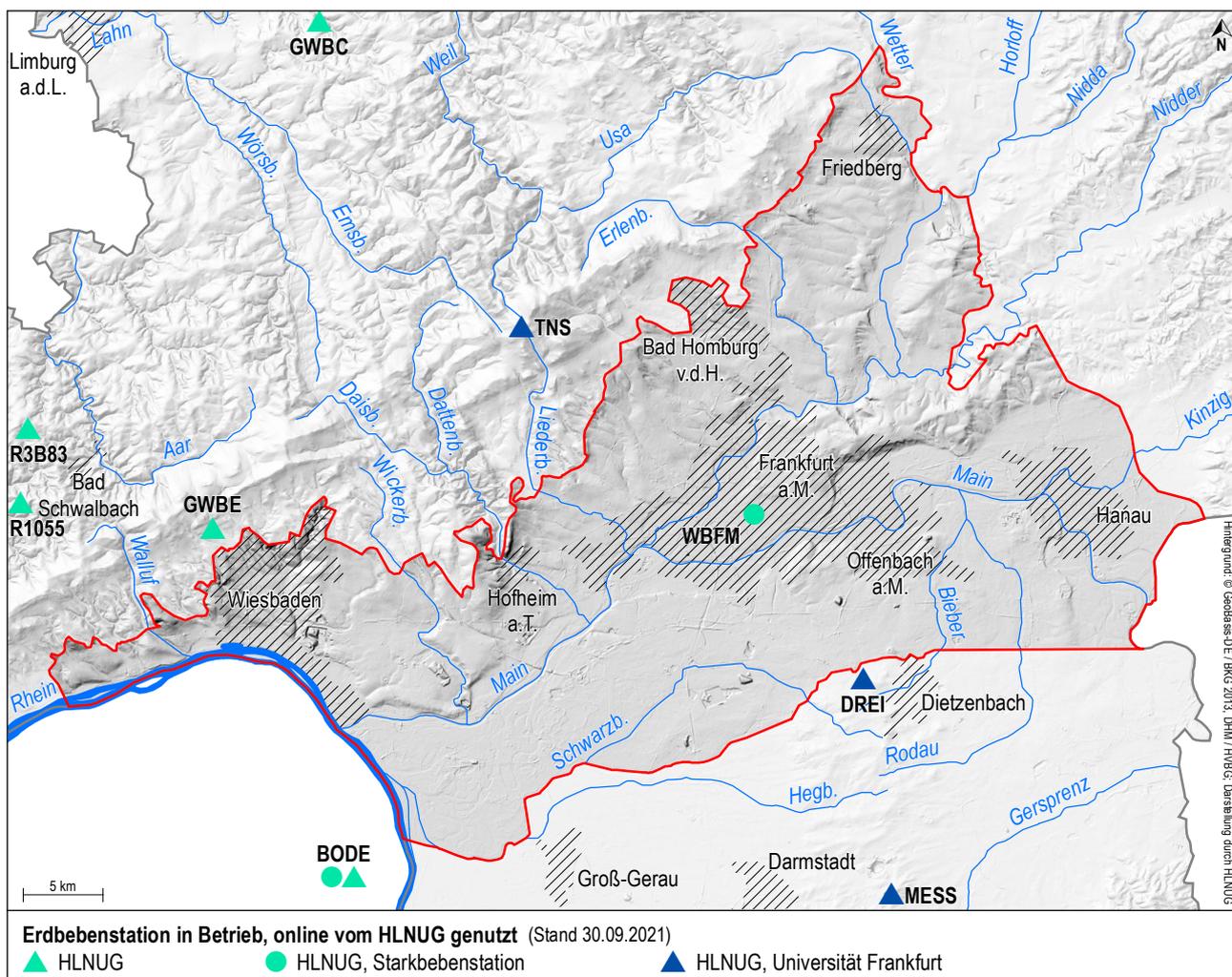


Abb. 3: Karte der vom HED genutzten Erdbebenmessstationen im Bereich des Ballungsraums Rhein-Main

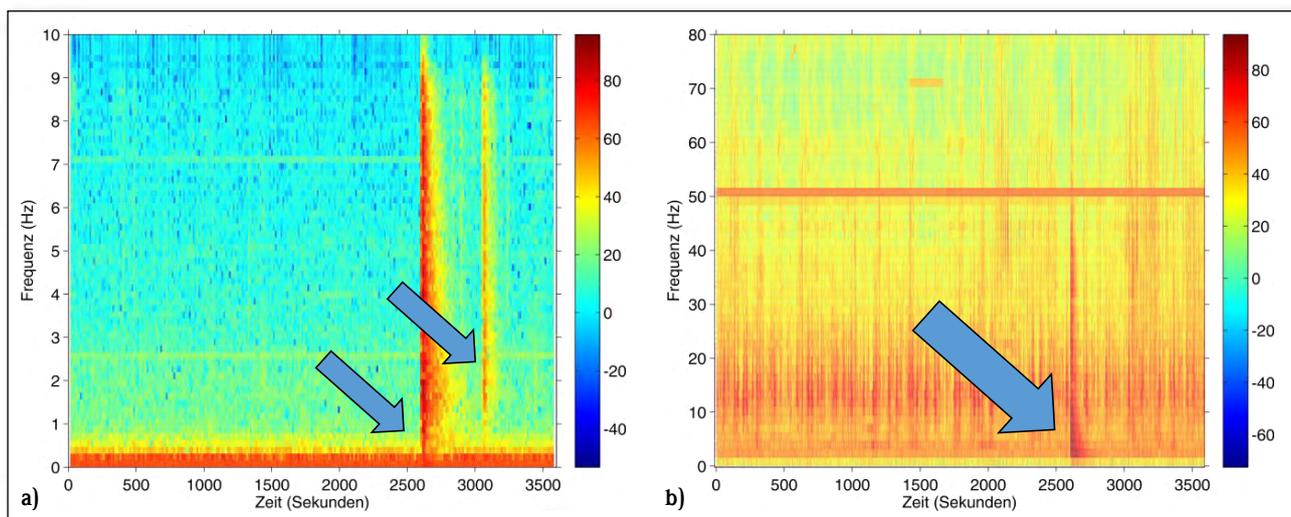


Abb. 4: a) Spektrogramm der Vertikalkomponente einer „ruhigen“ und b) einer „unruhigen“ Messstation für einen Zeitraum von 60 Minuten. Die Farbskala ist in dB angegeben. Die Pfeile weisen auf aufgezeichnete Erdbeben nach 43 Minuten und 50 Minuten hin. Das Ereignis nach 50 Minuten kann an der „unruhigen“ Station nicht detektiert werden, da das Hintergrundrauschen zu groß ist.

Erdbebenmessstationen des HED im Ballungsraum Rhein-Main. Insgesamt sind in diesem Gebiet aufgrund der hohen Besiedlungsdichte und der damit verbundenen hohen Anzahl an Infrastruktureinrichtungen (Straßen, Bahnlinien, etc.) vergleichsweise wenige Erdbebenmessstationen enthalten. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass eine Erdbebenmessstation bereits sehr geringe Bodenbewegungen erfassen kann und eine hohe Besiedlungsdichte zu entsprechend hohen Rauschverhältnissen führt, die eine Messung vor allem von schwachen Erdbeben erschweren (Abb. 4). Daher sind die Messstationen des HED eher außerhalb der Ballungszentren instal-

liert. Mit den vorhandenen Messstationen ist es aber möglich, auch schwache Erdbeben im Ballungsraum Rhein-Main zu erfassen.

Eine Besonderheit stellen sogenannte Strong Motion (Starkbeben-) Stationen dar. Diese Stationen dienen zur Erfassung der Auswirkungen von Erdbeben auf Gebäude. Um diese Auswirkungen z. B. für eine Großstadt wie Frankfurt am Main feststellen zu können, betreibt der HED eine solche Messstation in den Räumen des Senckenberg-Museums in Frankfurt am Main (Abb. 5).



**Abb. 5:** Beispiele für Erdbebenmessstationen des HED im Ballungsraum Rhein-Main **a)** Kreuzstollen in Wiesbaden – Messstation GWBE **b)** Strong Motion Messstation WBFM – Senckenberg-Museum Frankfurt

## Auswirkungen auf Bauvorschriften

Die hohe Besiedlungsdichte und die Konzentration empfindlicher und sicherheitsrelevanter technischer Großanlagen, Versorgungs-, Verkehrs- und Kommunikationseinrichtungen würden ein schweres Erdbeben ohne adäquate Bauweise zu einem ernstzunehmenden Risiko werden lassen. Das Bauen in den Erdbebenregionen der Bundesrepublik Deutschland wird im Wesentlichen in der DIN 4149 mit dem Titel „Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahme, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“ bzw. der DIN EN 1998-1 mit dem Titel „Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten“ geregelt. Wie auch in anderen Erdbebenregionen der Welt üblich, berück-

sichtigt diese Baunorm ein ganz bestimmtes Gefährdungsniveau. Es werden in der Norm Bodenbewegungen berücksichtigt, wie sie im Mittel alle 475 Jahre einmal erwartet werden (das entspricht einer Wahrscheinlichkeit des Auftretens oder Überschreitens von 10% innerhalb von 50 Jahren). Bodenbewegungen durch seltenere Erdbeben, die deutlich stärker sind als bei den „500 Jahre-Beben“, gehören zum Restrisiko.

Das erklärte Ziel der Norm ist im Falle eines Erdbebens menschliches Leben zu schützen, Schäden zu begrenzen und sicherzustellen, dass für die öffentliche Sicherheit und Infrastruktur wichtige bauliche Anlagen funktionstüchtig bleiben. Kleine Schäden,

wie Verputzrisse etc. toleriert die Norm durchaus. Eine Vorhersage von Erdbeben ist bislang nicht möglich, in den gefährdeten Gebieten kann lediglich

Vorsorge betrieben werden durch die Beachtung der Baunormen.

## Literatur

GRÜNTAL, G., BOSSE, C., STROMEYER, D., COTTON, F. & BINDI, D. (2018): The probabilistic seismic hazard assessment of Germany – version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. *Bulletin of Earthquake Engineering* **16**, 4339-4395, 30 Abb., 7 Tab.; <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0315-y>.

HOMUTH, B., RÜMPKER, G. & KRACHT, M. (2014): Mikroseismisches Monitoring im nördlichen Oberrheingraben, die Pilotstudie Monaseis, *Geol. Jb. Hessen* **138**: 15–35, 26 Abb., 2 Tab.; Wiesbaden.

HOMUTH, B. (2015): Hochauflösende Erfassung der Seismizität im nördlichen Oberrheingraben: Schwarmbeben, Spannungsregime und Seismische Gefährdung. Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität, 191 S.; 143 Abb.; 43 Tab.; Frankfurt a. M.

## 3.5 Radon

**ROUWEN LEHNÉ \***

### Grundlagen und Wirkung auf den Menschen

Radon (hier Radon-222) ist ein geruchs- und farbloses, in der Natur vorkommendes, radioaktives Edelgas, das beim Zerfall von Radium entsteht und eine Halbwertszeit von 3,82 Tagen besitzt. Für Menschen ist Radon-222 nicht direkt schädlich, die Gefährdung (= Exposition) geht vielmehr von den Produkten aus, die wiederum aus dem Zerfall von Radon entstehen. Dabei handelt es sich um die Schwermetalle Blei, Polonium und Bismut. Diese können sich nach ihrer

Entstehung an feste oder flüssige Schwebeteilchen in der Luft anheften, so in den Atemtrakt des Menschen gelangen und dort durch den weiteren Zerfall und die damit entstehende Energie Zellen des Lungengewebes schädigen und infolgedessen Lungenerkrankungen verursachen (Bundesamt für Strahlenschutz 2016). Nur sehr viel seltener erfolgt der Radonzerfall im Atemtrakt und beaufschlagt die Lunge direkt.

### Entstehung und Verfügbarkeit von geogenem Radon

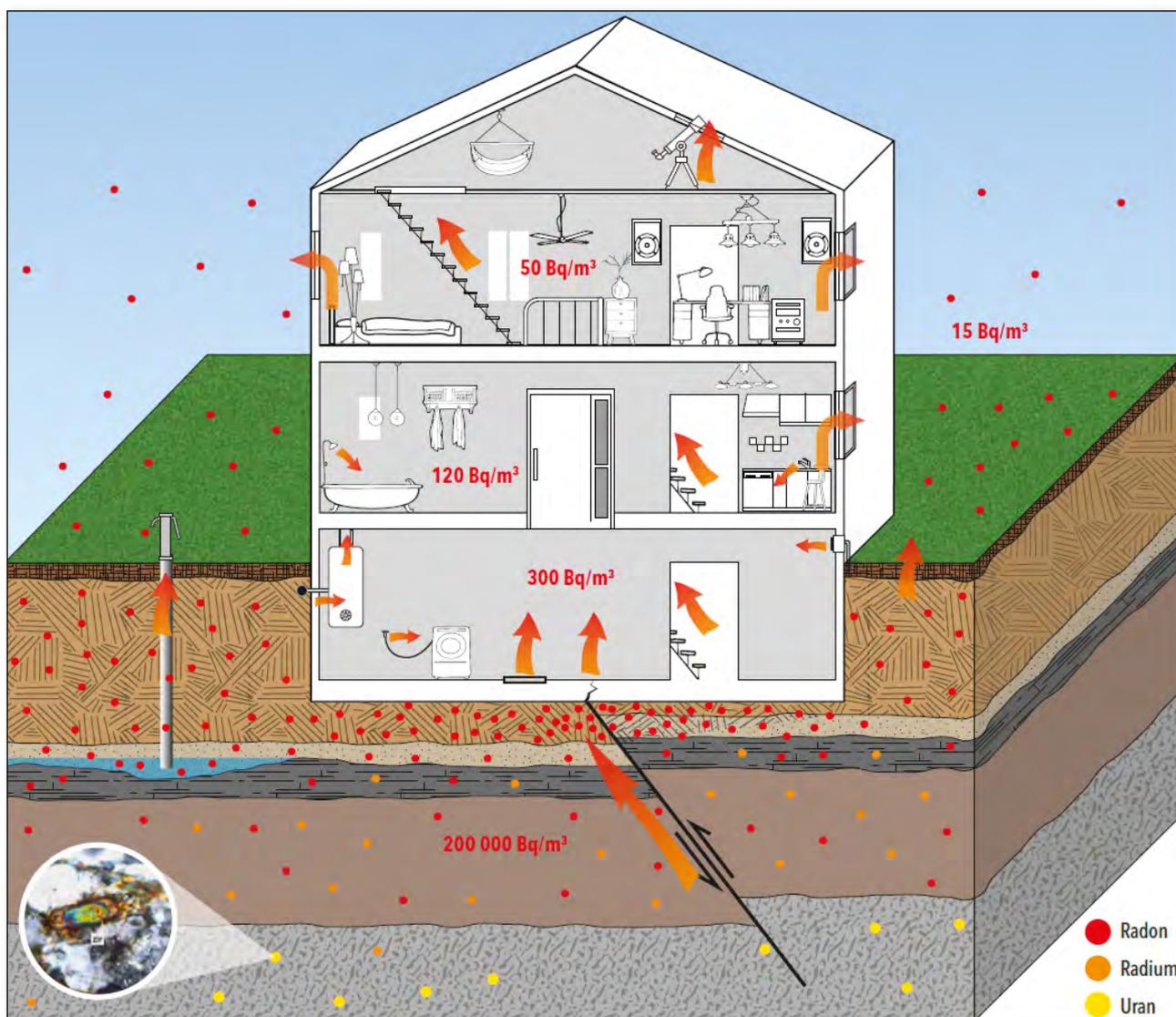
Radon wird dauerhaft in Gesteinen und Böden, die über einen schwankenden Anteil an radioaktiven Elementen wie Uran und Thorium verfügen, gebildet. Im Prinzip stellen dabei alle Gesteine und Böden natürliche Radonquellen dar, da diese in unterschiedlichen Konzentrationen Uran und Thorium enthalten. Gute Radonlieferanten sind saure magmatische Gesteine, wie Granite oder Rhyolithe. Bei den Mineralen haben beispielsweise Apatit, Zirkon und Monazit Uran eingelagert (KEMSKI et al. 2012, MILITZER et al. 2017). Damit sind Kenntnisse zum Auftreten, der Verteilung und der Zusammensetzung von Gesteinen und Böden in Hessen eine wichtige Grundlage zur Bewertung der „potenziellen Radonverfügbarkeit“ (vgl. Kap. 2). Von den geologischen/bodenkundlichen Gegebenheiten hängt weiterhin ab, wie gut Radon „wandern“ und so an die Oberfläche gelangen kann. Dieser Weg vom Bildungsort bis in die freie Atmosphäre erfolgt in mehreren Schritten.

