

Der Rhein und seine Entwicklung im geologischen Kontext

Einleitung

Der Rhein ist in vielerlei Hinsicht einer der bemerkenswertesten Flüsse Europas, wenn nicht sogar der gesamten Erde. Neben der politischen und kulturhistorischen Bedeutung ist die Anlage des Flußsystems auch aus geologischer Sicht beachtenswert. Auf etwas mehr als 1.200 km passiert der Strom sehr unterschiedliche Landschaften, die durch den geologischen Kontext geprägt wurden. In diesem Beitrag werden zunächst die geologischen Rahmenbedingungen dargestellt, bevor die einzelnen Landschaften kurz charakterisiert werden. Nach einer Zusammenfassung der geologischen Geschichte des Rheinsystems wird abschließend auf die mögliche zukünftige Entwicklung eingegangen.

1. Geologischer Rahmen

Der geologische Aufbau Mitteleuropas ist durch vier Phasen der erdgeschichtlichen Entwicklung geprägt. Die älteste dieser Phasen fand während der zweiten Hälfte des Erdalters (Paläozoikum), vor etwa 420 bis 300 Millionen Jahren, statt. Zu dieser Zeit befand sich in Mitteleuropa ein Meer, dessen Untergrund sich im Laufe der Zeit langsam auffüllte und schließlich im Rahmen einer Gebirgsbildungsphase aufgefaltet wurde. Den Kern dieses Gebirgskomplexes, der als Varisziden bezeichnet wird, stellt das Rheinische Schiefergebirge dar. Insgesamt erstreckt sich das ehemalige Gebirge von Polen im Osten bis nach England und Irland im Westen. Zudem zählen Teile der Appalachen im Osten Nordamerikas und Teile des Antiatlans in Nordafrika sowie viele andere Gebiete (u.a. das Massif Central in Frankreich) zu den Varisziden im erweiterten Sinne.

Im Laufe dieser Gebirgsbildungen bildete sich der Superkontinent Pangäa, dessen Randbereiche später teilweise überflutet wurden. Während dieser Phase, im Erdzeitalter des Perms, entstanden die Salzablagerungen des Zechstein in Norddeutschland. Im Laufe des darauf folgenden Erdmittelalters (Mesozoikum) wurden die Sandstein- und Kalksteinabfolgen abgelagert, die heute große Teile Mittel- und Westeuropas aufbauen, z.B. große Teile der Schwäbischen Alb, des Schwarzwalds, der Vogesen und Lothringens.

Durch weiträumige und langfristige Krustenbewegungen begann vor etwa 250 Mio. Jahren der Zerfall Pangäas. Dabei bildete sich u.a. eine große, sich ostwärts öffnende Meeresbucht etwa im Bereich des heutigen Mittelmeeres, die als Tethys bezeichnet wird. Einige Zeit nach Öffnung der Bucht begann diese sich infolge der relativen Bewegungen zwischen Afrika und Europa wieder zu schließen, wodurch die dortigen Meeresablagerungen zuerst zusammengeschoben und dann gefaltet wurden. Während

dieser Phase bildete sich ein Gebirgsgürtel überwiegend am nördlichen Rand des heutigen Mittelmeers, der sich vom Atlasgebirge über die Iberische Halbinsel, Italien und den Balkan erstreckt. Die Fortsetzung reicht über Kleinasien und den Mittleren Osten bis in den Himalaya hinein und darüber hinaus. Diese Gebirgsbildung, die zu Beginn der Erdneuzeit (Känozoikum) vor etwa 70 Mio. Jahren einsetzte, wird nach dem zentralen Abschnitt als »alpidisch« bezeichnet. Den Alpen nördlich vorgelagert findet sich ein Becken, welches sich vom Genfer See bis ins Wiener Becken erstreckt. Es wird als Molassebecken bezeichnet und nahm den Abtragungsschutt der Alpen auf.

