

Zeitschrift: Berichte der St. Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft
Herausgeber: St. Gallische Naturwissenschaftliche Gesellschaft
Band: 92 (2015)

Artikel: Die bruchlose Deformation der Muscheln aus der St. Galler Meeresmolasse als Ursache von Fehlbestimmungen
Autor: Sulser, Heinz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-832648>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 06.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die bruchlose Deformation der Muscheln aus der St.Galler Meeresmolasse als Ursache von Fehlbestimmungen

Heinz Sulser

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	305
Abstract.....	305
1 Einleitung.....	306
2 Die St.Gallen-Formation.....	306
3 Die Fossilien der St.Gallen-Formation.....	307
4 Die Deformation von Gesteinsschichten und ihrer Fossilien im allgemeinen...	308
5 Der Spezialfall der bruchlosen Deformation.....	309
6 Die Grundlagen der bruchlosen Deformation.....	311
7 Von der Theorie zum Experiment....	313
8 Versuch einer taxonomischen Revision der Muschelfauna.....	314
9 Schlussbemerkungen und Ausblick....	316
Anhang.....	320
Dank.....	321
Literaturverzeichnis.....	322

Kurzfassung

Die unsichtbare plastische Deformation von Fossilien in tektonisch beanspruchten Gesteinen konnte FANCK (1929) an Muscheln der St.Galler Oberen Meeresmolasse nachweisen. Diese Arbeit blieb weitgehend unbekannt und soll in diesem Artikel nachgezeichnet werden. Die nicht leicht erkennbare Fossildeformation kommt im allgemeinen selten vor und hängt von verschiedenen Bedingungen ab. Im Untersuchungsgebiet führte sie zu einer grossen Zahl von Muschelarten, die allein auf tektonischen Formveränderungen beruhen und keine Arten im biologischen Sinne sind. FANCKs methodische Ansätze führten zu dieser wichtigen paläontologischen Erkenntnis. Nachfolgende Forschungen an Gesteinen der St.Gallen-Formation bestätigten dies und lieferten quantitative Daten zum tektonischen Druck auf das Sediment. Auf neuere computer-gestützte Methoden zur Erfassung von deformierten Fossilien und zur Rekonstruktion der Normalgestalt wird kurz hingewiesen.

Abstract

The invisible plastic deformation of fossils in tectonically altered rocks was shown by FANCK (1929) in investigating bivalves of

the ‹Obere Meeresmolasse› of St.Gall. This work remained nearly unknown and is called in mind in the present article. This kind of fossil deformation which is not easily recognizable is rather rare and depends on special conditions. In the study region a great number of species was described which alone based on tectonically changed forms and are no species in the biological sense. FANCK's methods lead to this important paleontological result. Successive studies of rocks of the St.Gallen formation confirmed this and supplied quantitative data of the tectonic impact on the sediment. New computer-based methods to recognize deformed fossils and to reconstruct the original shape are shortly discussed.

1 Einleitung

Die Muscheln sind die häufigsten, seit langem bekannten Fossilien der Oberen Meeresmolasse von St.Gallen. Der Paläontologe KARL MAYER (1826–1907) befasste sich über Jahre mit deren Bestimmung. Die von ihm publizierte grosse Zahl von Arten löste zunächst Erstaunen über diese Fundregion mit einer unerwartet hohen Biodiversität aus. Bald meldeten sich in der Fachwelt jedoch Zweifel, ob es sich bei diesen vielen Formen wirklich um Arten im eigentlichen Sinne handelte. Solche Zweifel hatte auch der Professor für Geologie H. SCHARDT am damaligen Polytechnikum (heute ETH) in Zürich, der 1912 seinem Doktoranden ARNOLD FANCK (1889–1974) die Aufgabe zuwies, die St.Galler Muschelfauna erneut zu untersuchen. FANCKs Ergebnisse führten zur Entdeckung des Phänomens der bruchlosen Deformation, welche als Ursache einer ungerechtfertigten ‹Artenvermehrung› erkannt wurde. Diese damals neuartige und originelle Methode zur Lösung eines speziellen Problems der Paläontologie soll im folgenden Beitrag wieder in Erinnerung gerufen werden.