Das Austreten von Radon aus dem Kristallgitter von Mineralien in den Porenraum des Bodens wird als Emanation bezeichnet. Die Bewegung von Radon entlang von Rissen und Kapillaren sowie im Porenraum der Böden heißt Migration und erfolgt diffusiv

oder durch advektiven Transport mit anderen Bodenfluiden. Der Austritt vom Boden in die Atmosphäre wird als Exhalation bezeichnet.

Geogenes Radongas, das auf dem beschriebenen Weg in die Atmosphäre gelangt, liefert so neben terrestrischer und kosmischer Strahlung einen Beitrag zur natürlichen Strahlenexposition. In Deutschland belüftet sich die durch Radonexposition verursachte durchschnittliche Dosis auf 1,1 Millisievert pro Jahr (Bundesamt für Strahlenschutz 2016), was mehr als 50% der mittleren natürlichen Strahlungsexposition entspricht.

Während sich die Radongaskonzentration im Freien in der Atmosphärenluft schnell durch Verdünnung/Vermischung auf völlig unbedenkliche Werte reduziert, kann Radon durch unzureichende Baustrukturen wie Risse im Fundament/in der Bodenplatte, undichte Durchführungen oder auf Grund der Bauart und Beschaffenheit in Gebäude eindringen und sich dort signifikant aufkonzentrieren (Abb. 1). Dabei hängt die Radonkonzentration in Innenräumen von einer Vielzahl von Faktoren wie z.B. Bauart, Baumaterial, Gebäudebeschaffenheit oder Bewohnerverhalten (Gebäudelüftung und Heizverhalten) ab (URBAN et al. 1985).



**Abb. 1:** Radon „wandert“ Richtung Oberfläche und kann im ungünstigen Fall in Gebäude gelangen und sich dort signifikant aufkonzentrieren

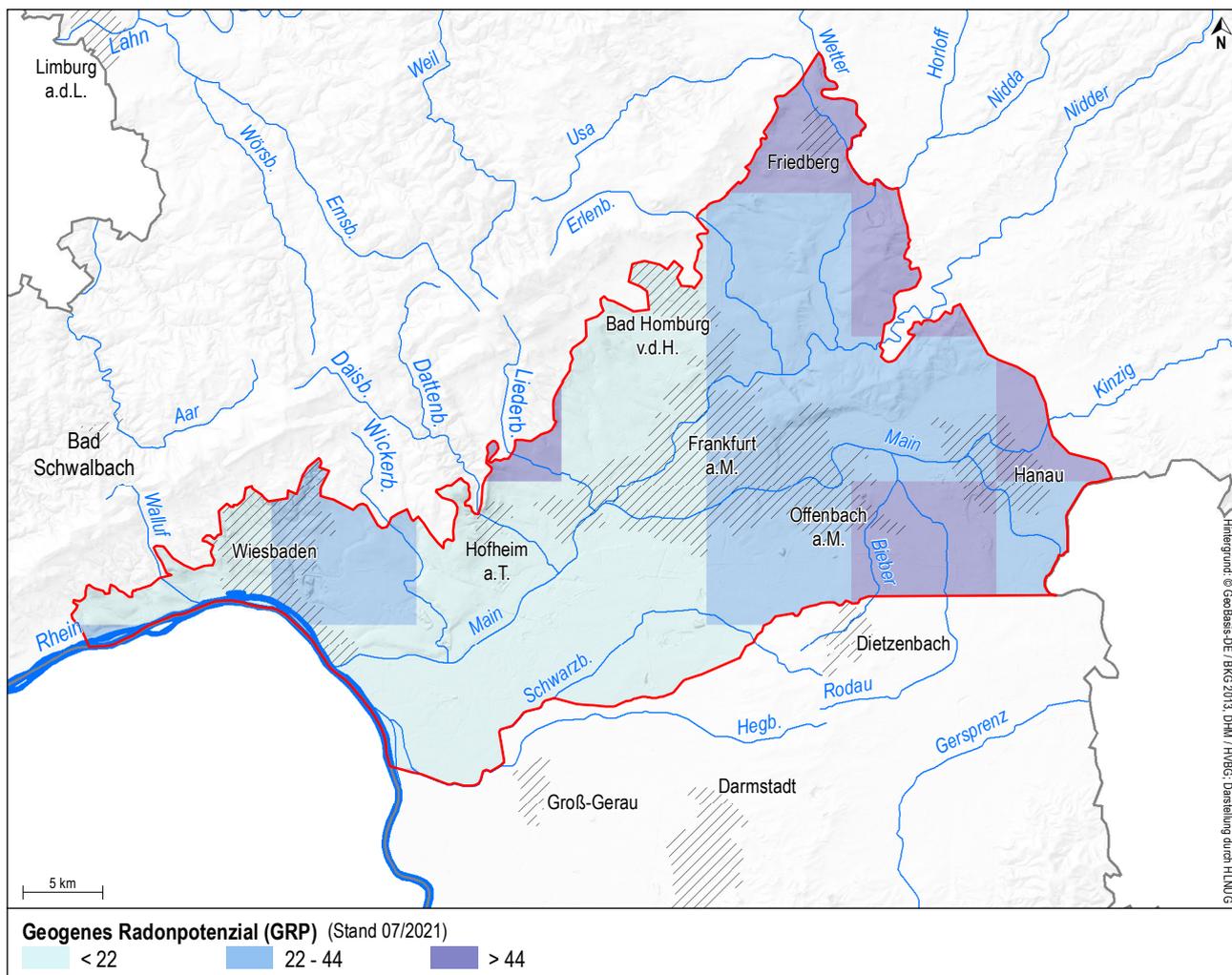
## Gesundheitsschutz und Radonvorsorge

Um der Gesundheitsgefährdung durch hohe Radonkonzentrationen bzw. einer zu großen Exposition entgegenzuwirken, wurde die Europäische Richtlinie für den Strahlenschutz „2013/59/Euratom“ am 31. Dezember 2018 durch das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) und die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), verbindlich in nationales Recht umgesetzt. Basierend auf dem daraus folgenden Radonmaßnahmenplan sollen Landesradonstrategien entwickelt und umgesetzt werden. Das Land Hessen führt in diesem Zusammenhang bereits unter anderem eine landesweite Messkampagne zur Radonaktivitätskonzentrationen in der Bodenluft durch (KRAUS & HUBER

2019). Aufgrund des Einflusses des Untergrundes auf die Entstehung und Verfügbarkeit von Radon wird die hessische Radonstrategie geowissenschaftlich vom HLNUG begleitet (LEHNÉ et al. 2019).

Wenngleich die gemessenen Konzentrationen von Radon in der Bodenluft nicht direkt gefährdend sind, geben sie Aufschluss darüber, ob sich mit dem Boden und dem darunterliegenden Gestein eine höhere oder niedrigere Radonverfügbarkeit verbindet. Unter Verwendung dieser Informationen und weiteren Parametern (u. a. Permeabilität am Messpunkt, Gesteinseigenschaften) hat das Bundesamt





**Abb. 3:** Klassifizierung des Radonpotenzials im Betrachtungsraum gemäß der definierten Schwellenwerte zur Festlegung von Radonvorsorgegebieten

tenziale in der Wetterauer Senke liegen. Interpretativ können die signifikanten Potenzialunterschiede zwischen den Strukturräumen, bei denen es sich um tertiäre Senkungsgebiete handelt, mit den Gesteinen im Untergrund in Verbindung gebracht werden. Während im Bereich niedriger Radonpotenziale überwiegend Sande und Kiese erdoberflächennah verbreitet sind, finden sich in der Wetterauer Senke große Mengen feinkörniger Sedimente, Ton und Schluff mit organischen Bestandteilen und Braunkohlen. Mit diesen Sedimenten ist im Trend immer eine höhere Radonverfügbarkeit verbunden. In diesen Gegebenheiten ist auch die tendenzielle Zunahme der Radonpotenziale von West nach Ost begründet. Damit sind die modellierten Radonpotenziale in einem guten Einklang mit den geologischen Lagerungsverhältnissen, ungeachtet möglicher Einflüsse von tektonischen Störungen, die im gesamten Betrachtungsraum eben-

falls auftreten und in vielen Fällen zu einer höheren Radonverfügbarkeit beitragen (LEHNÉ et al. 2017).

Eine Klassifizierung der modellierten Radonpotenziale entsprechend der statistisch abgeleiteten Schwellenwerte als Grundlage für die Festlegung von Radonvorsorgegebieten zeigt ein zweigeteiltes Bild (Abb. 3). Der westliche Bereich des Betrachtungsraumes ist überwiegend durch Radonpotenziale kleiner 22 gekennzeichnet und damit aus Sicht der erwartbaren Radonbelastung in Innenräumen als eher unkritisch anzusehen. Ausnahmen bilden zwei Bereiche bei Wiesbaden sowie nördlich von Hofheim a. T., wo die südlichen Ausläufer des Rheinischen Schiefergebirges und damit in Verbindung stehende tektonische Störungen Einfluss nehmen auf die Radonsituation. Im östlichen Bereich des Betrachtungsraumes steigen die modellierten

Radonpotenziale deutlich an und überschreiten in den Räumen Offenbach, Hanau und Friedberg auch den Schwellenwert 44. Damit muss statistisch davon ausgegangen werden, dass die Radonbelastung in Innenräumen in mehr als 10% der Gebäude den Referenzwert von 300 Bq/m<sup>3</sup> im Jahresmittel übersteigt. Dass diese Bereiche derzeit (Stand 2021) dennoch formal nicht als Radonvorsorgegebiet definiert sind liegt in der Tatsache begründet, dass die finale Klassifizierung nicht auf Basis der 10 x 10 km Kachelung erfolgt, sondern unter Berücksichtigung der Verwaltungsebene der Landkreise/kreisfreien Städte sowie des sogenannten „75%-Kriteriums“. Das bedeutet, dass ein Landkreis bzw. eine kreisfreie Stadt erst dann als Radonvorsorgegebiet klassifiziert wird, wenn der Schwellenwert von 44 auf mindestens 75% der Fläche überschritten wird. Dies ist aktuell in keinem Landkreis bzw. in keiner kreisfreien Stadt in Hessen der Fall.

Wenngleich sich mit diesem Umstand damit keine Handlungszwänge für Bürger\*innen, Unternehmen und Arbeitgeber ergeben, muss bedacht werden, dass es sich bei den zugrundeliegenden Radonpotenzialen um statistische Aussagen handelt, die als „Wahrscheinlichkeiten“ zu verstehen sind, die zudem in einer sehr groben Auflösung von 10 x 10 km gemacht sind. In der Konsequenz kann nicht ausgeschlossen werden, dass lokal auch in Gebieten mit einem modellierten geringen Potenzial hohe Radonbelastungen auftreten können, wie z. B. entlang von lokalen tieferreichenden Störungen oder Störungszonen im Untergrund. Im Zweifel ist die Klärung eines entsprechenden Sachverhaltes nur durch eine objektbezogene Untersuchung durch z. B. Raumluftmessungen möglich. Hierzu können sogenannte „Exposimeter“, die nur wenige cm groß sind (Abb. 4), kostengünstig von anerkannten Anbietern erworben und in Aufenthaltsräumen für eine Dauer von 1 bis 12 Monate aufgestellt werden. Die Auswertung, die



**Abb. 4:** Exposimeter zur Bestimmung der Durchschnittskonzentration von Radon in der Raumluft

üblicherweise bereits im Kaufpreis enthalten ist, erfolgt dann im Labor. Informationen zu anerkannten Anbietern finden sich auf der Webseite des BfS ([www.bfs.de](http://www.bfs.de)).

Zur Optimierung der Belastbarkeit der Entscheidungsgrundlagen für die Festlegung von Radonvorsorgegebieten sollen im Fortgang der Bemühungen in Hessen zusätzliche Bodenluftmessungen sowie Forschungsarbeiten zum Thema durchgeführt werden. Bei einer ausreichend guten Datengrundlage sind dann auch kleinräumigere Festlegungen von Radonvorsorgegebieten denkbar.

Weiterführende Informationen zum Thema Radon & Geologie finden Sie auf der Webseite des HLNUG unter <https://www.hlnug.de/geologie/was-ist-radon>.

## Literatur

- BOSSEW, P. & HOFFMANN, B. (2018): Die Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und die Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten. – Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.): 17 S., 2 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- Bundesamt für Strahlenschutz (2016): Radon – ein kaum wahrgenommenes Risiko. – Strahlenschutz Konkret: 8 S., 6 Abb.; Berlin.
- KRAUS, G. & HUBER, S. (2019): Radon in Hessen – Praktische Informationen zum Strahlenschutz. – Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, & Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.): 44 S., 12 Abb., 4 Tab.; Wiesbaden.
- KEMSKI, J., KLINGEL, R., SIEHL, A., NEZNAL, M. & MATOLIN, M. (2012): Erarbeitung fachlicher Grundlagen zur Beurteilung der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messmethoden zur Bestimmung der Radonbodenluftkonzentration. – Vorhaben 3609S10003: Band 2, Sachstandsbericht „Radonmessungen in der Bodenluft – Einflussfaktoren, Messverfahren, Bewertung“. – Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.): 122 S., 35 Abb.; Berlin.
- LEHNÉ, R., MILITZER, A., HEGGEMANN, H. & REISCHMANN, T. (2017): Radon anomalies in the northern Upper Rhine Graben (Germany) as a result of recent geodynamic processes. – In: TOLLEFSEN, T., CINELLI, G. & DE CORT, M., eds.: 2nd International Workshop on the European Atlas of Natural Radiation: Book of Abstracts, EUR 28820 EN. – Publications Office of the European Union, ISBN 978-92-79-74131-9, doi:10.2760/72011, JRC108701: S. 34; Luxembourg.
- LEHNÉ, R., LAUPENMÜHLEN, T., HEGGEMANN, H. & JEDMOWSKI, L. (2019): Geowissenschaftliche Begleitung der Radonstrategie Hessen zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten. – Jahresbericht des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG): S. 167–175, 4 Abb., 1 Tab.; Wiesbaden.
- MILITZER, A., LEHNÉ, R., REISCHMANN, T. & NESBOR, H.-D. (2017): Natural Th, U, and K concentrations in bedrocks of major geological units in Hesse (Germany). – In: TOLLEFSEN, T., CINELLI, G. & DE CORT, M., (eds): 2nd International Workshop on the European Atlas of Natural Radiation: Book of Abstracts, EUR 28820 EN. – Publications Office of the European Union, ISBN 978-92-79-74131-9, doi:10.2760/72011, JRC108701: S. 38; Luxembourg.
- URBAN, M., WICKE, A. & KIEFER, H. (1985): Bestimmung der Strahlenbelastung der Bevölkerung durch Radon und dessen kurzlebige Zerfallsprodukte in Wohnhäusern und im Freien. – Bericht 3805 des Kernforschungszentrums Karlsruhe: 191 S., 73 Abb., 36 Tab.; Karlsruhe.

## 3.6 Artesisch gespanntes Grundwasser

SVEN RUMOHR \*

### Artesisch gespanntes Grundwasser

Wird Grundwasser in einem erhöht liegenden Gebiet wie dem Taunus neu gebildet und erstreckt sich der Grundwasserleiter bis in ein tiefer liegendes Gebiet z. B. entlang von Rhein und Main, kann dort die Druckfläche des Grundwassers über der Geländeoberfläche liegen. Notwendig ist hierfür eine Überdeckung des Grundwasserleiters in dem tiefer liegenden Gebiet durch eine undurchlässige Schicht, z. B. Ton oder Tonsteine.