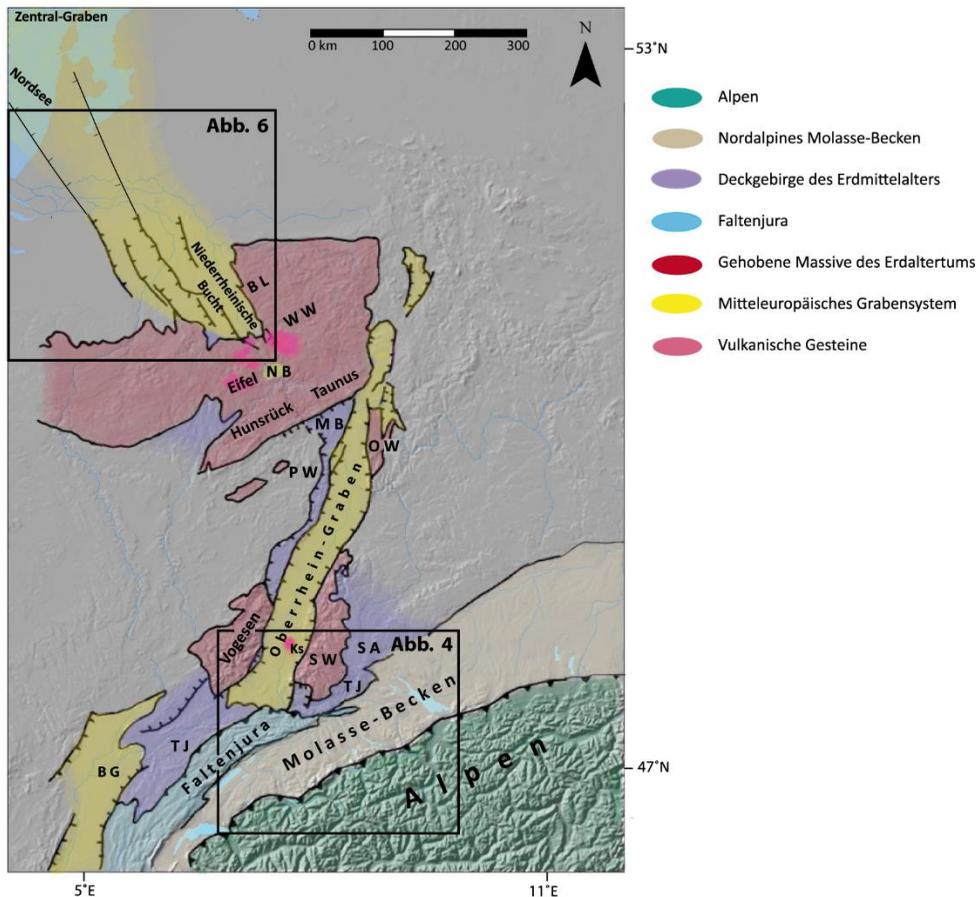


Abb. 1: Schematische Übersicht über die geologische Situation entlang des Rheins.

Durch die Gebirgsbildung, welche vereinfacht gesagt eine Kollision der afrikanischen und der europäischen Kontinentalplatte darstellt, baute sich eine Spannung auf, die durch großräumiges Aufreißen der Erdkruste in der folgenden Phase abgebaut wurde. Dieser als Rifting bezeichnete Vorgang, der sich über geologisch lange Zeiträume erstreckt, führte zu einer Auseinanderbewegung innerhalb der europäischen Kontinentalplatte. Entlang der Reißzone kam es zu einer Absenkung der Kruste. Es entstand ein sogenanntes Riftsystem, welches von Süden nach Norden durch Europa

verläuft (Abb. 1). Den südlichen Teil des hier relevanten Abschnittes des Riftsystems bilden Rhône- und Bressegraben westlich der Alpen, den zentralen Teil stellt der Oberrheingraben dar, während sich der nördliche Abschnitt aus der Niederrheinischen Bucht und dem Rurgraben aufbaut, deren Fortsetzung sich bis in die Nordsee erstreckt.

2. Landschaften

Der Flußlauf des Rheins wird hier, wie allgemein üblich, in sechs Abschnitte eingeteilt (Abb. 2). Im Quellgebiet in den Alpen finden sich zahlreiche Flüsse, die den Namen *Rhein* tragen. Obwohl der Oberlauf stark verästelt ist, wird oft der Lag da Toma (Tomassee) als eigentliche Quelle des Rheins angegeben, da er am weitesten von der Mündung entfernt ist. Hauptäste des Systems sind Vorderrhein und Hinterrhein, die sich bei Reichenau zum **Alpenrhein** vereinigen. Kurz vor dem Zusammenfluß durchbricht der Vorderrhein die Sturzmassen des Flimser Bergsturzes. Der mit etwa 10 km³ größte Bergsturz der Alpen ereignete sich vor knapp 10.000 Jahren, als ein Großteil der Südflanke des Flimsersteins kollabierte. Der Alpenrhein fließt ab Chur in Richtung Norden durch ein von Gletschern weit ausgeräumtes Tal, das bei Sargans eine Abzweigung entlang des Walensees aufweist, die während der Eiszeiten von Eis nordostwärts durchflossen wurde. Wegen fortwährender starker Überschwemmungen erfolgte ab Mitte des 18. Jhd. eine starke Regulierung und Verbauung, die den Rhein in einen künstlichen Kanal zwängten. Seit Ende des 20. Jhd. wird vermehrt an einer Rückführung hin zu mehr naturnahen Bedingungen gearbeitet, die sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte berücksichtigen soll.