2 Die St.Gallen-Formation

In der noch heute lesenswerten ‹Urwelt der Schweiz› widmete OSWALD HEER (1879) den Fossilien der Oberen Meeresmolasse von St.Gallen ein eigenes Kapitel. Er beschrieb die Fundstellen, die Eigenart und den Reichtum dieser vorwiegend aus Muscheln und Schnecken bestehenden Fauna recht treffend, indem er den Leser an eine Meeresküste führt, die einem Wattenmeer gleicht und wo sich auf dem schlammigen, wenig bewegten Grund einst grosse Mengen dieser Weichtiere ansammeln konnten. Die geologisch-stratigraphische Bearbeitung dieser marinen Ablagerungen des Tertiärs in der Umgebung von St.Gallen begann mit den Arbeiten von LUDWIG & FALKNER (1902/03) und der Herausgabe einer geologischen Karte (FALKNER & LUDWIG 1903/04). Weitere Beiträge dieser und anderer Autoren folgten. Die geologische Erforschung fand einen gewissen Abschluss mit den Publikationen von BÜCHI & HOFMANN (1945) und BÜCHI (1955), in denen die zeitliche und räumliche Abfolge der Schichten und deren Gesteinscharakter klar dargestellt wurden. Danach lassen sich eine ältere und eine jüngere Stufe (ehemaliges ‹Burdigalien› bzw. ‹Helvétien›¹) unterscheiden, die als Obere Meeresmolasse (Frühes Miozän der Tertiärzeit) zusammengefasst werden. Neuere Arbeiten zur stratigraphischen Feingliederung und zu den Sedimentationsverhältnissen im ganzen schweizerischen Molassebecken finden sich in KELLER (1989). In paläogeographischer Hinsicht lag der Ablagerungsraum der St.Gallen-Formation in der westlichen bis mittleren Paratethys. Sie entstand vor ca. 20,5–16 Millionen Jahren.

Die reichhaltigsten Fossilienfundgebiete befinden sich nach BÜCHI (1955) im ehemaligen Helvétien (heute Spätes Burdigalian) in Bänken der sogenannten Plattensandsteine

¹Das ‹Helvetien› von MAYER-EYMAR (1858), mit Typusprofil Imihubel westlich Belpberg, konnte sich als chronostratigraphische Stufe des Miozäns international nicht durchsetzen und wurde durch das jüngere Burdigalian ersetzt.

(teilweise auch in der Zone der sogenannten Schiefermergel) bei Hagenbuch («Muschelberg»), beim Tivoli und an der heute nicht mehr zugänglichen Steingrube im Osten der Stadt. Neue fossilreiche Aufschlüsse ergaben sich vor kurzem bei der Überbauung Birnbäumen. An verschiedenen weiteren Lokalitäten östlich und südlich von St. Gallen stehen Sandsteine und Mergelsande des Frühen Burdigalian an, die eine weniger artenreiche, vor allem aus Herzmuscheln (*Cardium*) und Austern (*Ostrea*) bestehende Fauna enthalten. Mit der St. Gallen-Formation altersgleiche Ablagerungen mit einer ähnlich zusammengesetzten Fauna kennt man aus der Umgebung von Luzern (Rotsee-Schichten) und vom Belpberg (Belpberg-Schichten) südöstlich von Bern (Abbildung 1). Letztere wurde von PFISTER & WEGMÜLLER (1994/1998/1999/2000/2001) eingehend neu bearbeitet und taxonomisch revidiert.

3 Die Fossilien der St. Gallen-Formation

Wie schon erwähnt, besteht die Fauna der St. Gallen-Formation zum grössten Teil aus Muscheln (Bivalvia, früher Pelecypoda genannt) und Schnecken (Gastropoda). Bryozoen, Seeigel, Brachiopoden, sowie Zähne von Haien und Rochen und Reste von Krebsen sind vergleichsweise selten.

Viele Muscheln sind nur als Einzelklappen überliefert, da sich das aus organischer Substanz bestehende und die Klappen zusammenhaltende Ligament im Laufe der Fossilisierung zersetzte. Über mehr als ein Jahrzehnt arbeitete MAYER, der sich später MAYER-EYMAR nannte, an der Bestim-