Grundwasser, dessen Druckfläche über der Geländeoberfläche liegt, wird nach der Landschaft Artesien

(frz.: Artois) im Norden Frankreichs als „artesisch“ bezeichnet, weil es dort häufig beobachtet wurde.

Erschließt eine Bohrung einen Grundwasserleiter mit artesisch gespanntem Grundwasser, kommt es zum freien Überlauf, d. h. das Wasser läuft ohne den Einsatz einer Pumpe frei aus dem Bohrloch heraus. Die Stärke des freien Überlaufs eines artesisch gespannten Grundwassers hängt von der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und der Höhe des Druckspiegels über der Geländeoberfläche ab. Ein starker Überlauf kann an der Geländeoberfläche eine Überschwem-

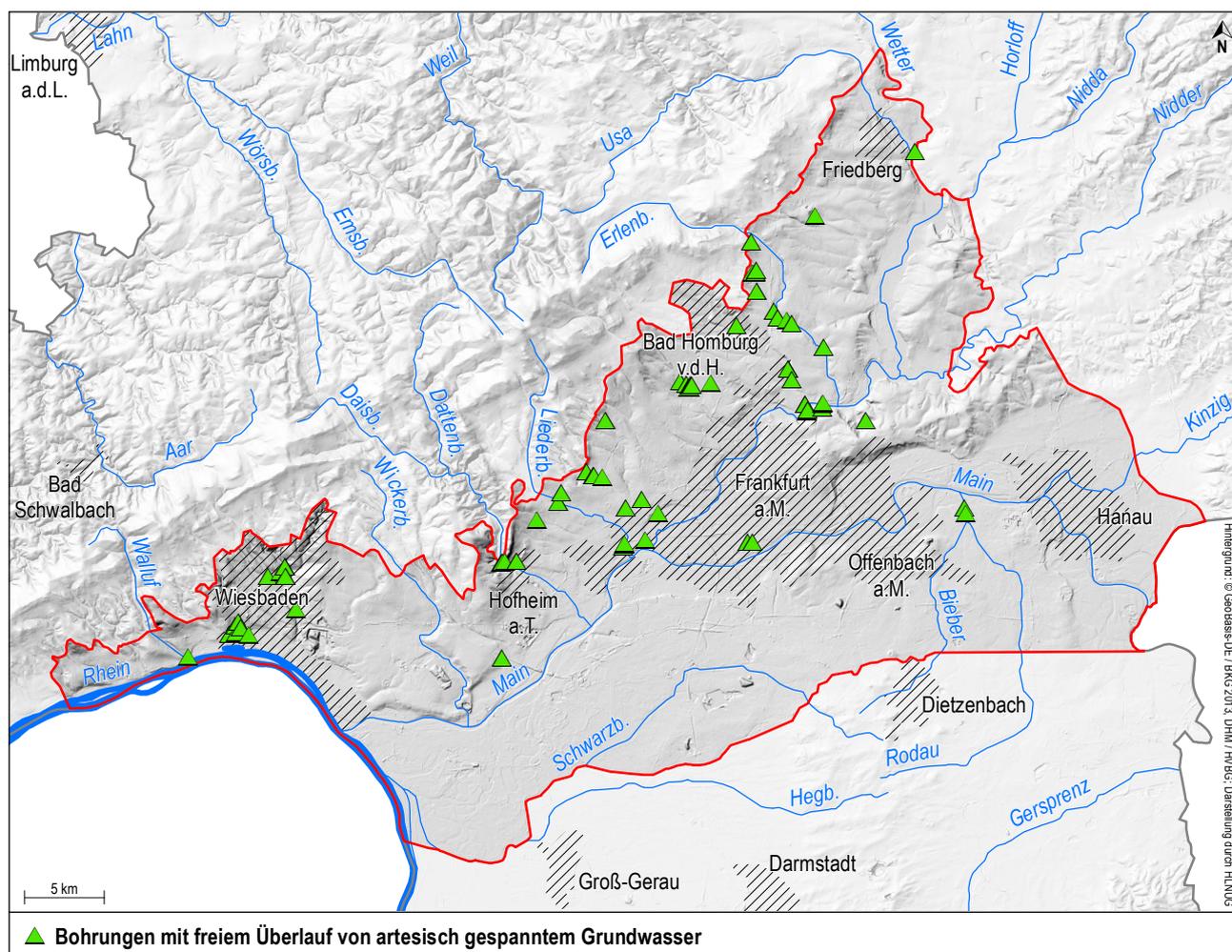


Abb. 1: Standorte von Bohrungen, bei denen ein freier Überlauf von artesisch gespanntem Grundwasser dokumentiert wurde

mung und somit Schäden verursachen und gleichzeitig das Verschließen der Bohrung erschweren. Artesisch gespannte Grundwässer stellen daher ein Risiko dar, dass bei Bohrvorhaben nicht außer Acht gelassen werden sollte.

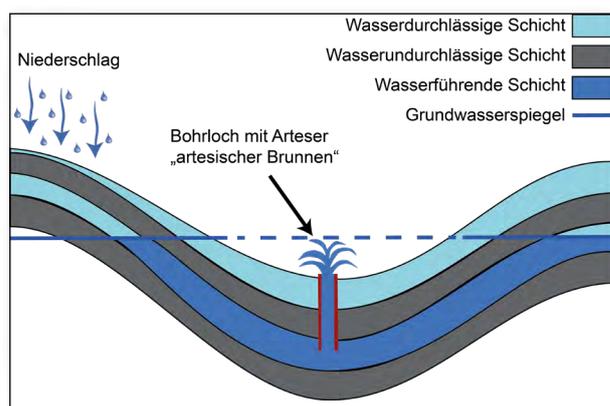
Standorte von Bohrungen in dem in dieser Broschüre betrachteten Bereich, für die ein freier Überlauf von artesisch gespanntem Grundwasser dokumentiert wurde, sind in Abb. 1 dargestellt. Wichtig ist hierbei, dass das Antreffen von artesisch gespanntem Grundwasser nicht in allen Fällen erkannt wird und auch erkannte Arteser nicht in allen Fällen dokumentiert werden. Zudem kann die Tiefenlage, in der artesisch gespanntes Grundwasser in einer Bohrung zutritt, häufig nicht aus vorliegenden Dokumentationen abgeleitet werden. Die Verteilung bekannter Arteserbohrungen ist somit zwar ein Indikator für die Wahrscheinlichkeit des Antreffens von artesisch gespanntem Grundwasser in Umfeld der jeweiligen Bohrungen. Eine sichere Aussage, dass es in Teilgebieten ohne bekannte Arteserbohrungen kein artesisch gespanntes Grundwasser gibt, ist hingegen nicht möglich.

## Datenlage

Die zur Charakterisierung eines artesisch gespannten Grundwassers wichtigen Informationen sind der Druckspiegel, also die Höhe über Gelände, bis zu der das Wasser in einem Rohr aufsteigt, sowie die für eine definierte Überlaufhöhe (Geländehöhe oder z. B. 1 m über Gelände) bestimmte Überlaufmenge. Da aus einem Bohrloch frei austretendes Grundwasser zu Problemen bis hin zu Überschwemmungen führen kann (siehe Abb. 1), wird, wenn bei einer Bohrung der artesisch gespannten Grundwasser erschlossen (erbohrt) wurde, die Bohrung in der Regel umgehend verschlossen, ohne dass eine genauere Untersuchung stattfindet.

Die im Rhein-Main-Gebiet bekannten Arteserbohrungen liegen, abgesehen von zwei Bohrungen bei Mühlheim am Main, zwischen dem (im Luftbild anhand der Bewaldung gut erkennbaren) Taunuskamm im Norden und dem Rhein bzw. Main im Süden. Südlich des Mains ist die Wahrscheinlichkeit, dass in dem hier betrachteten Gebiet (Abb. 1) artesisch gespanntes Grundwasser erschlossen wird, außerordentlich gering. Auch im Falle der Bohrungen bei Mühlheim, die unweit östlich des Bieberer Bergs niedergebracht wurden, hat die jahrzehntelange Entnahme von Grundwasser dazu geführt, dass der Druckspiegel des Wassers heute unter der Geländeoberfläche liegt, der Druck also nicht mehr artesisch ist.

Der bei einer Bohrung am Finanzministerium in Wiesbaden im Jahr 2009 erbohrte Arteser ist einer der bekanntesten Arteser-Schadensfälle Deutschlands. Hier kam es zur sogenannten Verwilderung des Artesers, d. h. das unter hohem Druck stehende Wasser trat nicht nur aus dem Bohrloch, sondern an verschiedenen Stellen in bis zu 30 m Entfernung aus dem Bohrloch aus. Erst nach einer Woche konnte der freie Austritt durch das Abdichten des Bohrlochs gestoppt werden.



**Abb. 2:** Schematische Darstellung eines artesischen Brunnens, wie er z. B. in Frankfurt, Hilgenfeld („Frankfurter Berg“, Druckspiegel ca. 5 m über Gelände) auftreten kann © HLNUG, Heinrichs

## 4 Böden und Altlasten

### 4.1 Böden

CHRISTIAN HELLER \*

#### Bodenbildung

Als Boden bezeichnet man allgemein die oberste belebte Verwitterungsschicht der Erdkruste. Jeder Boden weist charakteristische Merkmale auf, die sich im Laufe der Zeit durch das Zusammenspiel verschiedener Standortfaktoren ausbilden. Diese beinhalten das vorherrschende Klima, den geologischen Untergrund, das Relief, den Einfluss von Oberflächen- und Grundwasser und die spezifische Flora und Fauna. Durch diese natürlichen Faktoren der Bodenbildung haben sich im Laufe der Zeit unterschiedliche Bodentypen ausgebildet, die durch die menschliche Nutzung zum Teil erheblich überprägt wurden.

Die Übersichtskarte der Böden im Rhein-Main-Gebiet spiegelt diese unterschiedlichen Entwicklungen wider (vgl. <https://bodenviewer.hessen.de>).

Generell sind die Böden im Rhein-Main-Gebiet seit dem Ende der letzten Eiszeit auf deren typischen, lockeren Ablagerungen entstanden. Die während der Eiszeiten herrschenden tiefen Jahresmitteltem-

peraturen begünstigten vor allem die physikalische Gesteinsverwitterung, die zum Entstehen großer Mengen von Schutt und Feinmaterialien führte. Dort, wo sich Flussläufe ausbildeten, wie etwa im Bereich des heutigen Rheins oder Mains, entstanden je nach Fließgeschwindigkeit zum Teil großräumige und mächtige Sedimentationsterrassen aus Schotter, Sand und feinem Mineralstaub; in Bereichen mit geringerer Fließgeschwindigkeit auch feinere Hochflutsedimente wie Lehme oder Tone. Durch die fehlende Vegetation konnten diese Materialien gut vom Wind aufgenommen und großflächig verfrachtet werden. Dabei kam es zur Ablagerung von Flugsand und teils mächtigen kalkhaltigen Schichten, dem sog. Löss. Das sommerliche Auftauen der Oberböden bei gleichzeitigem Dauerfrost im Unterboden führte je nach Hangneigung zu intensiven Prozessen von Bodenfließen und zur Durchmischung von angewehtem und bereits vorher am Standort vorhandenem Gesteinsmaterial.

#### Bodenverbreitung

Nördlich des Mains, von Frankfurt bis in die Wetterau, sind überwiegend löss- und lösslehmhaltige Substrate als natürliche Ausgangsmaterialien der Bodenbildung anzutreffen. Daraus entwickelten sich vielfach Bodentypen wie Parabraunerden oder Schwarzerden, die heute aufgrund von landwirtschaftlicher Nutzung überwiegend nur noch als Relikte in der Bodenlandschaft vorzufinden sind.

Diese Böden zeichnen sich durch sehr gute Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität und eine hohe Fruchtbarkeit aus. Sie gehören damit zu den ertrag-

reichsten Standorten in Deutschland und gelten oft als besonders schützenswert. Sie sind aber auch anfällig für Verdichtung und Erosion.

Südlich des Mains sind überwiegend sandig-kiesige Lockermaterialien (Terrassensande und -kiese, Dünnensande) anzutreffen. Hier dominiert vor allem der Bodentyp Braunerde, der eine vergleichsweise geringe Wasser- und Nährstoffspeicherung aufweist. Unter Waldbedeckung können sich auch Podsol-Braunerden bilden, die durch besonders niedrige pH-Werte und Nährstoffarmut gekennzeichnet sind.

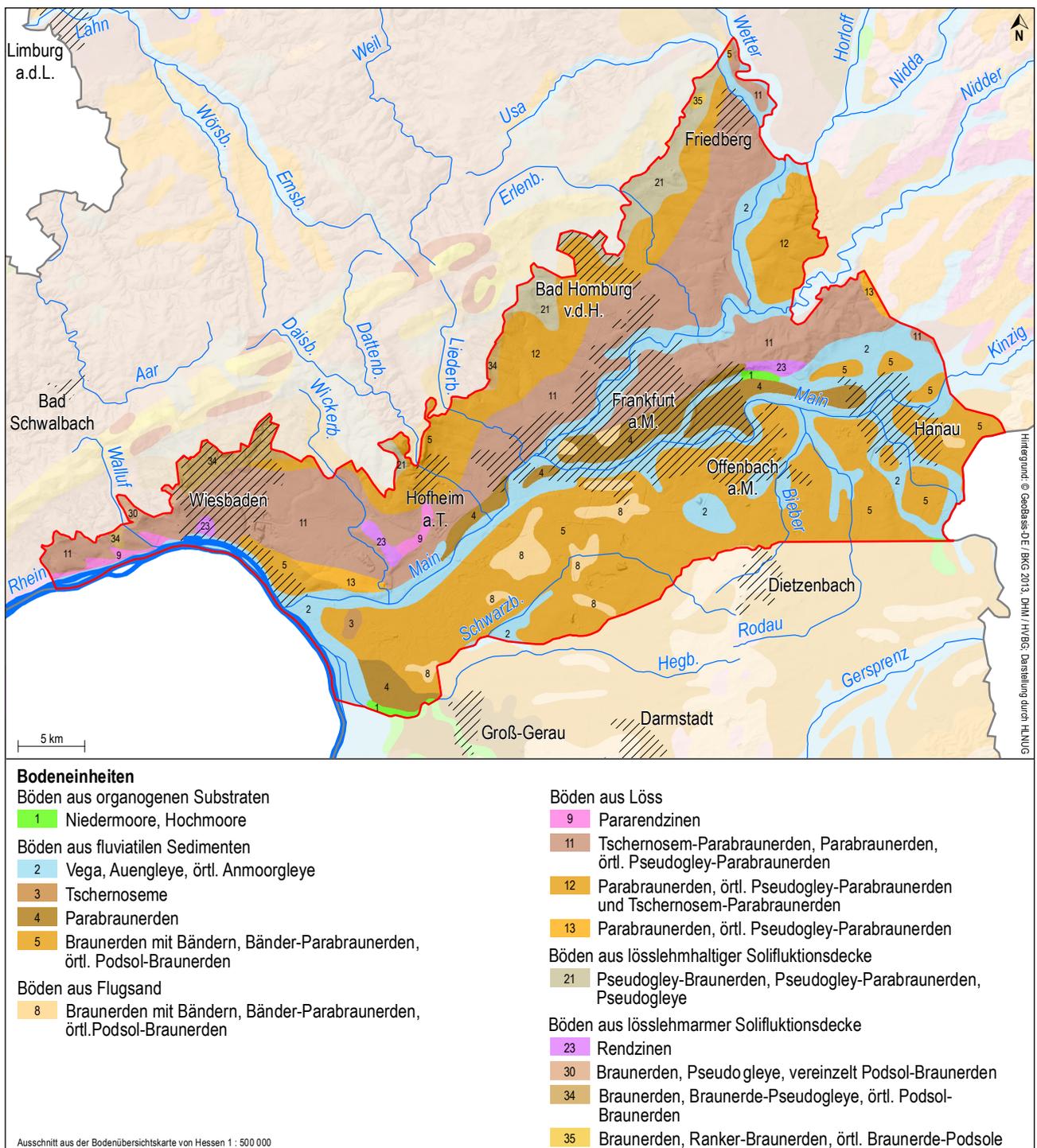


Abb. 1: Übersichtsbodenkarte des Rhein-Main-Gebiets

Braunerden aus Flugsand zeigen im Unterboden vielfach eine markante Bänderung aus tonigem Material. In den heutigen Auen, die die Flussläufe begleiten, finden sich überwiegend Böden aus Auenlehmen, die durch Hochwässer abgelagert worden sind. Ein typischer Vertreter ist der Bodentyp Vega. Daneben

findet man grundwasserbeeinflusste Böden wie Gleye oder auch Anmoorgleye. Im Bereich verlandeter Altwässer sind teilweise auch Niedermoorböden anzutreffen, die hohe Anteile an organischem Kohlenstoff speichern. Böden in Auen weisen oft Extrembedingungen auf, weshalb sie ein großes Potential für

eine Biotopentwicklung besitzen. Deshalb und aus Gründen des Klimaschutzes sind diese Böden u. U. besonders schutzwürdig.