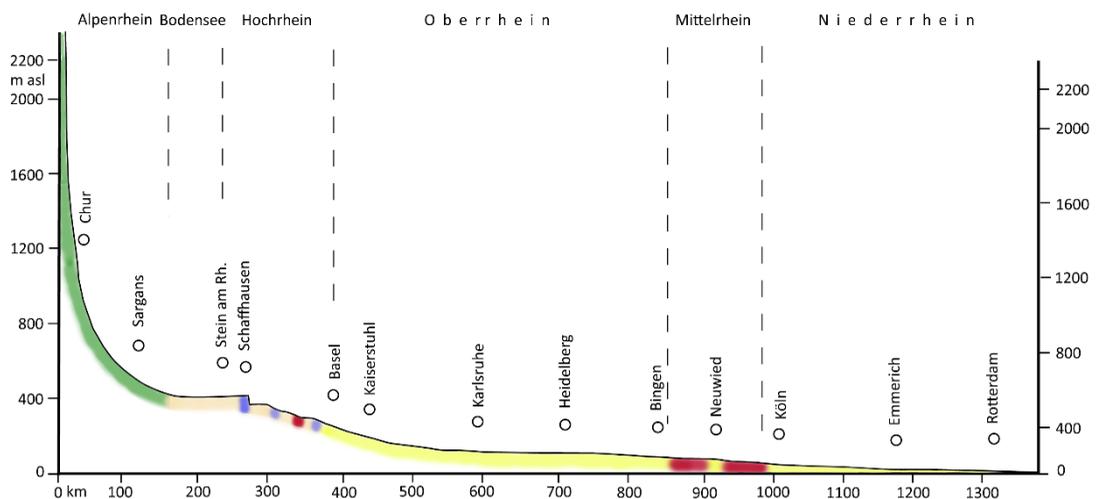


Abb. 2: Schematisches Längsprofil entlang des Rheins, von der Quelle (links) bis zur Mündung (rechts), mit der die einzelnen Abschnitte prägende Geologie (vgl. Abb. 1).

Der Alpenrhein mündet in den **Bodensee**, einen der größten Seen Mitteleuropas. Dieser und das sich nördlich anschließende Oberschwaben liegen im Bereich des Molassebeckens, wurden aber während des Eiszeitalters mehrfach von Gletschern aus dem Einzugsgebiet des Rheins überfahren, was einen starken Einfluß auf die Prägung

der Landschaft hatte (Abb. 3). Die Ausformung des Bodenseebeckens erfolgte wohl vor allem während der Vergletscherung des Gebietes, bei Ausnutzung einer strukturellen Schwächezone in der Erdkruste. Im Untergrund nördlich des Sees weisen Seeablagerungen auf zwei ältere Phasen hin, während derer es zu einem massiven Abtrag durch Gletscher gekommen ist (Ellwanger et al. 2011). Da die Becken und Rinnen, in denen die Ablagerung stattfand, weit unter die Erosionsbasis reichen, werden diese als übertiefte Strukturen bezeichnet, deren Bildung mit unter Druck stehendem Schmelzwasser unter dem Gletschereis in Verbindung gebracht wird (Preusser et al. 2010). Während die jüngste Phase der Einschneidung mit dem letzten Vorstoß der alpinen Gletscher vor ca. 25.000 Jahren korreliert und die vorletzte Phase vermutlich ein Alter von 150.000 Jahren hat, ist über ältere Phasen wenig bekannt. Untersuchungen aus der Schweiz deuten darauf hin, daß die größte Eisausdehnung in den Alpen älter als 350.000 Jahre ist (Preusser et al. 2011).