mung der Muscheln aus der St. Galler Meeresmolasse. 1872 stellte er ein systematisches Verzeichnis zusammen, das die enorme Zahl von über 400 verschiedenen Arten enthielt. Obschon MAYER Gesteinsplatten mit mehreren artgleichen, aber unterschiedlich orientierten Individuen, die alle ein wenig anders aussahen, vor sich hatte, zog er nicht den Schluss, dass Gesteinsbewegungen die Fossilien modelliert haben könnten (Abbildung 2). Es scheint, dass der erfahrene Paläontologe zuletzt selber nicht mehr an diese riesige Artenfülle glaubte. In manchen seiner Hunderten von Schachteln, in denen er das Material zu ordnen versucht hatte, befanden sich Etiketten mit unterschiedlichen Artangaben, und er fand offenbar kaum zwei Exemplare mit annähernd übereinstimmenden Merkmalen, die er unter einer einzigen Art zusammenfassen konnte. Nun beruht in der Paläontologie die Artabgrenzung allein auf morphologischen Kriterien der fossil erhaltungsfähigen Hartteile. Zu MAYERs Zeit war die Tendenz, die Benennung einer Art eng auf ein dazu festgelegtes Typusexemplar zu fixieren, noch sehr ausgeprägt. So viel muss zu MAYERs Entlastung für seine Fehldiagnosen mit ins Uferlose führenden Bestimmungsversuchen gerechterweise erwähnt werden. Tatsächlich sind noch heute die Taxonomen unter den Paläontologen damit beschäftigt, überflüssige Namengebungen als Synonyme zu erkennen und auszuschliessen.

Wenn MAYER den St. Galler Muscheln letztlich auch ratlos gegenüberstand und ein unabgeschlossenes Werk hinterliess, schaffte er damit doch den Anreiz, wie in der Forschung häufig, ein ungelöstes Problem von

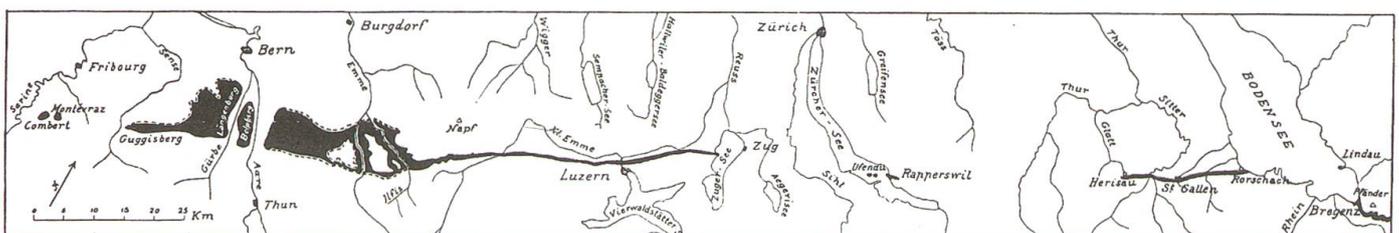


Abbildung 1:

Die Verbreitung der subalpinen Meeresmolasse quer durch die Schweiz (unsichere Gebiete gestrichelt markiert). Nach RUTSCH (1929).