Eine Besonderheit im südlichen Rhein-Main-Gebiet, das Teile des hessischen Rieds umfasst, stellen Böden aus carbonathaltigem Hochflutlehm dar, die einen durch aufsteigendes Grundwasser entstandenen Kalkausfällungshorizont, das sog. „Rheinweiß“ enthalten. Hier entwickelten sich Parabraunerden, teilweise auch Pelosole (Tonböden).

In städtischen Verdichtungsräumen werden die Faktoren, die zur Entstehung von Böden führen, oft sehr stark von den Menschen beeinflusst. Insbesondere Baumaßnahmen im Zuge von Flächennutzungen für Gewerbe, Industrie, Wohnen und Verkehr spielen hier eine große Rolle. Diese Nutzungen gehen meist mit Versiegelungen der Bodenoberflächen und damit einem Verlust von Bodenfunktionen einher. Aber auch die gärtnerische Nutzung von Böden, die Anlage von Grünanlagen oder die Aufgabe von Nutzungen können die Bodenbildung prägen. Aufgrund der Vielfalt der verschiedenen Nutzungseinflüsse bildet sich häufig ein kleinräumiges Mosaik aus benachbarten Böden natürlichen Ursprungs und aus Böden, die z. B. aus umgelagerten Materialien wie Bau- oder Trümmerschutt sowie Abfällen und Schlacken entstanden sind, heraus.



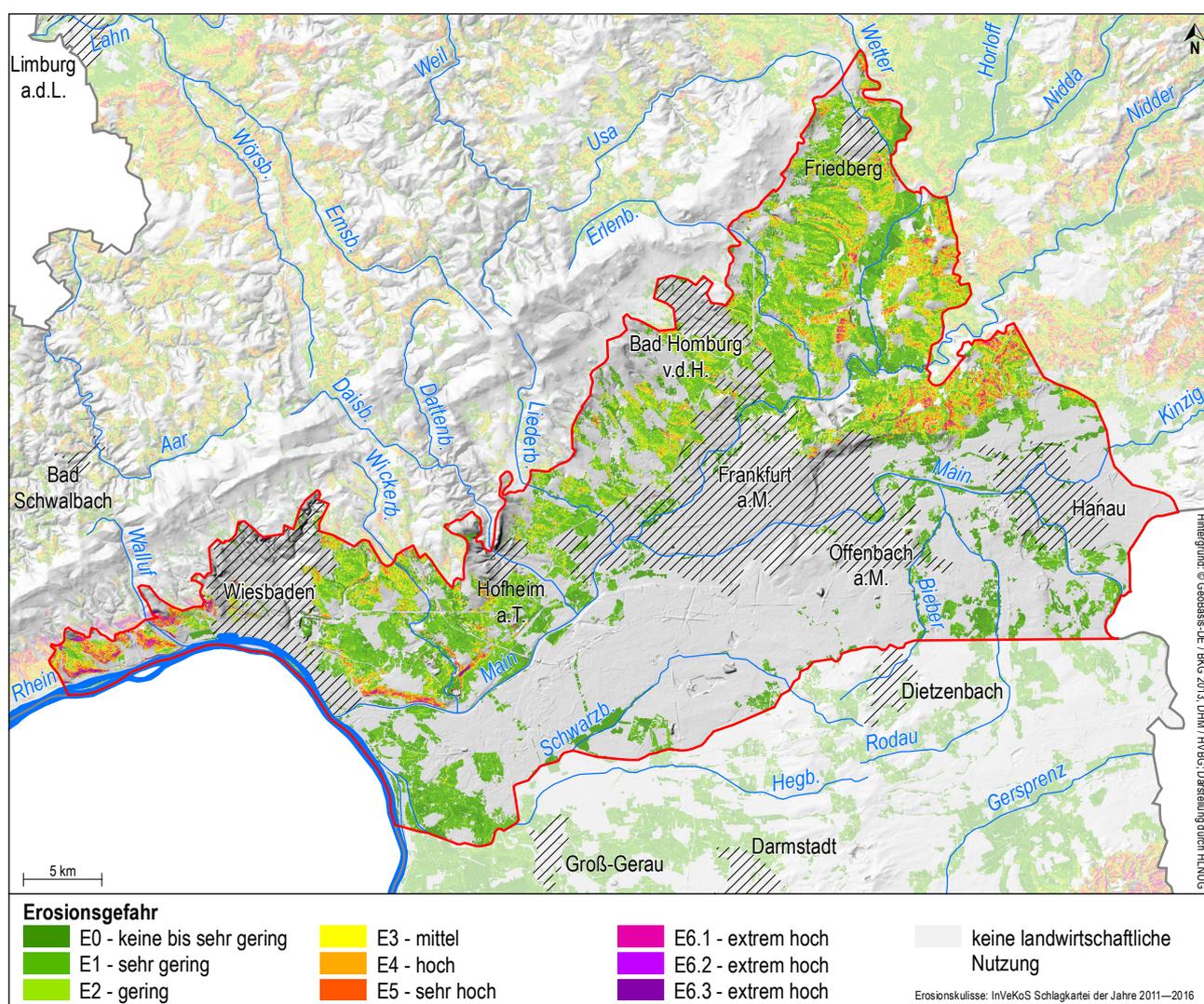
**Abb. 2:** Bodenprofil einer erodierten Parabraunerde aus Löss im Bereich Roßdorf

## 4.2 Risiken durch Bodenerosion

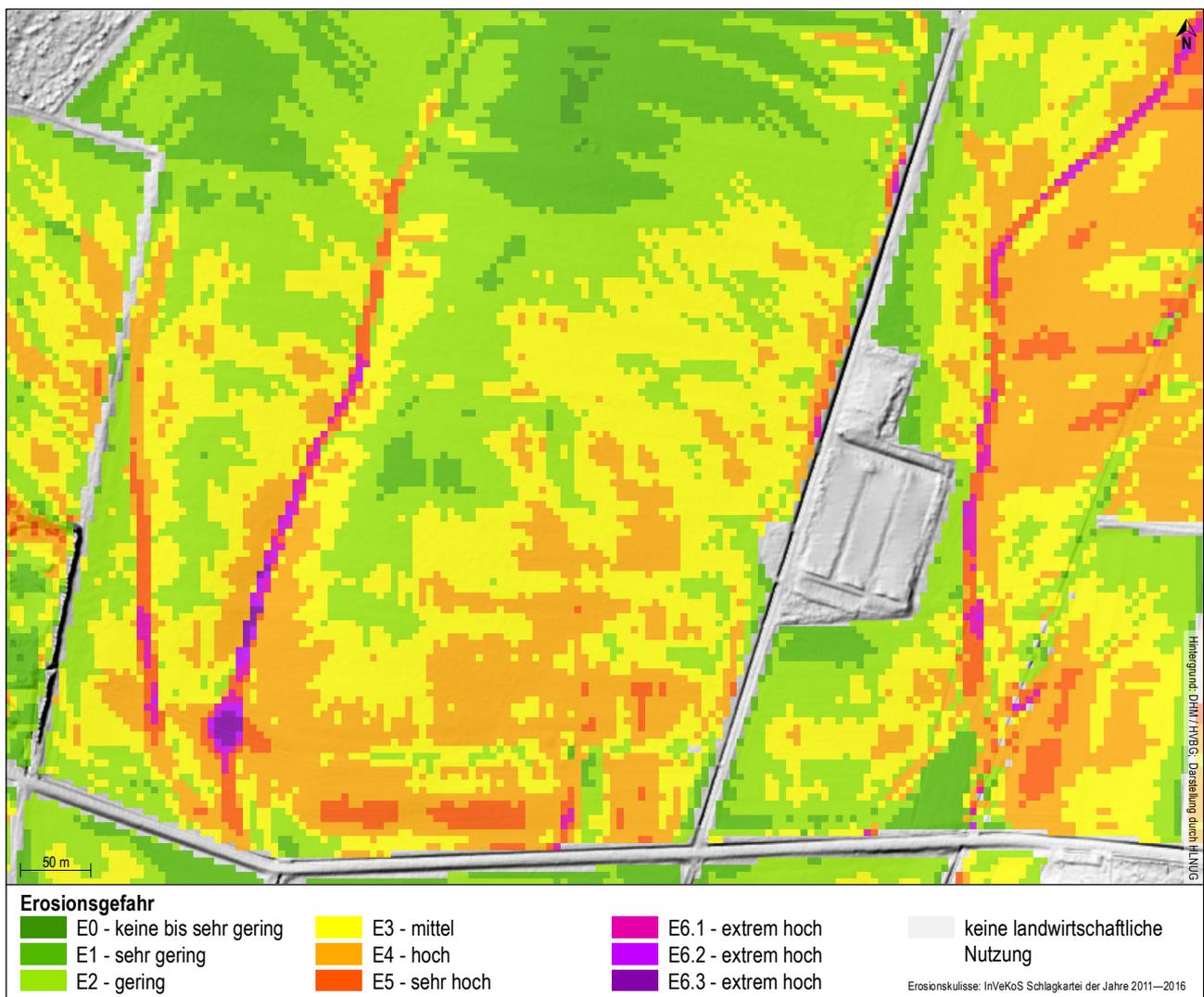
FABIAN ACHTEN \*

Bodenmaterial kann durch Wind oder Wasser verlagert werden. Dieser Prozess der Bodenverlagerung wird als Erosion bezeichnet. Die übermäßige Erosion von Böden wird durch nutzungsbedingte Eingriffe gefördert, wenn beispielsweise auf Ackerflächen schützende Vegetation fehlt. Im Rhein-Main-Gebiet und in Hessen überwiegt die Bodenerosion durch

Wasser. Bei der Wassererosion werden Bodenteile durch die Aufprallwirkung von Regentropfen aus dem Bodengefüge gelöst und anschließend durch oberflächlich abfließendes Wasser transportiert. Die Verlagerung des erodierten Bodenmaterials verläuft so weit, bis die Fließgeschwindigkeit und damit die Transportkraft des Wassers wieder abnimmt. Dies ist



**Abb. 1:** Ausschnitt aus dem Erosionsatlas von Hessen für das Rhein-Main-Gebiet. Darstellung der Erosionsgefahr von landwirtschaftlich genutzten Flächen auf Basis der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) (vgl. DIN 19708). Die Klassifikation der Erosionsgefährdung erfolgte auf Basis der modellierten Bodenabtragungsmengen (in t/ha/a), die nach DIN 19708 in sechs Gefährdungsklassen (E0 bis E6) untergliedert wurden. Zur besseren visuellen Differenzierung der höchsten Erosionsklasse (E6) fand nochmals eine erweiterte Aufteilung in drei Unterklassen (E6.1 bis E6.3) statt.



**Abb. 2:** Ausschnitt aus dem Erosionsatlas Hessen von zwei Erosionsflächen bei Karben in der Wetterau. Die Klassifikation der Erosionsgefährdung erfolgte auf Basis der mittels ABAG modellierten Bodenabtragsmengen, die nach DIN 19708 in sechs Gefährdungsklassen (E0 bis E6) untergliedert wurden. Zur besseren visuellen Differenzierung der höchsten Erosionsklasse (E6) fand nochmals eine erweiterte Aufteilung in drei Unterklassen (E6.1 bis E6.3) statt.

entweder entlang von Fließhindernissen oder an flacheren Geländedepositionen der Fall. An diesen Stellen lagert sich die Erosionsfracht daraufhin wieder ab.

Bei starken Niederschlagsereignissen können, sofern keine ausreichenden Schutzmaßnahmen gegen Erosion getroffen wurden, innerhalb eines Erosionsereignisses viele Tonnen Bodenmaterial auf einer Fläche verlagert werden. Von Bodenerosion sind vor allem landwirtschaftlich genutzte Flächen betroffen, da die Böden auf diesen Flächen je nach angebauter Kultur, Bearbeitungsform und Zeitpunkt nicht genügend durch Pflanzen/-reste bedeckt sind, um vor den ero-

siven Kräften starker Niederschläge geschützt zu sein. Besonders erosionsanfällige Anbaukulturen sind dabei Reihenkulturen wie Mais oder Zuckerrüben, da sie einen großen Reihenabstand haben und erst vergleichsweise spät ein schützendes Blattwerk entwickeln.

Die Folgen von Bodenerosion sind vielfältig und betreffen in der Regel sowohl die Bereiche an denen das Bodenmaterial abgetragen, als auch wo es abgelagert wird. Durch den Abtrag von Bodenmaterial geht beispielsweise die für die Bodenfruchtbarkeit wichtige organische Substanz, der Humus, aus den oberen Bodenschichten verloren. Zudem findet an



**Abb. 3:** Flächenhafte Bodenabträge durch Bodenerosion auf einer Ackerfläche bei Karben in der Wetterau



**Abb. 4:** Erosionsschutzstreifen aus Winterweizen auf einer Maisfläche in der Wetterau

Erosionsstandorten ein sukzessiver Rückgang der Bodenmächtigkeit statt. Die Folge ist ein Verlust der Bodenfruchtbarkeit und eine Schädigung der Bodenfunktionen. Auf der anderen Seite kann das verlagerte Bodenmaterial in angrenzende Flächen oder Gewässer eingetragen werden, wodurch in diesen Bereichen weitere Beeinträchtigungen oder Gefahrensituationen entstehen können. So können durch Nährstoffeinträge beispielsweise Eutrophierungsprozesse einsetzen, welche die Gewässerökologie negativ beeinflussen.

Neben der Bewirtschaftung und der Hangneigung auf den Ackerflächen spielen auch die Eigenschaften der Böden eine entscheidende Rolle hinsichtlich ihrer Vulnerabilität gegenüber Bodenerosion. Allen voran neigen Böden mit einem hohen Anteil an Feinsubstanz am ehesten zur Erosion, da diese schnell verschlämmen und das Bodenmaterial leichter transportiert werden kann. Das betrifft besonders die sehr fruchtbaren und aus diesem Grund häufig ackerbaulich genutzten Böden aus Löss.

Im Rhein-Main-Gebiet sind diese Böden entlang des Main-Taunus-Vorlandes und der Wetterau verbreitet. Da das Gebiet des Main-Taunus-Vorlandes jedoch wenig reliefiert ist, sind nur vereinzelte Flächen stärker erosionsgefährdet. Mit flächenübergreifend hoher Erosionsgefahr sind allerdings die stärker geneigten und für den Weinanbau genutzten Flächen des Main-gaus nahe Hochheim und Flörsheim sowie des Rheingaus westlich von Wiesbaden herauszustellen. Viele Flächen mit hoher bis sehr hoher Erosionsgefährdung liegen darüber hinaus in der Wetterau, beispielsweise im Gebiet rund um Karben sowie Bad Vilbel. Dies resultiert aus den dort verbreiteten Lössböden in Zusammenhang mit ausgeprägten Hanglängen und -neigungen. Eine Übersicht über die Erosionsgefährdung von landwirtschaftlich genutzten Flächen ist durch den Erosionsatlas von Hessen gegeben. Ein Ausschnitt aus dem Erosionsatlas für das Rhein-Main-Gebiet ist in Abbildung 1 dargestellt.

## Literatur

DIN 19708:2017-08 (2017): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Deutsches Institut für Normung e.V.; Berlin.