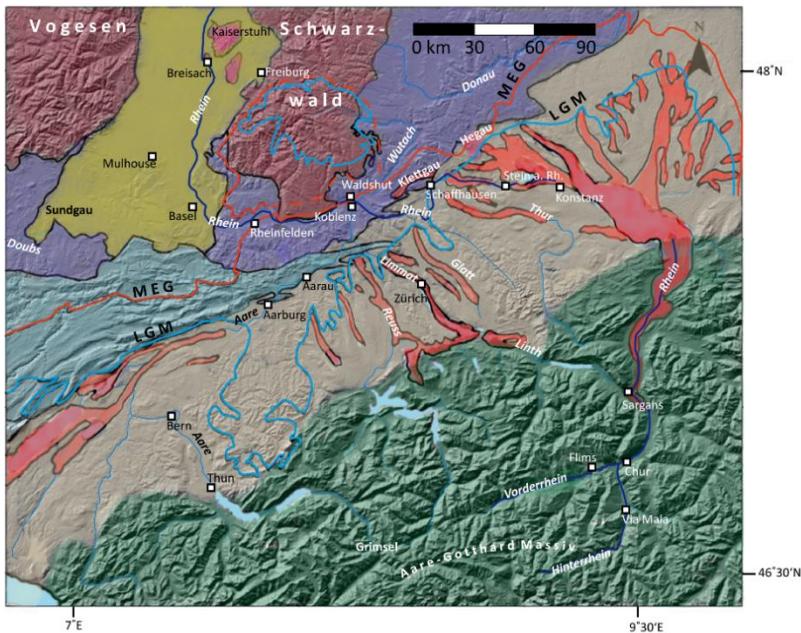


Abb. 3: Übersicht über die geologische Situation im Oberlauf des Rheinsystems. Dem Faltengebirge der Alpen (grün) ist das Molassebecken (grau) vorgelagert, in welches übertiefte Strukturen eingeschnitten wurden (hellrot). Während der letzten Eiszeit erreichten die Gletscher (Letztes Glaziales Maximum-LGM, rote Linie) knapp den Südrand des Faltengebirges des Jura (hellblau) und der aus mesozoischen Gesteinen aufgebauten Süddeutschen Großscholle (violett). Während der größten alpinen Vergletscherung (MEG, schwarze Linie) wurde der Südrand beider Zonen von Eis überfahren. Während des Eiszeitalters entstanden auch mehrfach Gletscher über dem Schwarzwald (vgl. Hemmerle et al. 2016) und in den Vogesen (vgl. Kaltenbrunn und Preusser 2015). Der Abtragungsschutt der Gletscher wurde zu einem überwiegenden Teil im Oberrheingraben abgelagert (gelb).

Am Nordwestende verläßt der *Hochrhein* den Bodensee und fließt in westlicher Richtung. Auch dieser Teil wurde während des Eiszeitalters mehrfach von Gletschern erreicht, was zu einer entsprechenden Formung der Landschaft führte. Die eiszeitlichen Ablagerungen im östlichen Hochrheingebiet weisen auf eine wesentlich komplexere Geschichte der Vergletscherungen hin (Graf 2009, Preusser et al. 2011), als dies lange

angenommen wurde. So scheinen die ersten Hinweise auf eine weiträumige Vergletscherung ein Alter von 2 Mio. Jahren zu haben. Während in anderen Regionen vier bis sechs Eiszeiten angenommen werden, deuten die Ablagerungen aus dem Gebiet des Hochrheins auf bis zu 15 Vergletscherungen hin. Eine geologische Besonderheit ist der Rheinfall von Schaffhausen, der aus Verlagerungen des Rheinlaufes resultiert (Abb. 4). Die möglicherweise ältesten Ablagerungen eines Flusses bei Schaffhausen stellen hochliegende Schotter dar (Deckenschotter), die wohl einem Vorläufer des Rheins zuzuordnen sind. Dieser floß allerdings nicht durch das Gebiet des Bodensees, sondern verließ die Alpen über die Passage entlang des Walensees (Obere Klettgau-Rinne). Vermutlich während der größten Vergletscherung wurde der Rhein in ein neues Bett durch den Klettgau verlegt (Klettgau-Hauptrinne). In späteren Eiszeiten erfolgten dann Durchbrüche durch die Neuhauserwald-Rinne und die Engi-Rinne sowie die Anlage der auch heute genutzten Rheinfall-Rinne am Ende der vorletzten Eiszeit (ca. 130.000 Jahre vor heute). Die heutige Situation etablierte sich erst gegen Ende der letzten Eiszeit, als ein Teil der Rheinfall-Rinne aufgegeben wurde.

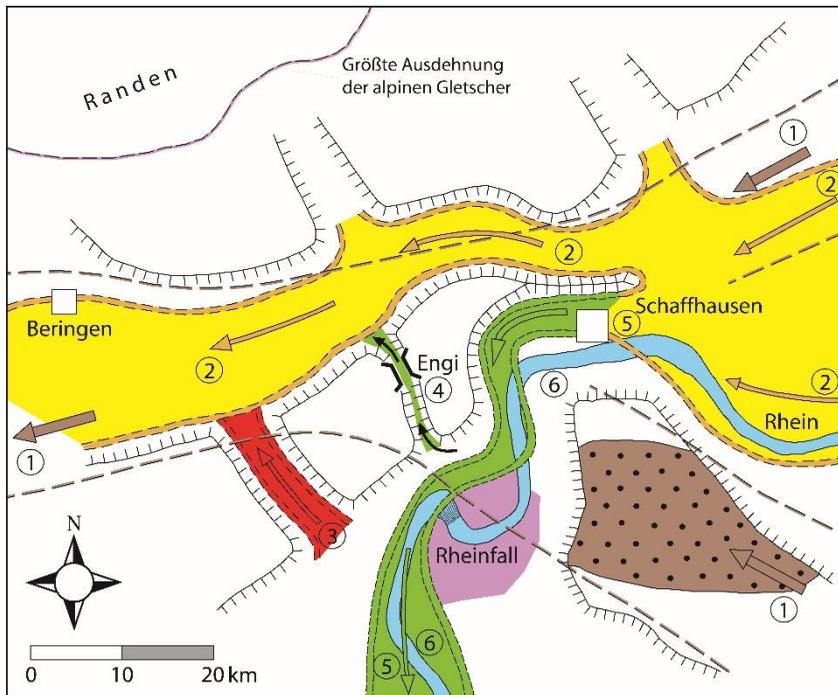


Abb. 4: Schematische Darstellung der Verlagerung des Rheinlaufes bei Schaffhausen (verändert nach Preusser et al. 2011). 1: Obere Klettgau-Rinne (>350.000 Jahre), 2: Klettgau-Hauptrinne (ca. 350.000 bis 250.000 Jahre ?), 3: Neuhauserwald-Rinne (ca. 250.000 bis 180.000 Jahre ?), 4: Engi-Rinne (ca. 180.000 bis 25.000 Jahre), 5: Rheinfall-Rinne (ca. 130.000 bis 25.000 Jahre), 6: Heutige Rinne des Rheins (seit ca. 25.000 Jahren).