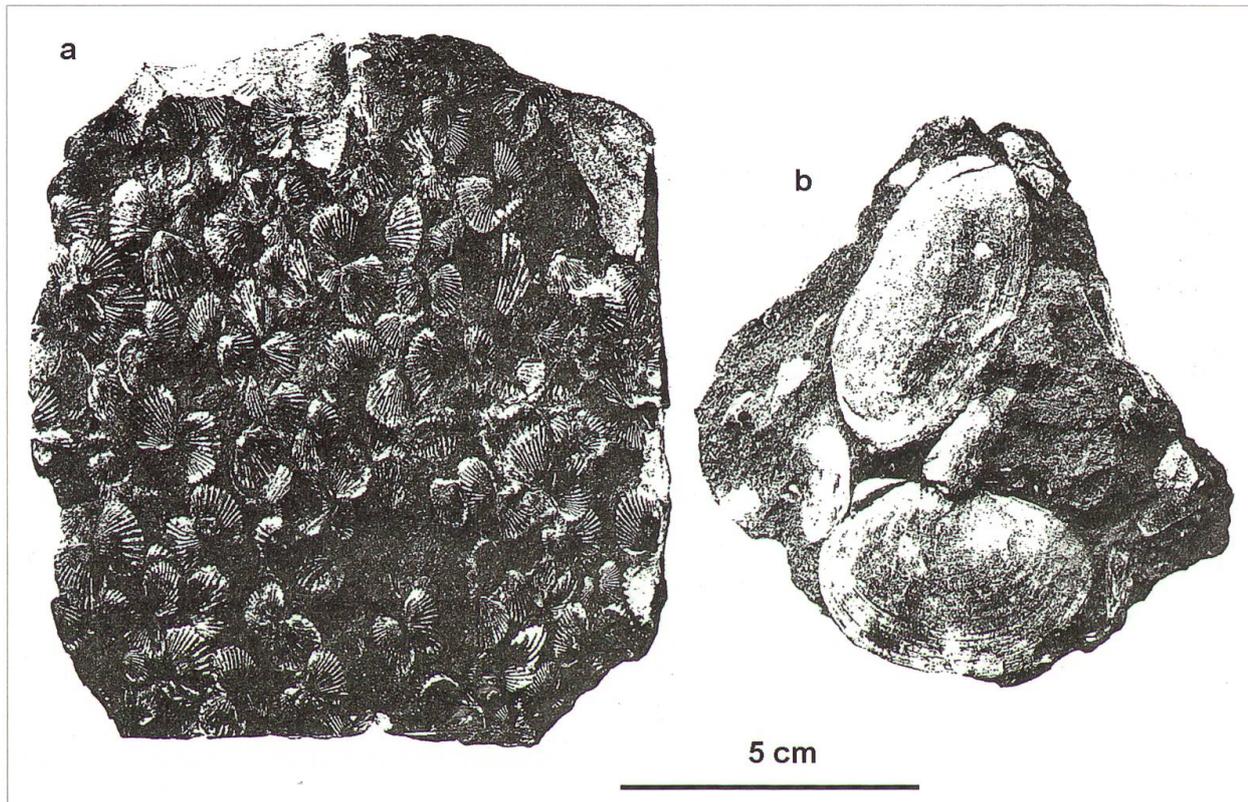


Abbildung 2:
Gesteinsplatten mit Muscheln in verschiedener Lage und in voneinander abweichender Gestalt. a: *Cardium commune* MAYER, zahlreiche juvenile Stadien. b: *Lutraria sanna* BASTEROT, zwei nahezu rechtwinklig zueinander liegende Exemplare. Nach FANCK (1929).

einer neuen Seite anzupacken. Die Lösung ist die Entdeckung der sog. bruchlosen Deformation.

An dieser Stelle mag sich der Leser fragen, warum die in der St.Galler Meeresmolasse ebenfalls häufigen Schnecken das kleinere Bestimmungsproblem stellten. Die Schneckenschale besitzt im allgemeinen mehr und charakteristischere Merkmale, die durch Deformation zwar ebenso verändert werden, aber ihren diagnostischen Wert besser beibehalten, z. B. Schalenornamente, wie Streifen, Gittermuster (Höcker, Stacheln), die Gestalt der Mundöffnung, der Mundsaum usw. (siehe dazu z.B. RUTSCH 1929). Bei fossilen Muscheln stützt sich die Bestimmung hauptsächlich auf die Schalenform: sie ist gleich- oder ungleichklappig, gleich- oder ungleichseitig, die Klappen mehr oder weniger gewölbt,

der Wirbel stumpf oder spitz, alle Merkmale, die sich bei Deformation verändern und ihren Bestimmungswert verlieren. Weitere Kriterien wie die auf der Schaleninnenseite liegenden Zahn- und Zahngrubenmuster des Schlosses sind bei den nicht optimal erhaltenen St.Galler Muscheln nur selten vorhanden.

4 Die Deformation von Gesteinsschichten und ihrer Fossilien im allgemeinen

Es gibt verschiedene Kräfte, die zu einer Gesteinsdeformation führen. Die wichtigsten sind tektonisch oder diagenetisch (durch das Sedimentgewicht) bedingt.

Verbreitet ist der tektonische Druck, der im Zusammenhang mit der Auffaltung von Gebirgen steht. Je nach Festigkeit des Ge-