Da sich die Siedlungsbereiche im Rhein-Main-Gebiet häufig in die umliegenden landwirtschaftlich genutzten Gebiete ausdehnen, kann es am Übergang von Siedlungs- zu Ackerflächen bei Erosionsereignissen zum Eintrag von erodiertem Bodenmaterial in Bereiche mit bebauter Infrastruktur wie Straßen, Wohn- oder Gewerbegebieten kommen, woraus mitunter auch erhebliche Sachschäden entstehen können.

Zu einem schweren Erosionsfall kam es im August 2020 in der Nähe von Karben in der Wetterau. Bei diesem Erosionsereignis wurden große Mengen Bodenmaterial von 0,7 Hektar entlang einer circa 500 m langen Abflussbahn flächenhaft abgetragen (vgl. Abb. 2, 3). Dabei wurden insgesamt etwa 100 Tonnen Bodenmaterial verlagert. Die Auswirkungen dieses Erosionsfalls begrenzten sich zwar auf die Ackerfläche selber, jedoch könnte es unter Umständen auch zu Übertritten der Erosionsfracht kommen, wodurch Schäden abseits der Erosionsfläche entstehen können.

Sollten sich durch den erhöhten Siedlungsdruck die Ortschaften weiter in intensiv landwirtschaftlich genutzte Gebiete ausdehnen, steigt das Risiko für Schadensfälle durch Bodenerosion. Bei Planungen im Grenzgebiet von Siedlungen und Ackerflächen sollte daher stets auch die Gefahrenaspekte von wild abfließendem Wasser und Bodenerosion berücksichtigt werden.

Am effektivsten lassen sich Schäden durch Bodenerosion allerdings vermeiden, indem die Erosionsgefahr auf den Erosionsflächen selbst reduziert wird. Dies kann durch eine standortangepasste Bewirtschaftung und durch die Implementierung wirksamer Schutzmaßnahmen realisiert werden. Beispiele für solche Schutzmaßnahmen sind unter anderem begrünte Schutzstreifen innerhalb von Ackerflächen, die den oberflächlichen Abfluss verringern und erodiertes Bodenmaterial auffangen können (vgl. Abb. 4).

## 4.3 Folgen der Flächeninanspruchnahme und Bodenversiegelung

CHRISTIAN HELLER \*

Böden sind die Lebensgrundlage des Menschen und bieten uns zahlreiche wichtige Funktionen, ohne die wir nicht existieren könnten. Zu den natürlichen Bodenfunktionen zählt insbesondere die Funktion als Lebensraum für Pflanzen und Tiere und die damit verbundene Funktion als Produktionsstandort u. a. für unsere Lebensmittel. Unversiegelte Böden lassen Niederschlagswasser versickern und füllen damit unsere Grundwasserspeicher auf. Daneben schützen Böden das Grundwasser durch ihre Filter- und Puffereigenschaften vor dem Eintrag von Schadstoffen.

Zudem beeinflussen Böden wesentlich die Temperaturentwicklung in der unteren Atmosphäre durch ihre Fähigkeit, Wasser zu speichern und zu verdunsten. Besonders die Kühlleistung unversiegelter Böden spielt in der heißen Jahreszeit in städtischen Räumen wie dem Rhein-Main-Gebiet eine zunehmend wichtige Rolle. Neben dem Versiegelungsgrad eines Gebietes ist die Wasserspeicherkapazität der nicht versiegelten Bodenfläche ein wesentlicher Faktor für das Stadtklima. Die Kühlfunktion des Bodens sollte bei der Anpassung an den Klimawandel von Planerinnen und Planern nicht nur in städtischen Gebieten berücksichtigt werden.

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Böden ist, dass sie bei Starkregen den Oberflächenabfluss abbremsen und so Überschwemmungen und Hochwässer abmildern. Auch im globalen Kontext des Klimawandels nehmen unsere Böden eine bedeutende Stellung ein, da sie CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre in Form von Humus speichern können und dies bei unsachgemäßer Nutzung auch wieder freisetzen.

Die Ausweitung von Siedlungs- und Verkehrsflächen führt zwangsläufig zu einer Versiegelung und Verdichtung von Böden. Dadurch werden die o. g. natürlichen Funktionen stark eingeschränkt oder gehen sogar völlig verloren.

Aufgrund der fruchtbaren Böden waren große Teile des heutigen Rhein-Main-Gebietes bereits während des Neolithikums vergleichsweise dicht besiedelt. Durch seine starke und anhaltende Wirtschaftskraft ist es auch gegenwärtig einer der am schnellsten wachsenden Ballungsräume in Deutschland. Alleine die Bevölkerung Frankfurts verzeichnet gegenwärtig eine Netto-Zunahme von etwa 15 000 Menschen pro Jahr. Die Siedlungsfläche im Rhein-Main-Gebiet nahm seit 1925 um mehr als das Dreifache zu (Abb. 1). Anfangs lagen einzelne Städte im ländlich geprägten Raum.

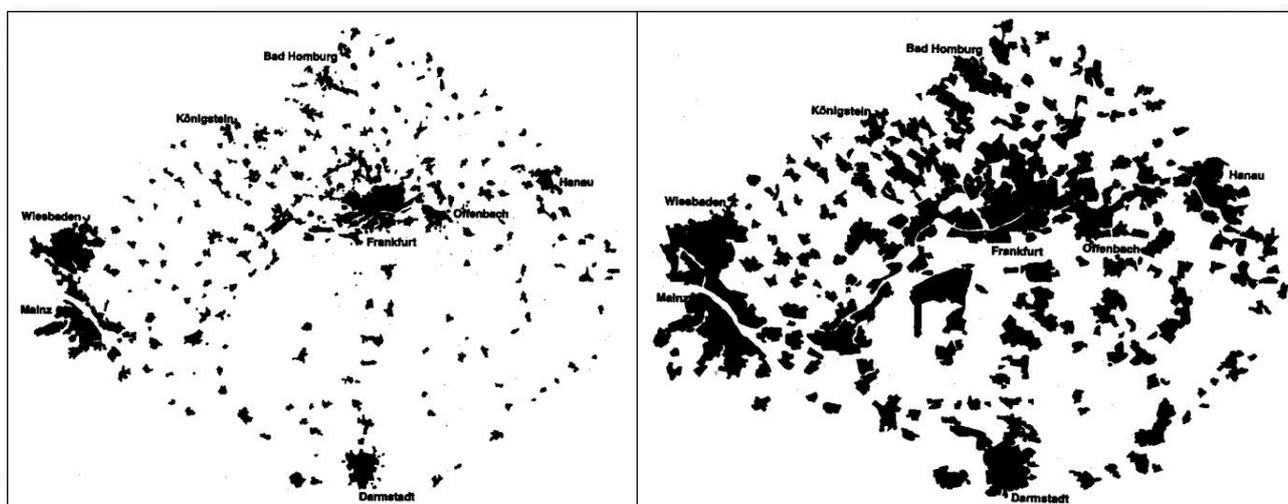


Abb. 1: Zunahme der Siedlungsflächen im Rhein-Main-Gebiet im Zeitraum 1925–1990 (Abbildung mit freundlicher Genehmigung durch Herrn Prof. Wolfgang Christ)

Dieses Bild hat sich mittlerweile ins Gegenteil verkehrt, so dass die verbliebenen Freiflächen heute nur noch als kleine Teilgebiete inmitten von Siedlungen und Verkehrswegen erscheinen.

Eindrucksvoll ist auch der Vergleich historischer Luftbilder mit Aufnahmen aus der Gegenwart, hier am Beispiel eines Ausschnitts im Bereich Kelsterbach (Abb. 2). Der Großteil der ehemals vorhandenen Acker- und Grünlandflächen wurde durch Siedlungen und Verkehrswege überbaut und steht heute nicht mehr zur landwirtschaftlichen Nutzung und u. a. zur Produktion von Nahrungsmitteln zur Verfügung.

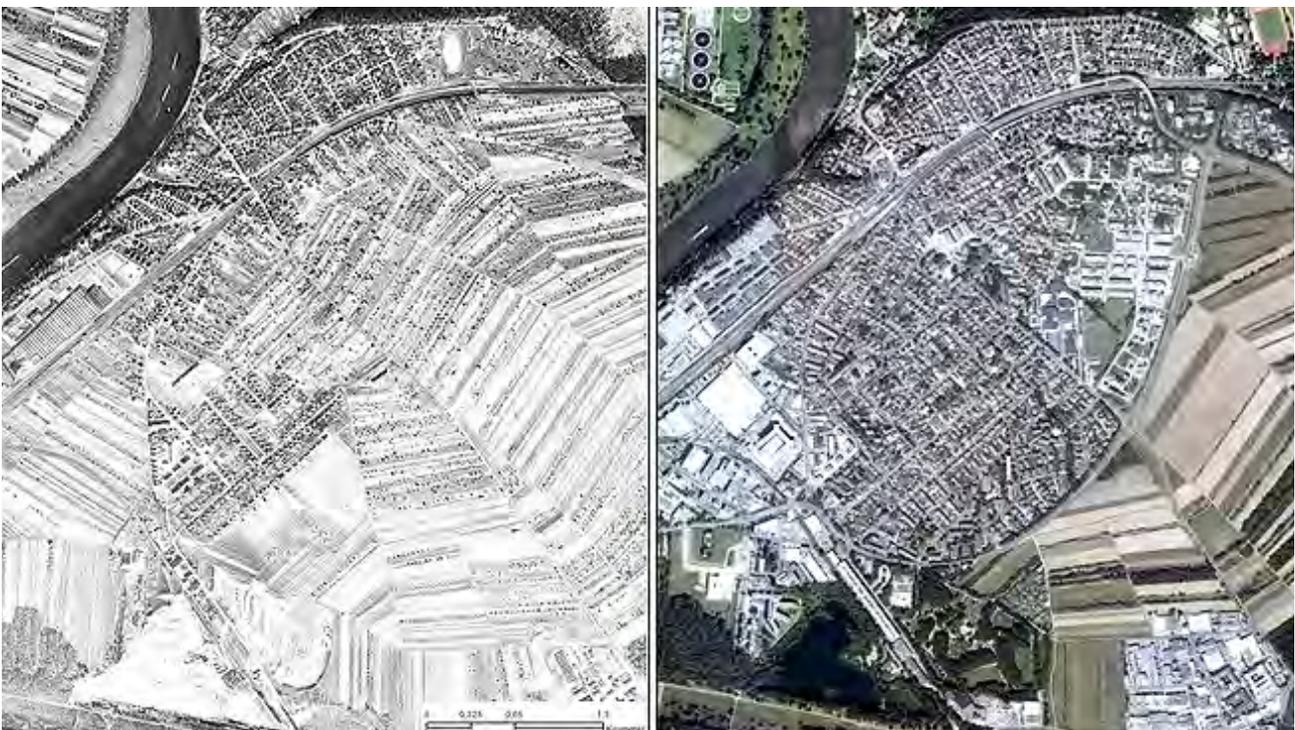
Schon heute ist Hessen auf den Import von Lebensmitteln angewiesen, da es seinen eigenen Bedarf nicht mehr alleine decken kann. Die Konkurrenzsituation zwischen Siedlungsdruck und landwirtschaftlicher Nutzung wird sich aufgrund steigender Bodenpreise gerade im Ballungsraum Rhein-Main noch weiter verschärfen.

Dies stellt insbesondere die Landes- und Städteplanung vor extreme Herausforderungen, da einerseits versucht werden muss, dem immer größer wer-

enden Flächenbedarf für Wohnungsbau, Gewerbe und Industrie gerecht zu werden, andererseits aber unsere natürliche Lebensgrundlage Boden geschützt werden muss.

Ein Instrument um diesen unterschiedlichen Ansprüchen gerecht zu werden, ist die Erarbeitung und Umsetzung kommunaler Bodenschutzkonzepte. Dabei werden vorhandene Böden hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und Schutzbedürftigkeit bewertet und Bewertungsergebnisse in zukünftige Planungen einbezogen. Indem Baumaßnahmen auf vergleichsweise weniger wertige Böden gelenkt und Innenverdichtung mit Flächenrecycling verstärkt vorangebracht wird, statt „auf der grünen Wiese“ zu bauen, kann es gelingen, den Flächenverbrauch zu reduzieren und wertvollere Böden zu schützen.

Wo sich Bautätigkeiten und Flächenverbrauch nicht vermeiden lassen, sollten Eingriffe in unsere Böden kompensiert werden. Dabei kann der Verlust von Bodenfunktionen durch Maßnahmen wie Entsiegelung, Schaffung von Erosionsschutzmaßnahmen, Bodenlockerungen oder auch durch eine bodenkundliche Baubegleitung ausgeglichen oder gemindert werden.



**Abb. 2:** Verlust landwirtschaftlich genutzter Flächen durch Bebauung mit Siedlungen und Verkehrswegen im Bereich Kelsterbach, linkes Bild: Aufnahmedatum ca. 1960, rechts: aktuelles Luftbild © Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation

## 4.4 Altlasten und Schadstoffe in Böden

**MATTHIAS ADAM \***

Das Ballungsgebiet Rhein-Main ist durch seine bevorzugte verkehrstechnische Lage schon immer Schwerpunkt einer industriellen Entwicklung gewesen. Eng verbunden mit dieser Entwicklung ist die Anreicherung von Schadstoffen, wie z. B. Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe jeglicher Art und chlorierte Lösungsmittel, in Boden und Grundwasser zu sehen. Die Ursache hierfür findet sich einerseits in einem unsachgemäßen Umgang mit diesen Stoffen z. B. durch produzierendes Gewerbe oder Dienstleistungsbetriebe, andererseits in der unsachgemäßen Behandlung oder Ablagerung von entsprechend belasteten Abfällen. Die Entstehungsgeschichte mancher Untergrundverunreinigungen kann bis in die Anfänge der Industrialisierung zurückreichen. Betroffen sind Standorte von ehemaligen Industriebetrieben (**Altstandorte**), stillgelegte Müll- und Betriebsdeponien und sonstige Abfallablagerungen (**Altablagerungen**) sowie **schädliche Bodenveränderungen**, die beispielsweise durch Unfälle mit umweltgefährdenden Stoffen hervorgerufen wurden.

Auch heute werden wie schon in der Vergangenheit bei dem Insektizid DDT, dem Mineral Asbest und neuerdings bei per- und polyfluorierten Chemikalien (PFC) immer wieder neue Stoffe in die Umwelt eingetragen, deren negative Auswirkungen auf verschiedene Umweltmedien erst verzögert festgestellt werden.

Von solchen sogenannten altlastverdächtigen Flächen oder Altlasten können beispielsweise durch den Kontakt mit Schadstoffen Gefahren für Menschen ausgehen. Unter dem Aspekt der Sicherheit, der Gesundheitsvorsorge und des Umweltschutzes müssen bei Bauvorhaben auf solchen Flächen die erforderlichen Vorkehrungen getroffen werden. Deshalb gibt es beim Bauen auf (potentiell) schadstoffbelasteten Standorten einige Besonderheiten zu beachten. Sofern diese bei der Planung berücksichtigt werden, lassen sich unerwartete Kosten und Terminverzögerungen verhindern.