Bei Basel wendet sich der Fluß in Richtung Norden und wird nun als **Oberrhein** bezeichnet. Er folgt ab dort dem mitteleuropäischen Riftsystem, zunächst der Grabenstruktur, die sich von Basel bis nach Frankfurt erstreckt. Während im Graben selbst sich die Erdkruste senkte, hoben sich die östlich und westlich angrenzenden

Bereiche, wodurch der Schwarzwald und die Vogesen entstanden. Der Übergang vom Graben zu den Mittelgebirgen ist durch die Hebung meist steil ausgeprägt, wobei einzelne Schollen (die sog. Vorbergzone), wie der Tuniberg bei Freiburg, zurückblieben. Durch die stärkere Hebung im Süden waren die Gesteine dort besonders stark der Erosion ausgesetzt, so daß hier sämtliche Schichten des Erdmittelalters abgetragen wurden und heute das Grundgebirge zu Tage tritt, das sich überwiegend aus Gneiss und Granit aufbaut, die in großer Tiefe entstanden. In der Rheinebene ragt der Kaiserstuhl bis zu 377 m über das Umland hervor. Dieser Vulkan war vor etwa 18–16 Mio. Jahren aktiv und weist eine ungewöhnliche geochemische Zusammensetzung auf (Wimmenauer 2003). Im Graben selbst wurde seit seiner Entstehung Schutt aus den Alpen und den umliegenden Mittelgebirgen abgelagert, der zu einem großen Teil durch den Rhein verfrachtet wurde. Die Ablagerungen erreichen eine Mächtigkeit von bis zu 4000 m, wobei die Mächtigkeiten stark schwanken. Allein während des Eiszeitalters wurden bis zu 500 m an Sand und Kies abgelagert, die durch verwilderte Flußsysteme transportiert wurden. In den Warmzeiten bildeten sich breit angelegte, verzweigte Flußsysteme, die durch dichte Vegetation und Überschwemmungsflächen gekennzeichnet waren. Der Rhein verlagerte häufig seinen Lauf, was noch heute durch ehemalige Flußläufe dokumentiert ist, die sich beispielsweise in hochauflösenden Gelände-modellen abbilden. Zu Beginn des 19. Jhd. erfolgten erste massive Änderungen durch den Menschen, die dem Oberrhein ein völlig neues Aussehen verschafften. Zunächst unter der Leitung von Johann Gottfried Tulla (1770–1828) wurde der Rhein begradigt, sein Flußbett wurde eingeengt und Dämme wurden errichtet. Ziele der umfassenden Maßnahmen waren der Schutz vor Überflutungen, die Schaffung neuer Flächen für die Besiedlung und landwirtschaftliche Nutzung, die Verbesserung der Schiffbarkeit und das Zurückdrängen des Sumpffiebers (Malaria), welches zu dieser Zeit eine große Gefahr darstellte, durch die Trockenlegung der Brutgebiete der diese Krankheit übertragenden Insekten. Nachdem Tulla an Malaria verstorben war, führten andere die Arbeiten weiter, die sich in mehreren Etappen bis nach Ende des 2. Weltkriegs fortsetzten. Während die angestrebten Ziele überwiegend erreicht wurden, traten bald auch negative Folgen in Erscheinung. So wurde die einst artenreiche Landschaft zerstört, der Fischbestand nahm deutlich ab und der nun schneller fließende Rhein begann sich rasant tiefer in sein Bett einzuschneiden (bis zu 10 m), was teilweise zu starken Absenkungen des Grundwasserspiegels führte. Als Gegenmaßnahme werden bis heute große Mengen an Kies in den Rhein geschüttet, um dessen Erosionskraft zu mindern. Auch in dieser Region werden Projekte zur Rückführung der ehemaligen Auengebiete in einen naturnäheren Zustand in Betracht gezogen, wie dies bei der Revitalisierung des Gebietes Taubergießen bereits erfolgt ist. Bei Bingen durchbricht der Fluß das Rheinische Massiv und wird nun als **Mittelrhein** bezeichnet. Ursprünglich, vor über 3 Mio. Jahren, floß der Rhein in dieser Region über eine Ebene, die sich im Laufe der Zeit zu heben begann. So fing der Rhein an, sich in die hebende Umgebung einzuschneiden, wobei in den Kaltzeiten des Eiszeitalters eine Ablagerung von Kies und Sand am Talgrund erfolgte. Hierdurch bildete sich eine sogenannte Terrassentreppe, die das Landschaftsbild des Mittelrheingebietes prägt (Abb. 5). Verbunden mit der Hebung war auch die Entstehung des Vulkanismus in der Eifel, der vor ca. 500.000 Jahren einsetzte und der mit dem Ausbruch des Ulmener