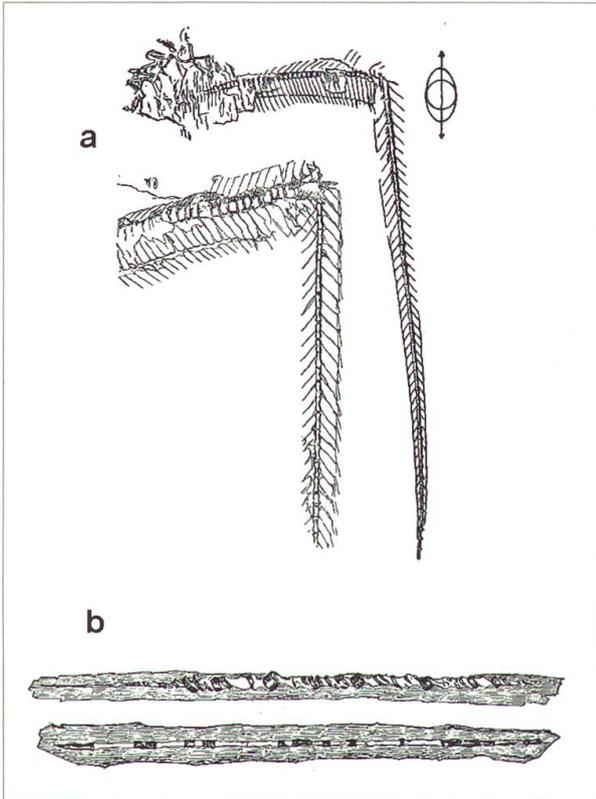


Abbildung 3:
Beispiele von Fossilien, die durch Gesteinsbewegungen verändert wurden. a: Glarner Fische *Lepidopus glarisianus* (BLAINVILLE) mit geknickten Wirbelsäulen (ca. $\frac{1}{4}$ Grösse). b: Belemniten mit schieferm Bruch (oben) und Längsstreckung (unten), ca. $\frac{1}{2}$ Grösse. Nach WETTSTEIN (1886) und HEIM (1878), modifiziert.

steins führen tektonisch ausgelöste Bewegungen zu einem spröden Bruch oder einer teilweisen Zerstörung der eingeschlossenen Fossilien. Ein besonders eindruckliches Beispiel von mässiger Gesteinsstreckung lieferte WETTSTEIN (1886) durch seine Untersuchungen der berühmten Glarnerfische im eozänen Tonschiefer von Engi. Skelette des langen und schmalen Strumpfbandfisches *Lepidopus glarisianus* (BLAINVILLE) wurden oft in einem Zustand mit geknickter Wirbelsäule geborgen, so dass der eine Teil in einem schiefen Winkel absteht. Das Phänomen konnte dadurch erklärt werden, dass das Gestein durch den Gebirgsdruck unter Schieferbildung ausgezogen und der betroffene Teil des Skeletts gestreckt wur-

de (Abbildung 3a). ALBERT HEIM (1878) zeigte in seinen Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung ein anderes Beispiel von Gesteinsstreckung, bei dem ein Belemnit zerstört, sozusagen «in Stücke gerissen» wurde. In diesem Falle war das Gestein, in dem das Fossil eingeschlossen war, offenbar schon vor der Deformation hart (Abbildung 3b).

Die diagenetische Deformation entsteht durch die wachsende Last der Sedimente und führt zu einer Kompaktion der Ablagerungen. Dabei wird ein im Sediment liegendes Fossil je nach Verhärtungsgrad und Gewicht des überlagernden Materials in unterschiedlichem Ausmass verformt. Hartteile eines zur Schichtebene horizontal liegenden Fossils, wie die Kalkschalen von Weichtieren, Stachelhäutern und Brachiopoden oder Skeletteile von Wirbeltieren werden bei diesem Druck von oben plattgedrückt.

5 Der Spezialfall der bruchlosen Deformation

Wenn Gesteinsbewegungen an Fossilien keine eindeutigen Spuren, wie Bruch oder Beschädigungen hinterlassen, ist es dennoch möglich, dass sie, nicht unmittelbar erkennbar, bruchlos verformt wurden. Dazu müssen gewisse Voraussetzungen erfüllt sein. Im Falle von zweiklappigen Schalentieren wie den Muscheln musste das Schalenmaterial aufgelöst oder so weit abgebaut sein, dass das Fossil als Steinkern, d.h. als Sedimentausguss des ursprünglichen Schalenhohlraums (ohne die Weichteile) erhalten blieb oder das noch beschalte Fossil eine so dünne, biegsam gewordene Schale trug, dass sie unter dem Deformationsprozess nicht zerbrach. Ferner musste die Festigkeit des Sediments, welches das Fossil umgab, und des Fossils selber zur Zeit der aufkommenden tektonischen Bewegungen (Jahrmillionen später!) so beschaffen sein, dass sie die Erhaltung des Fossils und dessen plastische Verformbarkeit möglich machten. Alle diese Voraussetzungen waren