Gibt es Hinweise auf relevante Schadstoffanreicherungen, werden in Abhängigkeit von Schadstoffausbreitung und Gefährdung umfangreiche

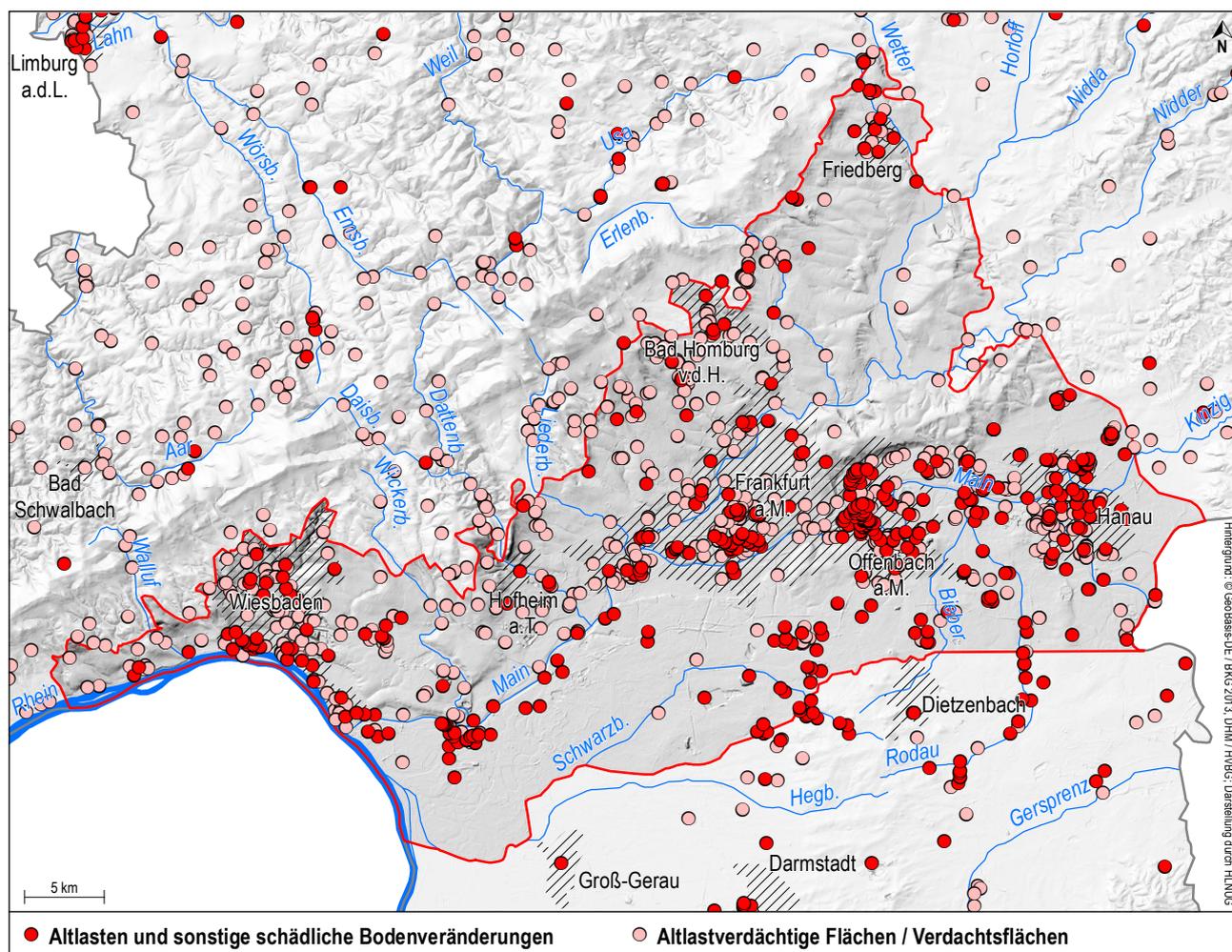
Untersuchungen der betroffenen Umweltmedien Boden, Bodenluft und Grundwasser durchgeführt. Eine entsprechende Beurteilung erfolgt standort- und schutzgutbezogen mithilfe der nach Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) definierten und in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) aufgeführten Maßnahmen-, Prüf- und Vorsorgewerte. Eine geeignete Sanierungsmaßnahme zur Gefahrenabwehr wird schließlich unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit (Prüfung, ob der beabsichtigte Nutzen für die Umwelt gerechtfertigt ist) bestimmt. Sofern die Standortgegebenheiten keine Beseitigung der Schadstoffe z. B. durch einen Bodenaushub zulassen, kommen Schutz-, Beschränkungs- oder Sicherungsmaßnahmen zum Einsatz. Das Ziel ist dabei eine weitere Schadstoffausbreitung einzuschränken, zu verhindern oder die Verfügbarkeit von Schadstoffen (z. B. Pflanzenverfügbarkeit von Schwermetallen durch pH-Wert Einstellung) zu verringern.

In Hessen werden Altstandorte, Altablagerungen und schädliche Bodenveränderungen seit über 30 Jahren behördlich in einem zentralen Informationssystem (Altflächendatei) erfasst. Die regionale Verteilung dieser Flächen wird in der folgenden geografischen Übersicht deutlich.

Von 1990 bis 2013 wurden in Hessen mit öffentlichen Mitteln insgesamt 4 000 t Schadstoffe aus dem Boden entfernt und 5 Mio. m<sup>3</sup> belastetes Grundwasser gereinigt, ein Großteil davon im Ballungsgebiet Rhein-Main.

Bedeutende Schadensfälle im Rhein-Main-Gebiet können insbesondere der chemischen Industrie, Raffinerien, Chemische Reinigungen und Betrieben der Metallverarbeitung zugeschrieben werden. Altlastentypische Schadstoffe sind hier Mineralöle, chlorierte Lösungsmittel (Lösemittel), Teeröle und Schwermetalle.

Im Folgenden werden einige charakteristische Fälle kurz vorgestellt.



**Abb. 1:** Geografische Übersicht über Altlasten/sonstige schädliche Bodenveränderungen und Verdachtsflächen – Ausschnitt Rhein-Main-Gebiet (Quelle: Zahlen und Fakten; HLNUG 2020)

**Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)** sind seit vielen Jahrzehnten in der Mineralölverarbeitung und -lagerung sowie in der chemischen Industrie und Metallverarbeitung im Einsatz. MKW-Schadensfälle treten u. a. häufig an Tankstellen, Raffinerien, Werkstätten, Schrottplätzen, Speditionen, Bahnhöfen und vergleichbaren Standorten, an denen insbesondere mit Energieträgern wie Heizöl, Benzin, Diesel oder Kerosin umgegangen wurde, auf. Da Mineralöle unter günstigen Umständen gut biologisch abbaubar sind, kommt es bei kleineren Mineralölschäden zu vergleichsweise kleinräumigen Grundwasserverunreinigungen (Schadstofffahnen oftmals kleiner 100 m).

Bei einer ehemaligen Raffinerie in Raunheim traten in den 70er und 80er Jahren durch Rohrleitungs-

leckagen mehrere Tonnen eines Mineralölproduktes aus, die seit 1991 saniert werden. Trotz umfangreicher Sanierungsmaßnahmen, u. a. zur Stimulation der biologischen Abbauprozesse, erreichte die Schadstofffahne im Grundwasser eine Länge von ca. 1 km. Eine Gefährdung des nahegelegenen Mains konnte durch die Sanierungsmaßnahmen jedoch abgewendet werden.

**Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW)** wurden vor allem zur Entfettung in der Metallverarbeitung, in chemischen Reinigungen sowie zur Herstellung von Kältemitteln und PVC genutzt. Bedingt durch die hohe Mobilität und geringe biologische Abbaubarkeit können LCKW-Schäden lange Schadstofffahnen im Grundwasser größer 1 000 m ausbilden. Im Siedlungsbereich sind LCKW-

Verunreinigungen im Boden von besonderer Bedeutung, da LCKW über die Bodenluft in die Raumluft von Gebäuden gelangen können.

In Frankfurt-Heddernheim wurden bei einem ehemaligen Metallwerk große Mengen LCKW freigesetzt. Nach Schließung des Werkes im Jahr 1982 wurde durch eine vorlaufende Sanierung des Bodens gewährleistet, dass die Nachfolgenutzung durch Wohn- und Bürobauten nicht durch eine Migration von LCKW in die Gebäude gefährdet wird. Bis heute erfolgt ergänzend die Sanierung des Grundwassers, auch zum Schutz der nahegelegenen Nidda.

**Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)** entstehen durch unvollständige Verbrennung von organischem Material. Typische Standorte für PAK-Belastungen sind z. B. Gaswerke, Kokereien, Teeröllager und Imprägnierwerke. Zu unterscheiden ist zwischen mobilen und wenig mobilen PAK. Während Letztere i. d. R. nur kurze Fahnen im Grundwasser bilden, können bei mobilen PAK wie Naphthalin und Acenaphthen lange Schadstofffahnen auftreten. In Hanau-Großostheim versickerten bei einem ehemaligen Imprägnierwerk in den 1940er Jahren mehrere Tonnen Teeröl. Als Sanierungsmaßnahmen werden seit dem Jahr 2008 eine Teerölabschöpfung und eine Zugabe von Sauerstoff zur Stimulation des biologischen Abbaus betrieben. In der 1 km langen Schadstofffahne dominiert Acenaphthen, da es einerseits sehr mobil, andererseits nur bedingt biologisch abbaubar ist.

Der Eintrag von **Schwer- und Halbmetallen** wie Chrom und Arsen in den Untergrund wird häufig von der metallerzeugenden oder verarbeitenden Industrie, der Galvanisierung und entsprechenden Ablagerungen von z. B. Schlacken und Schlämmen hervorgerufen. Auch bei der chemischen Industrie, der Farben- und Lackherstellung und durch den Betrieb von Gerbereien, Schieß- und Schrottplätzen werden Schwer- und Halbmetalle freigesetzt. Schwermetalle sind verhältnismäßig schwer mobilisierbar. Ihre Löslichkeit ist je nach Element abhängig vom pH-Wert und den Redoxverhältnissen im Grund- und Sickerwasser. Im stark sauren Bereich können viele Schwermetalle gelöst werden. In Wiesbaden-Biebrich wurden vor ca. 100 Jahren Farben hergestellt, für die arsenhaltige Mineralien benötigt wurden. Hierdurch kam es zu massiven Boden- und Grundwasserverun-

reinigungen. Die Hauptmenge des Halbmetalls Arsen wurde mittlerweile durch Ausbaggern entfernt. Die Arsenfahne im Grundwasser erreicht trotzdem den Rhein.

**Per- und polyfluorierte Chemikalien (PFC)** werden vielfältig eingesetzt (Imprägniersprays, Stoffbezüge, fettabweisende Papiere, Latexfarben usw.), denn sie sind schmutz- und nässeabweisend. Allerdings sind PFC sehr schwer abbaubar und reichern sich in der Umwelt sowie im Menschen an. PFC sind auch in Feuerlöschschäumen enthalten, die z. B. auf Flughäfen zur Löschung von Kerosinbränden verwendet werden. Auch im Bereich des Frankfurter Flughafens (ehem. Airbase) treten daher PFC im Boden und Grundwasser auf. Entsprechende Sanierungsmaßnahmen werden für das Grundwasser („pump & treat“) und den Boden („Ausbaggern“) aktuell durchgeführt.

**Arzneimittel, Mikroplastik, Dioxine, Sprengstoffe** etc. stellen eine Vielzahl weiterer Schadstoffe dar, die abhängig von Einsatz, Nutzung und Branche in den Boden und das Grundwasser eingetragen werden können.

Böden können neben den o. g. meist punktuellen/kleinflächigen Belastungen auch **großflächig erhöhte Schadstoffgehalte** aufweisen. Die Ursachen können naturbedingt bzw. geogen sein, also aus dem Ausgangsgestein stammen oder durch industrie-, verkehrs- und siedlungsbedingte Emissionen verursacht werden. Auch bei langjähriger landwirtschaftlicher Nutzung von Flächen können sich durch das Auf- und Einbringen von Düngemitteln, Komposten und Klärschlämmen sowie durch den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, insbesondere bei unsachgemäßem Einsatz, häufig Schadstoffe in den Böden anreichern. Geogen erhöhte (Schwer-)metallgehalte können randlich des Rhein-Main-Gebietes in Verbindung mit den vulkanogenen Substraten aus basaltischen Gesteinen im Umfeld des Vogelsberges auftreten. Substratspezifische Hintergrundwerte können im Bodenviewer von Hessen (<https://bodenviewer.hessen.de>) abgerufen werden (s. auch Hintergrundwerte von Spurenstoffen in hessischen Böden, HLU 2011). Liegen großflächig erhöhte Schadstoffgehalte vor, können sich für Betroffene wie z. B. Grundstückseigentümer, Landwirte oder Verantwortliche für Baumaßnahmen entsprechende Pflichten ergeben.



**Abb. 2:** Tankaushub und Bodensanierung © HIM-ASG



**Abb. 3:** Bodensanierung mittels Großlochbohrungen © HIM-ASG



Abb. 4: Müllablagerungen © HIM-ASG

Auch ist eine Berücksichtigung der erhöhten Werte bei sensiblen Nutzungen (Wohngebiete, Kinderspielflächen, etc.), die Untersuchung von Erntegut und Vermeidung des Inverkehrbringens von kontaminierten Lebensmitteln/Futtermitteln sowie die Berücksichtigung möglicher Bodenbelastungen bei der Verlagerung und Entsorgung von Bodenmaterial im Zuge von Baumaßnahmen ggf. erforderlich.

Neben den stofflichen Auswirkungen, der in den Boden und das Grundwasser eingetragenen Schadstoffe, müssen auch **Stand sicherheitsfragen und Deponiegasaustritte**, insbesondere von Altdeponien oder überbauten Ablagerungsflächen, beurteilt werden. Die meisten Ortschaften betrieben bis in die 1970er Jahre ortsnahe Müllkippen, z. B. in ehemaligen Senken, Gruben und Steinbrüchen, in die jeglicher Müll unkontrolliert abgekippt wurde. Diese finden sich häufig in ehemaligen Ortsrandlagen, die heute z. T. bebaut sind. Nicht selten treten auf diesen bebauten Ablagerungen Geländesetzungen auf, die eine Gefahr für die Bausubstanz darstellen und aufwendige Baugrundverstärkung oder sogar einen dauerhaften Überwachungsbedarf nach sich ziehen. Hervorgehoben werden diese Geländesetzungen durch eine mangelhafte Verdichtung der eingebauten Abfälle und häufig durch die mikrobiologische Zersetzung

des im Abfall enthaltenen organischen Materials. Hierbei entstehen Deponiegase, die aus dem Ablagerungskörper in Wohnhäuser migrieren können und je nach Zusammensetzung und Methangehalt eine reale Brand- und Explosionsgefahr darstellen. Eine Fassung von belastetem Sickerwasser und der Einbau von Sohlabdichtungen fehlten häufig, so dass auch heute noch Altdeponien bestehen, die weiterhin überwachungsbedürftig sind.

Auf dem Gelände der heutigen Deponie Dyckerhoffbruch in Wiesbaden wurde von 1900 bis 2006 Kalkstein zur Zementherstellung abgebaut. Seit den 1960er Jahren werden auf der Deponie Abfälle verfüllt. Zur Überwachung des ordnungsgemäßen Betriebes der Deponie sind umfangreiche Mess- und Kontrolleinrichtungen erforderlich. Überwacht werden z. B. Emissionen, Sickerwasser, Setzung und Verformung der Deponiekörper und der Dichtungssysteme sowie Grundwasser und Deponiegase.

Weitere Informationen zum Thema Altlasten und Schadstoffe im Boden können unter <https://www.hlnug.de/themen/altlasten> sowie unter <https://www.hlnug.de/themen/boden/gefaehrung/stoffeintraege> recherchiert werden.

## 5 Rohstoffe und Abbaustellen

WOLFGANG LIEDMANN \*

Mineralische Rohstoffe sind für das bevölkerungsreiche Rhein-Main-Gebiet von ganz erheblicher Bedeutung. Nach aktuellen Prognosen des IWU (Institut für Wohnen und Umwelt 2020) wird für die nächsten Jahrzehnte mit einem weiteren starken Wachstum der Bevölkerungszahl und damit mit einer starken Zunahme der Bautätigkeit für Gebäude und Infrastruktur zu rechnen sein.

Wie die Abbildung 1 zeigt, werden innerhalb der behandelten Region – abgesehen von einer kleinen Tongrube für Ziegeleiten westlich Hainburg – nur quartärzeitliche Sande und Kiese als Rohstoffe abgebaut.