Maars vor etwa 11.000 Jahren seinen vorläufigen Abschluß fand. Einer der bedeutendsten Vulkanausbrüche in der jüngeren Erdgeschichte Europas fand vor ca. 13.000 Jahren in der Osteifel unweit des Rheins statt, im Gebiet des heutigen Laacher Sees. Dabei wurden etwa 20 km³ vulkanische Lockermassen (Tephra) gefördert, die als dünne Bänder im Sediment noch in Südschweden und Norditalien gefunden werden können. In der näheren Umgebung wurden mehrere Zehner-Meter mächtige Tephralagen abgelagert, die bis heute aber weitestgehend abgebaut wurden. Ein Teil der Auswurfmassen verstopfte unmittelbar nach dem Ausbruch die Andernacher Pforte, ein Durchbruchstal des Rheins, das an seiner engsten Stelle nur etwa 1 km breit ist. Hierdurch wurde der Rhein aufgestaut und überflutete das gesamte Neuwieder Becken, ein lokales Senkungsgebiet inmitten des Rheinischen Massivs. Nach dem Kollaps des Damms ergoß sich eine enorme Flut durch das Mittelrheintal in die Niederrheinische Bucht (Baales et al. 2002).

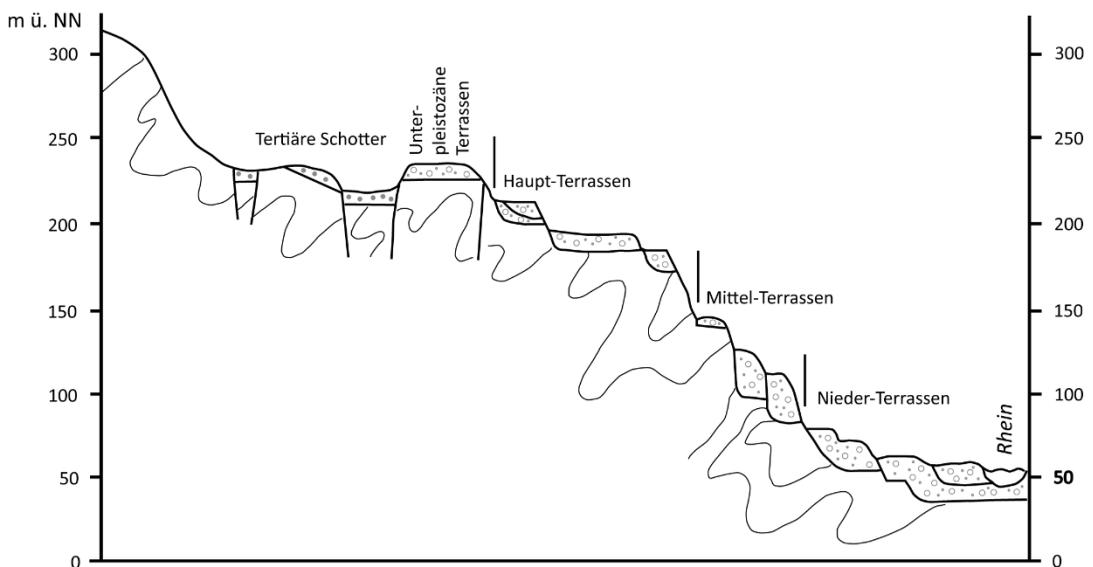


Abb. 5: Schematische Darstellung der Terrassen am Mittelrhein (umgezeichnet nach Boenigk und Frechen 2006).

Bei Bonn verläßt der Fluß den Rheinischen Schild und wird ab dort **Niederrhein** genannt. Im Bereich der Niederrheinischen Bucht senkt sich seit ca. 30 Mio. Jahren die Erdkruste, was zur Ablagerung von bis zu 1500 m Gesteinsschutt geführt hat. Die Absenkung erfolgt entlang von Störungen, die von Südosten nach Nordwesten verlaufen, wobei der Absenkungsbetrag mit Entfernung vom Rheinischen Massiv tendenziell zunimmt (Abb. 6).