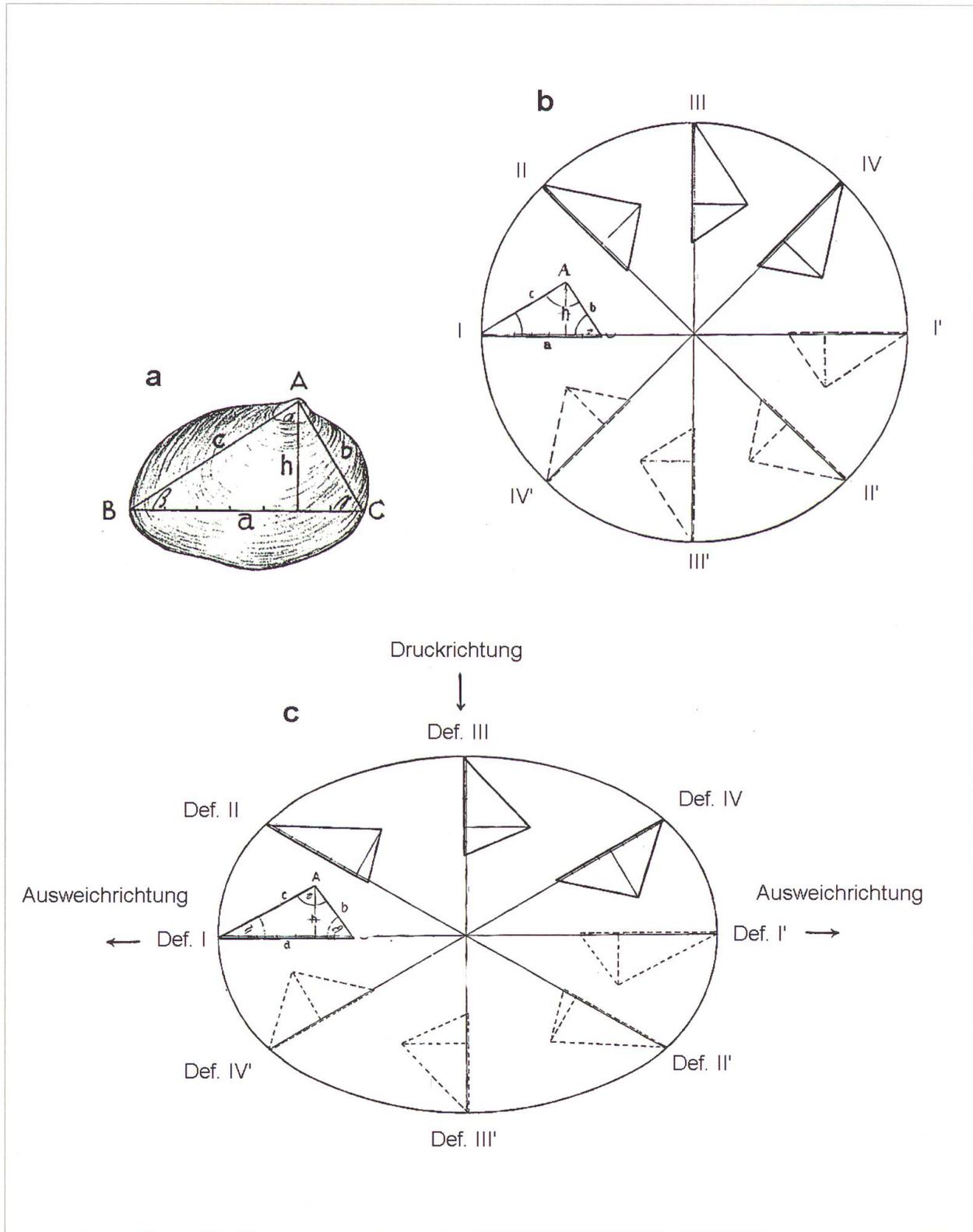


Abbildung 4:
 Schematisierte Darstellung der Deformation einer Muschel durch Gesteinsdruck in Abhängigkeit von ihrer Lage. a: Stilisierte Muschel mit eingezeichnetem Dreieck. b: Anordnung des Muscheldreiecks in verschiedenen Lagen (I–IV und I'–IV') in einem Kreis. c: Durch senkrechten Druck und laterale Ausdehnung entstandene Ellipse mit den deformierten Muscheldreiecken (Deformationstypen Def. I–IV und Def. I'–IV'). Nach FANCK (1929), modifiziert.