Die Schwerpunkte für Sand- und Kiesabbau liegen südlich des Mains, nordwestlich Langen am Langener Waldsee (Abb. 2) und nordöstlich Raunheim. Große

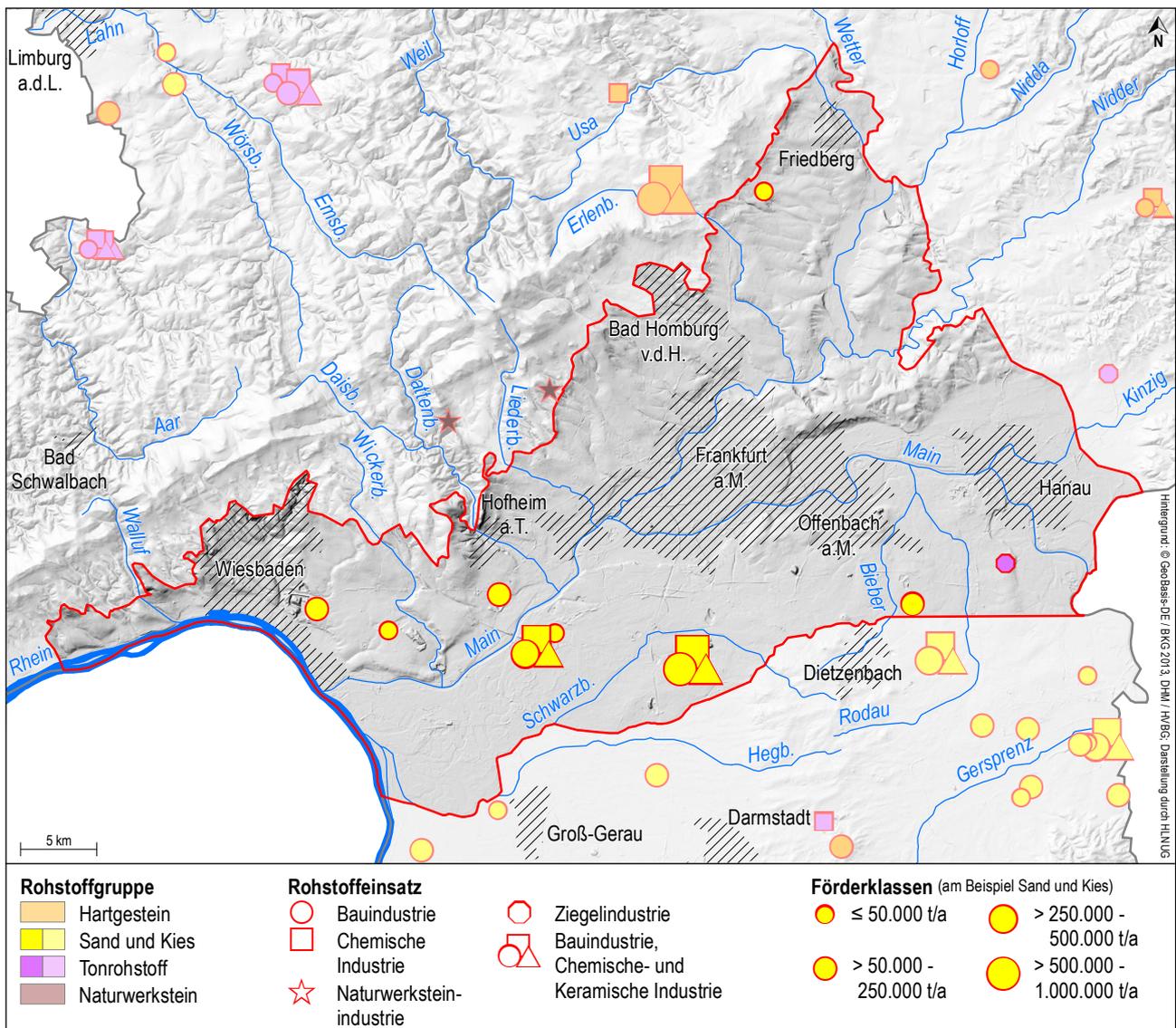


Abb. 1: Abbaustellen von mineralischen Rohstoffen innerhalb und außerhalb der Region Rhein-Main-Nord



**Abb. 2:** Langener Waldsee: Abbau, Renaturierung und Freizeitnutzung



**Abb. 3:** Weilbacher Kiesgruben: aktiv und renaturiert

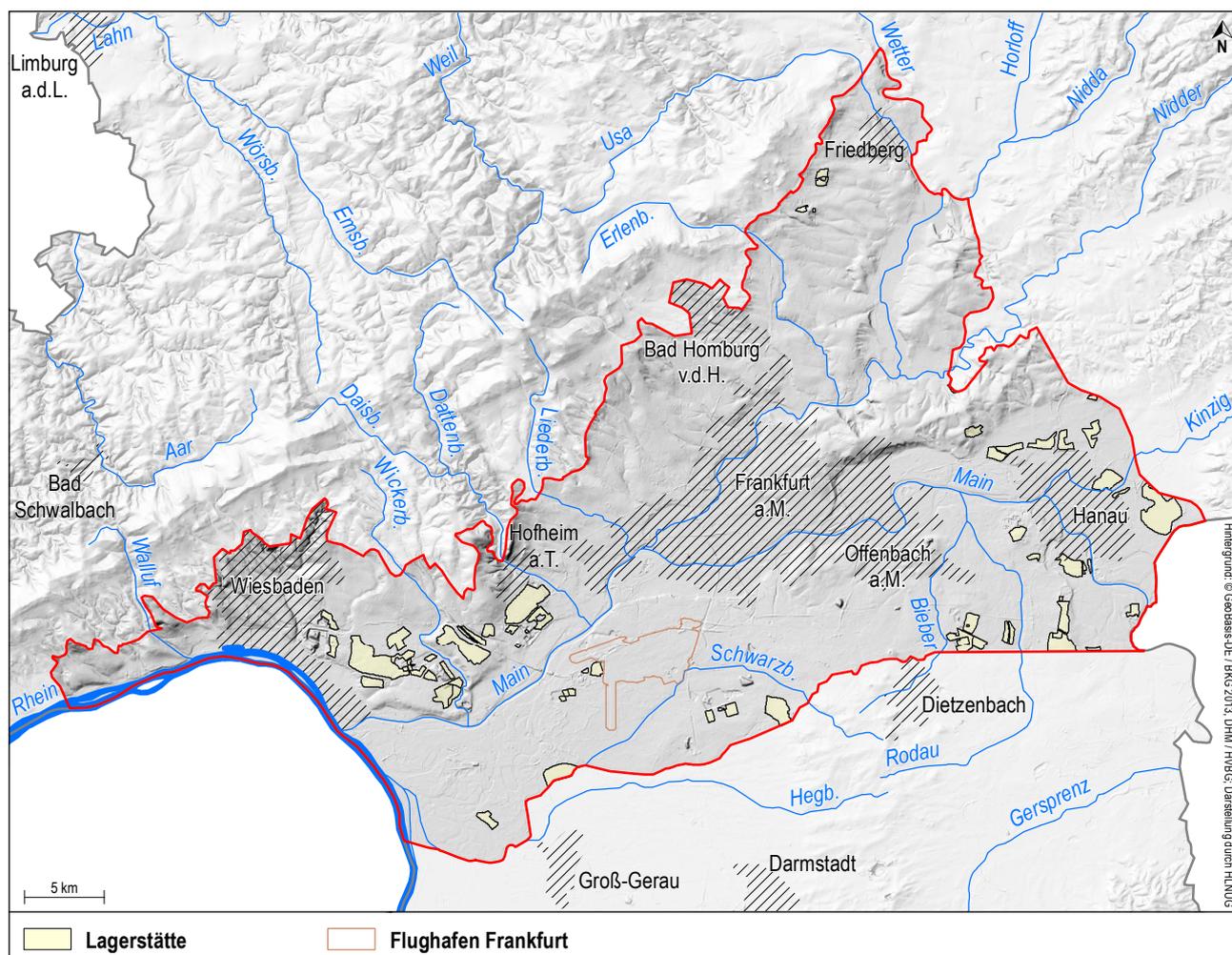
Teile des bereits ausgekierten Abbaugbietes Langener Waldsee sind heute renaturiert und haben damit eine hohe Bedeutung als Naherholungsgebiet und für die Freizeitgestaltung in der Region Rhein-Main.

Nördlich des Mains bestehen weitere Abbaue nördlich Hochheim und nordöstlich Weilbach. In der Region Weilbach (Abb. 3) sind zahlreiche Abbaue in der Vergangenheit ausgekiert worden. Die verfüllten, rekultivierten und renaturierten Bereiche sind heute Teil des Regionalparks RheinMain.

Die Kartendarstellung in Abbildung 1 zeigt sehr deutlich auf, dass der größere Teil der für die Industrie notwendigen Rohstoffe, insbesondere Hartgesteine wie z. B. Basalte oder Taunusquarzit zur Herstellung von Schotter, Splitt und Mineralgemischen, Sande und Kiese sowie Tonrohstoffe außerhalb der Region, nämlich im Taunus, im Vogelsberg, im Odenwald

und im südlichen Anteil des Rhein-Main-Gebietes an Rhein und Main gewonnen wird. Weitere für die Industrie notwendige Rohstoffe wie Tonrohstoffe für feuerfeste keramische Produkte oder Gips- und Anhydritstein z. B. für die Herstellung von Gipsplatten, Putze und Estriche kommen im Rhein-Main-Gebiet nicht vor.

Die im Stadtgebiet von Wiesbaden östlich der Mülldeponie noch vorhandenen zwei Kalkmergelstein-Lagerstätten Kalkofen und Kastel werden nicht mehr abgebaut. Dieser Rohstoff diente bis vor wenigen Jahren der dort noch heute ansässigen Zementindustrie. Der Bereich ist für städtebauliche Entwicklungsmaßnahmen (Wiesbaden Ostfeld) vorgesehen, sodass nur noch geringe Mengen tertiärer Sande oberhalb der Kalkmergelsteine abgebaut werden. Tertiäre, quarzreiche Sande und Kiese werden zudem noch bei Rosbach vor der Höhe gewonnen.



**Abb. 4:** Verteilung der in der Karte Rohstoffsicherung (KRS) aktuell (Stand 2021) ausgewiesenen Rohstoffsicherungsflächen sowie die Fläche des Frankfurter Flughafens

Mineralische Rohstoffe können nur dort abgebaut werden, wo sie aufgrund geologischer Prozesse gebildet worden sind. Andere Flächennutzungen wie z. B. Trassen für Straßen- und Bahnverkehr oder Windparks sind dagegen flexibler plan- und umsetzbar. In einem so dicht besiedelten Ballungsraum wie dem Rhein-Main-Gebiet sind Flächennutzungskonflikte nicht gänzlich vermeidbar, so z. B. zwischen Wassergewinnung und Rohstoffgewinnung in den fluviatilen Lockergesteinen von Rhein und Main.

So entsprechen die im Regionalplan Südhessen/Regionalverband FrankfurtRheinMain 2010 ausgewiesenen Lagerstätten mineralischer Rohstoffe nicht dem geologisch vorhandenen Rohstoffpotenzial.

Beispielsweise befinden sich im südlichen Umring des Frankfurter Flughafens Sand- und Kies-Potenziale,

die aufgrund von Bannwaldausweisungen nicht regionalplanerisch gesichert sind und auch nicht in der Karte Rohstoffsicherung (KRS) des HLNUG ausgewiesen sind (Abb. 4).

Die in Abbildung 4 dargestellten Lagerstätten wurden im aktuellen Regionalplan der Region bis auf die als Vorranggebiete ausgewiesenen existierenden Abbaustellen selbst nur als *Vorbehaltsgebiete oberflächennaher Lagerstätten* ausgewiesen. Das heißt, diese Flächen könnten nur mittels positivem Abweichungsbescheid vom gültigen Regionalplan und anschließenden, zumeist langjährigen Prüf- und Genehmigungsverfahren einer Rohstoffnutzung zugeführt werden. Lediglich in den Vorranggebieten hat die Rohstoffgewinnung Vorrang vor allen anderen Nutzungsansprüchen.

Grundsätzlich, aber insbesondere bei transportintensiven Massenrohstoffen wie Sanden und Kiesen sowie Hartgesteinen, ist eine umweltschonende, trans-

portreduzierende Rohstoffnutzung aus der Region für die Region sinnvoll.

## Rohstoffabbau: Natürliche Georisiken und Geogefahren

Menschen, Tiere und Pflanzen, also alle Organismen als Teil der Natur, werden durch natürliche Prozesse beeinflusst und beeinflussen selber ihre Mitwelt. Dadurch entstehen positive wie negative Spannungsfelder, je nach dem Zweck der Naturnutzung. Geogefahren resultieren aus der menschlichen Nutzung von Geopotenzial durch die natürliche Beschaffenheit des unverwitterten und verwitterten anstehenden Gesteins und seiner Lagerungsweise, die ein bestimmtes Georisiko darstellen können. Die Wirkung kann z. B. ein Böschungsbruch sein, der ohne oder mit menschlicher Beteiligung entstehen kann.

Deshalb werden im Genehmigungsverfahren im Vorfeld eines Rohstoffabbaus sowohl ökologische Aspekte als auch Georisiken benannt und zur Minimierung negativer Auswirkungen Auflagen in den Abbaugenehmigungen formuliert.

Wie bereits beschrieben, werden in der Region fast nur Sande und Kiese abgebaut. Es überwiegt der Nassabbau. Geogefahren können, bedingt durch das Georisiko von differenzierten Sand-, Kies- und Ton/Schluff-Schichtungen, hinsichtlich des Gewässerbaus insbesondere im Böschungsbau (Böschungsbruch) auftreten. Dieser Geogefahr gilt es durch eine angepasste Abbaugestaltung mit standfester Dimensionierung von Böschungen entgegenzutreten.

## Literatur

Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) (2020): Wohnungsbedarfsprognose für die hessischen Landkreise und kreisfreien Städte bis 2040. Eine Untersuchung im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr, Energie und Wohnen. – [https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/media/hmwvl/wohnungsbedarfsprognose\\_2020.pdf](https://wirtschaft.hessen.de/sites/default/files/media/hmwvl/wohnungsbedarfsprognose_2020.pdf), (abgerufen am 27.05.2021).

## 6 Geothermie und Erdwärme

SVEN RUMOHR \*

Die Wärmepumpe hat sich zu einem auf breiter Basis anerkannten Heizsystem entwickelt, das in Hessen im Neubau heute häufiger eingesetzt wird als andere Heizsysteme. Die interessanteste Wärmequelle für die Wärmepumpe ist die Erdwärme. Sie steht überall und jederzeit, unabhängig von Wind, Wetter und Sonneneinstrahlung zur Verfügung. Die Erschließung oberflächennaher Erdwärme mittels Erdwärmesonden-Bohrungen ist technisch nahezu auf jedem Grundstück möglich. Sie kann zur Beheizung und auch zur Kühlung von kleinen Einfamilienhäusern bis hin zu großen Bürogebäuden genutzt werden.

Die für die Dimensionierung von Erdwärmesonden-Anlagen wesentlichen geothermischen Parameter sind die effektive Wärmeleitfähigkeit und die mittlere

Temperatur des von den Erdwärmesonden erschlossenen Untergrundes. Liegen zu diesen Parametern standörtliche Daten vor, ermöglicht dies eine angepasste Planung. Liegen keine Daten vor, muss auf Schätzungen zurückgegriffen werden, wobei im Falle der Untergrundtemperatur der VDI-Richtlinie 4640 folgend häufig von 11 °C ausgegangen wird, unabhängig von der Bohrtiefe.

Erdwärmesonden sind in den meisten Fällen rd. 100 m tief. Die nachfolgenden Erläuterungen zu Temperatur und Wärmeleitfähigkeit beziehen sich daher auf den Tiefenbereich bis 100 m unter Gelände. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte der bis 100 m Tiefe anstehenden Schichten.