Im Laufe der Zeit bildeten sich einzelne Schollen, die unterschiedlich abgesenkt und gegeneinander verstellt wurden. Im Westen der Niederrheinischen Bucht setzt der Rurgraben an der Nordabdachung des Rheinischen Massivs (Eifel) an und zieht sich bis in die Niederlande fort. Das Erdbeben von Roermond vom 13. April 1992 entstand an dieser Störungszone und war mit einer Magnitude von 5,9 das stärkste Beben in jüngerer

Zeit. In der Niederrheinischen Bucht sind an der Oberfläche hauptsächlich Ablagerungen des Rheins und Löss (Staubablagerungen) des Eiszeitalters zu finden. Im nördlichen Teil treten Ablagerungen des Skandinavischen Eisschildes auf, der dieses Gebiet in der vorletzten Eiszeit erreicht hat. Das Eis hat zu dieser Zeit große Mengen an Schutt zusammengeschoben, was noch heute durch Wallstrukturen belegt wird. Der Rhein wurde vom Eis nach Süden abgedrängt. In tieferen Schichten der Niederrheinischen Bucht treten Lockergesteine des Tertiär-Erdzeitalters auf, die Braunkohleflöze enthalten, die vor ca. 30 Mio. Jahren in Küstensümpfen entstanden sind (ähnlich den Everglades in Florida). Die wirtschaftliche Bedeutung dieser Ablagerungen wird durch den Fakt unterstrichen, daß im Jahr 2017 in Deutschland immer noch knapp ein Viertel des Stroms durch die Verbrennung von Braunkohle erzeugt wurde. Kurz hinter der Grenze zu den Niederlanden verzweigt sich der Rhein in drei Arme. Die Ijssel (etwa 16% des Wassers) wendet sich nach Norden und mündet schließlich ins Ijsselmeer. Der Nederrijn/Lek (12%) verläuft nordwestlich, während der Hauptabfluß über die Waal (72%) erfolgt. Zusammen mit der Maas bilden diese drei Arme das Delta des Rheins.

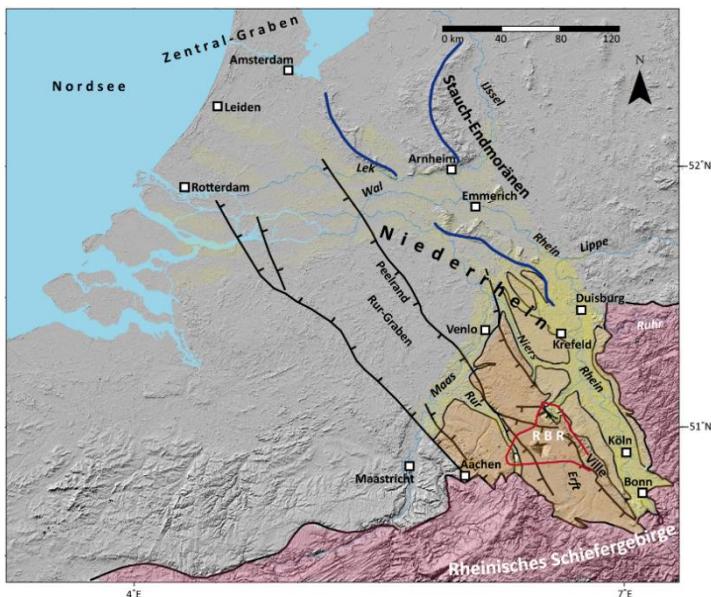


Abb. 6: Übersichtskarte der Niederrheinischen Bucht und der Niederlande mit Lage der wichtigsten Störungszonen und Position der Eisrandlagen

3. Die geologische Geschichte und die mögliche Zukunft des Rheins

Das Rheinsystem entwickelte sich in seinem nördlichen und südlichen Teil zunächst unabhängig voneinander. Mit der Auffaltung der Alpen entstand im nördlichen Vorland ein Becken, welches zunächst (vor ca. 30 Mio. Jahren) ebenso eine Meeresbucht darstellte wie der Oberrheingraben zur gleichen Zeit. Vor etwa 14 Mio. Jahren fiel das Vorlandbecken endgültig trocken und es etablierte sich ein Flußsystem, welches nach Westen entwässerte. Mit der Auffaltung des Jura-Gebirges vor etwa 9 Mio. Jahren

wurde die Entwässerung nach Osten umgeleitet, der Alpenrhein und die Aare flossen der Donau zu. Die Aare durchbrach vor etwa 4 Mio. Jahren das Jura-Gebirge, floss zu dieser Zeit aber zusammen mit dem Doubs durch die Burgundische Pforte der Bresse/Rhône zu.

Zu dieser Zeit hatte sich im Norden bereits ein Vorläufer des Rheins entwickelt, dessen Hauptzuläufe der Mosel und dem heutigen Oberrhein bis nördlich des Kaiserstuhls entsprechen. Auch die Maas floß diesem System im Bereich der Niederrheinischen Bucht zu, welche ihre Mündung zu dieser Zeit etwa im Gebiet der heutigen Grenze zu den Niederlanden hatte. Hebungen der Erdkruste nördlich des Juras führten vor etwa 2,6 Mio. Jahren zu einer Umleitung der Aare in Richtung Norden, die damit die Alpen an das Rheinsystem anhängte. Möglicherweise floß der obere Teil des Alpenrheins über die Walensee-Passage bereits diesem System zu, der untere Teil entwässerte aber noch in Richtung Donau. Erst die Vergletscherungen des Eiszeitalters schufen das heutige Entwässerungsnetz.

Bis Ende des 18. Jhd. war der Rhein in vielen Bereichen ein verästelter Fluß mit weiten Auen- und Überschwemmungsgebieten. Wie fast überall in Mitteleuropa wurden die aus heutiger Sicht ökologisch wertvollen Gebiete weitgehend zerstört, um für den Menschen bessere Lebensbedingungen zu schaffen und wirtschaftlichen Aspekten zu dienen. Zu dieser Zeit wurden die teilweise bereits zu dieser Zeit diskutierten nachteiligen Nebeneffekte der Flußregulierung oft unterschätzt. Erst mit dem vermehrten ökologischen Bewußtsein seit den 1980er Jahren wird vermehrt über eine teilweise Rückführung zu naturnäheren Bedingungen nachgedacht. Diese erfolgte bisher aber nur punktuell. Dabei müssen neben rein ökologischen auch verschiedene den Menschen betreffende Aspekte wie Schiffbarkeit, Stromproduktion durch Wasserkraft, Hochwasserschutz und die Nutzung des Rheinuferbereiches zur Erholung berücksichtigt werden. Für eine nachhaltige Umgestaltung ist jedoch ein tiefgreifendes Verständnis der natürlichen Dynamik des komplexen Ökosystems Rheinauen notwendig, sowohl aus biologischer als auch aus flußdynamischer Sicht.

Betrachtet man geologische Zeitskalen, so wird die seit Ende der letzten Eiszeit laufende Auffüllung des Bodensees mit Schutt aus den Alpen in etwa 20.000 Jahren abgeschlossen sein. Wie sich der Rhein im Großen dann weiter entwickeln wird, läßt sich wegen der mangelnden Kenntnis über zwei entscheidende Parameter jedoch nur skizzieren. Betrachtet man den oberen Teil des Rheins, d.h. bis etwa zum Kaiserstuhl, sind die zukünftige Klimaentwicklung und die Bewegungstendenzen in der Erdkruste die entscheidenden Faktoren. Unter natürlichen Bedingungen würde es sehr wahrscheinlich innerhalb einiger 10.000 Jahre wieder zu einer weiträumigen Vergletscherung der Alpen kommen. Die massive Emission von Klimagasen durch den Menschen könnte jedoch zu einer langfristigen Erwärmung des Planeten führen, die dies unterbindet. Allerdings ist die komplexe Interaktion der einzelnen Klimagase mit der Atmosphäre, den Ozeanen und auch der Landoberfläche nur in Ansätzen verstanden, weshalb derzeit das Auftreten zukünftiger Eiszeiten durchaus möglich erscheint. Noch vom Menschen beeinflusst, könnten eine verstärkte Hebung der Alpen oder des Juras sowie eine Absenkung des Oberrheingrabens langfristig einen Einfluß auf den Rhein haben. So ist unter gewissen geologischen Rahmenbedingungen vorstellbar, daß die Aare der Rhône zugeleitet würde, wodurch der Rhein einen Großteil

seines Zuflusses im Oberlauf verlieren würde. Allerdings könnte der Mensch durch bauliche Maßnahmen Derartiges relativ leicht unterbinden, weshalb solche Szenarien sehr spekulativ sind.

Literatur

- Baales M., Jöris M., Street M., Bittmann F., Weninger B., Wiethold J. 2002. Impact of the Late Glacial Eruption of the Laacher See Volcano, Central Rhineland, Germany. *Quaternary Research* 58, 273–288.
- Boenigk W., Frechen M. 2006. The Pliocene and Quaternary fluvial archives of the Rhine system. *Quaternary Science Reviews* 25, 550–574.
- Ellwanger D., Wielandt-Schuster U., Franz M., Simon T. 2011. The Quaternary of the southwest German Alpine Foreland (Bodensee-Oberschwaben, Baden-Württemberg, Southwest Germany). *E&G Quaternary Science Journal* 60, 306–328.
- Graf H.R. 2009. *Stratigraphie von Mittel- und Spätpleistozän in der Nordschweiz*. Bundesamt für Landestopographie.
- Hemmerle H., May J.-H., Preusser F. 2016. Übersicht über die pleistozänen Vergletscherungen des Schwarzwaldes. *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau* 106, 31–67.
- Kaltenbrunn A., Preusser F. 2015. Überblick über die quartären Vergletscherungen der Vogesen. *Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau* 105, 9–35.
- Preusser F., Reitner J., Schlüchter C. 2010. Distribution, geometry, age and origin of overdeepened valleys and basins in the Alps and their foreland. *Swiss Journal of Geosciences* 103, 407–426.
- Preusser F., Graf H.R., Keller O., Krayss E., Schlüchter C. 2011. Quaternary glaciation history of northern Switzerland. *E&G Quaternary Science Journal* 60, 282–305.
- Wimmenauer W. 2003. *Geologische Karte von Baden-Württemberg, Erläuterungen zum Blatt Kaiserstuhl*. 280 p., Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg i. Br.