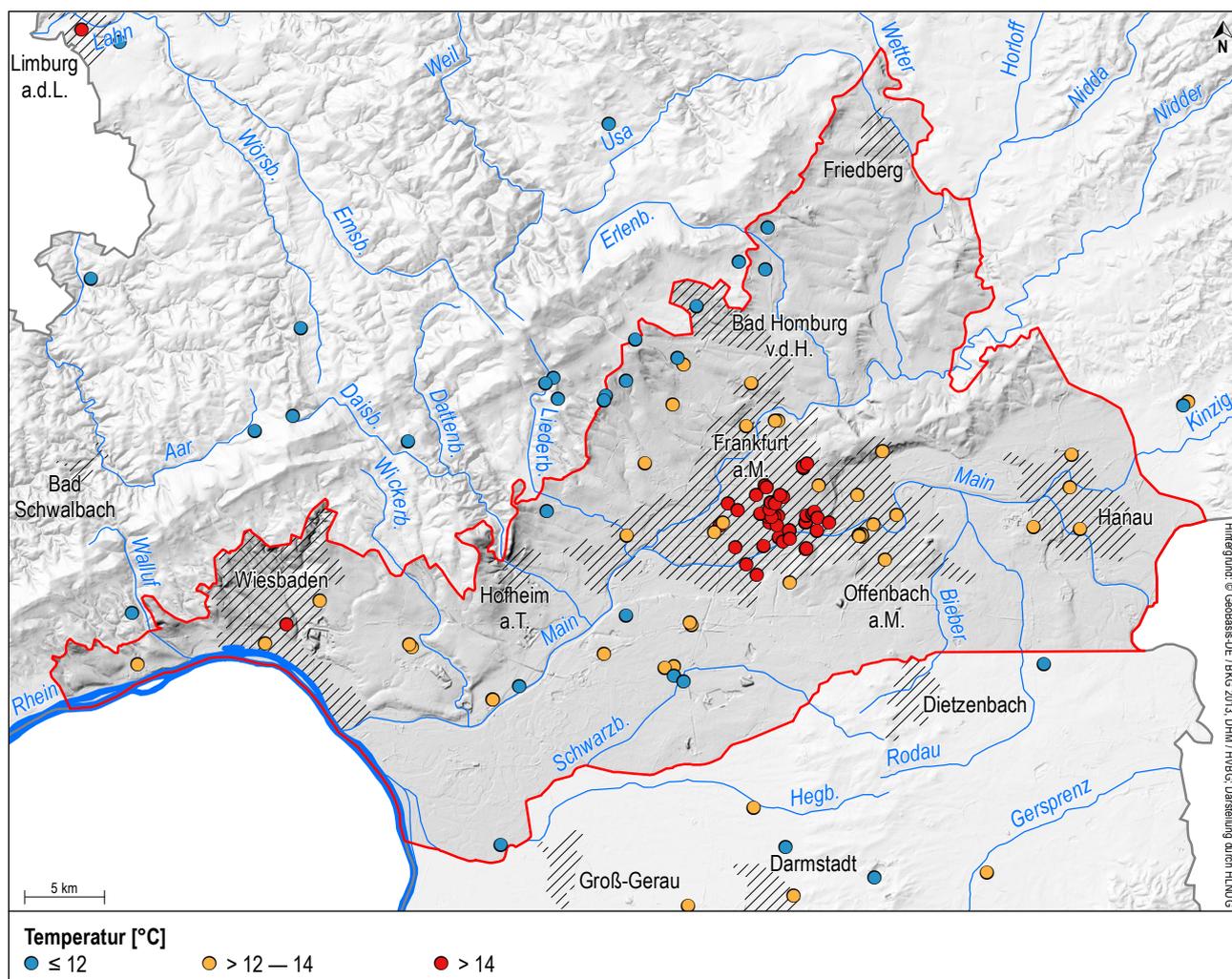
### Untergrundtemperatur

Temperaturmessungen werden meist in Grundwassermessstellen oder Erdwärmesonden durchgeführt. Erdwärmesonden, deren Anzahl deutlich größer ist als die von Grundwassermessstellen, stehen aufgrund der Anbindung an die Wärmepumpe wenige

Tage nach der Fertigstellung der Bohrung selten für Messungen zur Verfügung. Die Datenlage ist daher sowohl hessenweit wie auch bezogen auf das Rhein-Main-Gebiet ungleichförmig.



Abb. 1: Temperaturmessung in einer Erdwärmesonde, Wiesbaden-Nordenstadt



**Abb. 2:** Mittlere Temperatur des Untergrundes bis 100 m Tiefe sowie die Standorte, an denen Messungen der Untergrundtemperatur durchgeführt wurden

Abbildung 2 zeigt, dass die mittlere Temperatur des Untergrundes bis 100 m Tiefe im Rhein-Main-Gebiet überwiegend 12–14 °C beträgt. In den Höhenlagen des Taunus ist der Untergrund bis 100 m Tiefe mit überwiegend 10–12 °C kühler, was eine Folge der dort niedrigeren Lufttemperaturen ist. Im Innenstadtbereich von Frankfurt beträgt die mittlere Temperatur des Untergrundes bis 100 m Tiefe hingegen sogar bis zu 20 °C (Abb. 2), wobei in einzelnen Erdwärmesonden in 100 m Tiefe eine Temperatur von rd. 24 °C gemessen wurde. Ursächlich für diese hohen

Temperaturen ist eine geothermische Anomalie, die in dieser Ausbildung einmalig in Hessen ist. Ihr Vorkommen ist nach heutigem Kenntnisstand auf aufsteigende Thermalwässer zurückzuführen.

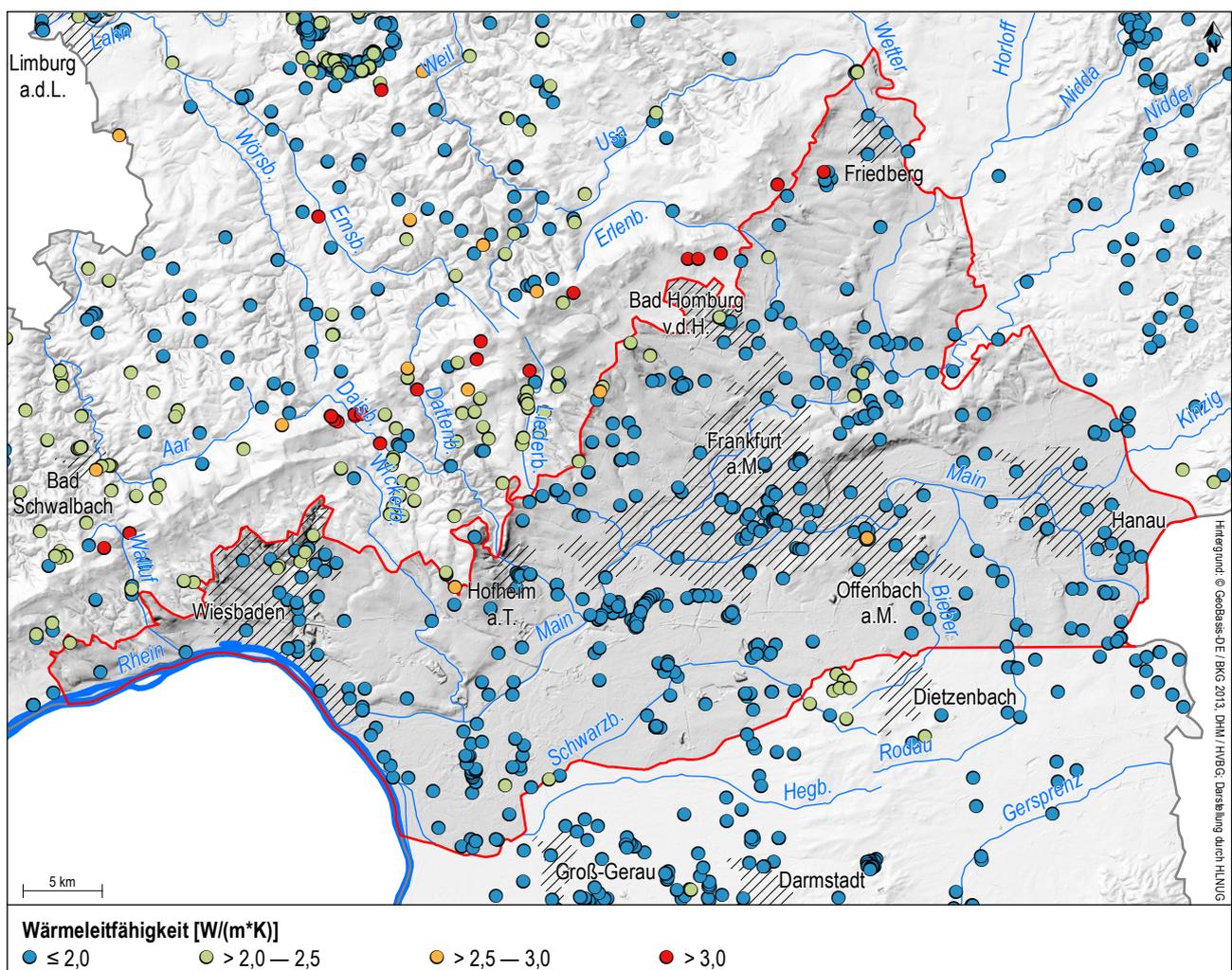
Die Thermalquellen von Wiesbaden und Bad Soden am Taunus sind in Abbildung 2 nicht berücksichtigt. Aufgrund der hier bestehenden Heilquellenschutzgebiete existieren im Umfeld keine ausreichend tiefen Bohrungen für Temperaturmessungen.

## Wärmeleitfähigkeit

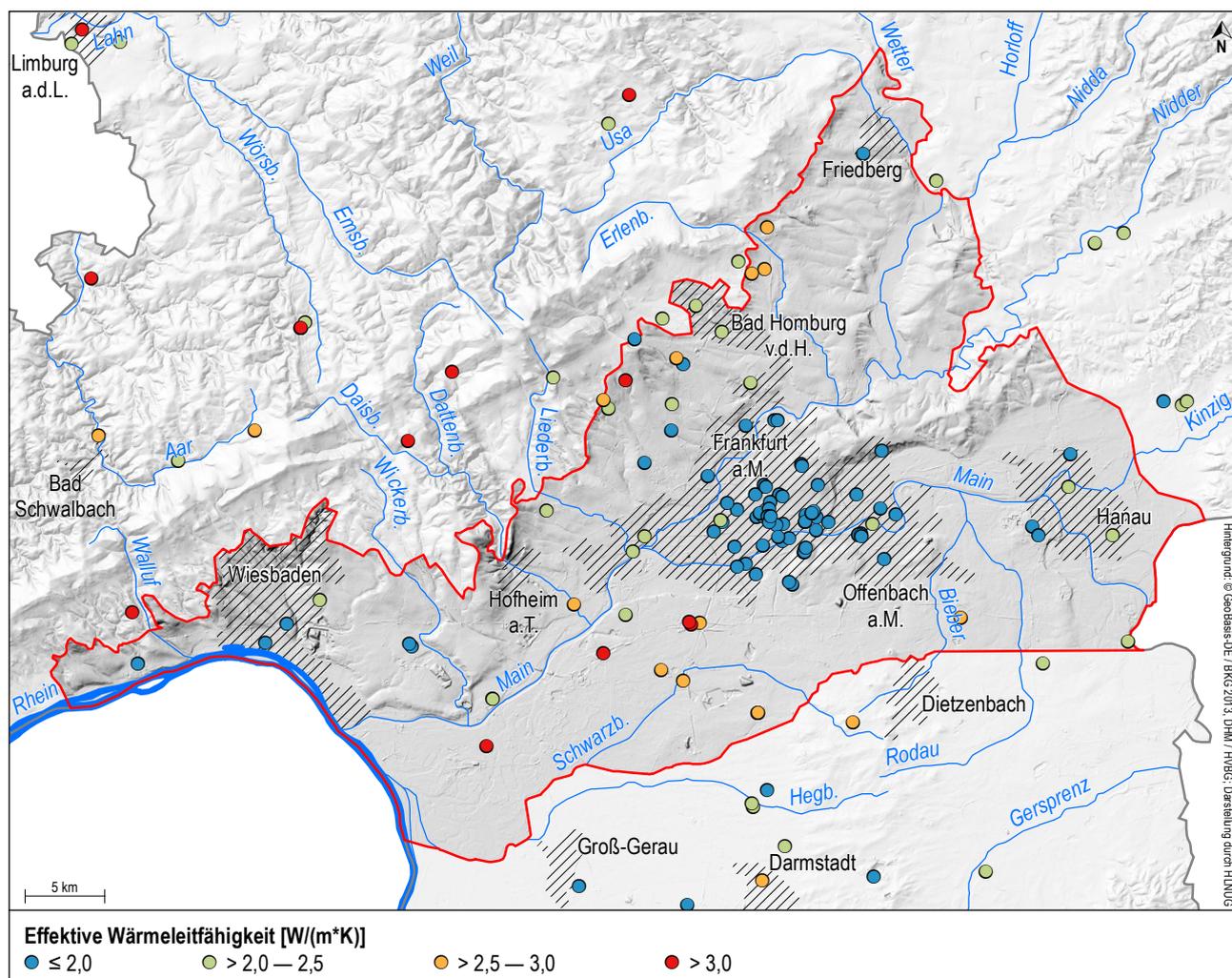
Der für geothermische Anlagen wichtige Wärmetransport erfolgt im Untergrund einerseits konduktiv im Gestein, andererseits konvektiv mit dem strömenden Grundwasser. Die das Vermögen eines Gesteins zum Wärmetransport beschreibende Gesteinswärmeleitfähigkeit kann bei Kenntnis der an einem Standort anstehenden Gesteine auf Grundlage von Messungen an Referenzproben abgeschätzt werden. Diese Abschätzung wurde vom HLNUG für alle digital erfassten Bohrungen in Hessen durchgeführt und die Ergebnisse im Geologieviewer Hessen ([geologie.hessen.de](http://geologie.hessen.de)) veröffentlicht. Für die im Rhein-Main-Gebiet flächenhaft anstehenden Lockergesteine führt diese Abschätzung zu Wärmeleitfähigkeiten von überwiegend weniger als  $2,0 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$

(Abb. 3). Nur im Bereich des Taunus führen die dort anstehenden Festgesteine zu Wärmeleitfähigkeiten von über  $2,0 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$ . Diese Werte gelten für das trockene Gestein mit luftgefüllten Hohlräumen. Mit steigender Wassersättigung von Gesteinshohlräumen (Poren, Risse, Klüfte) nimmt die Wärmeleitfähigkeit zu.

Die den Wärmetransport im und mit dem strömenden Grundwasser berücksichtigende effektive Wärmeleitfähigkeit wird durch einen sog. Thermal-Response-Test (Zitat VDI 4640-5) ermittelt. Thermal-Response-Tests werden i. d. R. zur Planung größerer Erdwärmesonden-Anlagen mit Heizleistungen über  $30\text{--}40 \text{ kW}$  durchgeführt, deren Verteilung im



**Abb. 3:** Wärmeleitfähigkeit des bis 100 m Tiefe anstehenden Gesteins (Grundwasser ist hier nicht berücksichtigt)



**Abb. 4:** Effektive Wärmeleitfähigkeit des bis 100 m Tiefe anstehenden Gesteins. Die mittels Thermal-Response-Test ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit umfasst auch die Wärmeleitung durch Grundwasser.

Rhein-Main-Gebiet nicht einheitlich ist. Die so für den Tiefenbereich bis 100 m ermittelten Wärmeleitfähigkeiten sind in Abbildung 4 dargestellt. Sie sind in der Fläche überwiegend höher als 2,0 W/(m\*K), was die Bedeutung von Grundwasser für den Wärmetransport im Untergrund unterstreicht. An Standorten, an denen der Untergrund bis 100 m Tiefe überwiegend von Tonen und Schluffen aufgebaut ist, deren Gesteinswärmeleitfähigkeit gering ist und die nur eine geringe Wasserführung aufweisen, ist jedoch auch die effektive Wärmeleitfähigkeit kleiner 2,0 W/(m\*K). Dies ist insbesondere im nördlich vom Mains gelegenen Stadtgebiet von Frankfurt am Main sowie teilweise im Bereich von Wiesbaden der Fall.

Wärmeleitfähigkeiten ist derzeit noch nicht möglich, da die Zahl bzw. Verteilung der Messwerte zu inhomogen ist.

Eine Regionalisierung der durch Thermal-Response-Test im Rhein-Main-Gebiet ermittelten effektiven



Hessisches Landesamt für  
Naturschutz, Umwelt und Geologie  
Für eine lebenswerte Zukunft

[www.hlnug.de](http://www.hlnug.de)



Das HLNUG auf Twitter:  
[https://twitter.com/hlnug\\_hessen](https://twitter.com/hlnug_hessen)