bei den St. Galler Molasse-Muscheln, die epibenthisch auf Sand oder Geröllböden oder im Sediment eingegraben lebten (HÖLTKE 2009), offenbar gegeben. Aus Aragonit bestehende Schalen wurden meist bis auf weisse kreidige Reste auf der Oberfläche der Steinkerne aufgelöst. Bei Muscheln aus dickerem und härterem kalzitischem Schalenmaterial musste das dichte Gefüge so weit geschwächt sein, dass die Muschel, zum Teil noch mit Schalenresten als Ganzes verformbar geworden war. In diesem Falle bildeten sich Prägekerne².

6 Die Grundlagen der bruchlosen Deformation

FANCK (1929) erarbeitete eine Methode zur Erfassung der bruchlosen Deformation in der Absicht, die Gültigkeit der Muschelarten in MAYERs Verzeichnis zu überprüfen. In der Theorie stellt sich die Frage, welche Veränderungen eine Muschel erleidet, d.h. welche neuen Formen aus ihr entstehen, wenn sie in allen möglichen Lagen zur Druckrichtung im Sediment eingebettet ist.

Um diese Frage zu veranschaulichen, denkt man sich eine stilisierte Muschelklappe mit eingezeichnetem ungleichseitigen Dreieck als Fläche (Abbildung 4a). Ordnet man dieses Modell in verschiedenen Lagen (I – IV) in einem Kreis an (Abbildung 4b) und verformt diesen durch Zusammendrücken der vertikalen Achse zu einer Ellipse (Abbildung 4c), so nehmen die Muscheln und deren Dreiecke eine andere Gestalt an, die als Deformationstypen (Def. I – IV) bezeichnet werden. In Def. I ist eine breitere und weniger hohe Form entstanden (a = maximal verlängert, h = maximal verkürzt). Def. III ist weniger breit und höher (a = maximal verkürzt, h = maximal verlängert). Der stumpfe Winkel α des Dreiecks von Def. I ist in Def. III spitz geworden. Unverändert geblieben

gegenüber der ursprünglichen Form ist bei Def. I und Def. III die Position des Scheitels A über der Basis a , oder, auf die Muschel bezogen, die Position des Wirbels über dem unteren Klappenrand. Zwischen den Deformationstypen Def. I und Def. III liegen Def. II und Def. IV. Charakteristisch an Def. II ist die Verschiebung des Scheitels bzw. des Wirbels der Muschel nach der Seite und umgekehrt in Def. IV nach der Mitte hin. Die Muschel von Def. II hat sich zu einer schiefere, asymmetrischeren, bei Def. IV zu einer symmetrischer werdenden Schalenform verändert. Alle denkbaren Lagemöglichkeiten in Bezug auf die Druckrichtung liegen zwischen diesen vier Deformationstypen I – IV. (Für die gestrichelt gezeichneten Dreiecke I' – IV' und deren Deformationstypen gelten dieselben Verformungsarten).

Wurde bisher nur die Projektion der Muschel auf eine Ebene betrachtet, so müssen Muscheln mit zwei ungleichen Klappen, die einer Verformung ausgesetzt werden, räumlich erfasst werden. Wird eine Muschel mit herzförmigem Querschnitt in verschiedenen Positionen und mit Schnitt zwischen den Klappen senkrecht auf einen Kreis projiziert, so muss man sich diesen als Kugel denken. Senkrecht dazu kann man sich vier Ebenen denken, die sich im 45°-Winkel schneiden (Abbildung 5a). Wird nun die Kugel entlang dem Durchmesser zu einem dreiaxigen Ellipsoid zusammengedrückt (Abbildung 5b), so entstehen aus allen Kreisebenen wiederum Ellipsen mit den schon früher dargestellten Deformationstypen. Jeder der vier durch den Druck veränderten Herzformen können dann den früher definierten Deformationstypen zugeordnet werden. Def. I ist platt gedrückt, Def. II mit seitlich verschobenen Wölbungen, Def. III ist verdickt und Def. IV entspricht Def. II mit spiegelbildlich verschobenen Wölbungen (Abbildung 5b). Ohne Berücksichtigung von Def. I' bis IV' erhält man für die räumliche Gestalt der Muschel

²Steinkerne sind Abdrücke der Innen-, Prägekerne solche der Aussenschale.

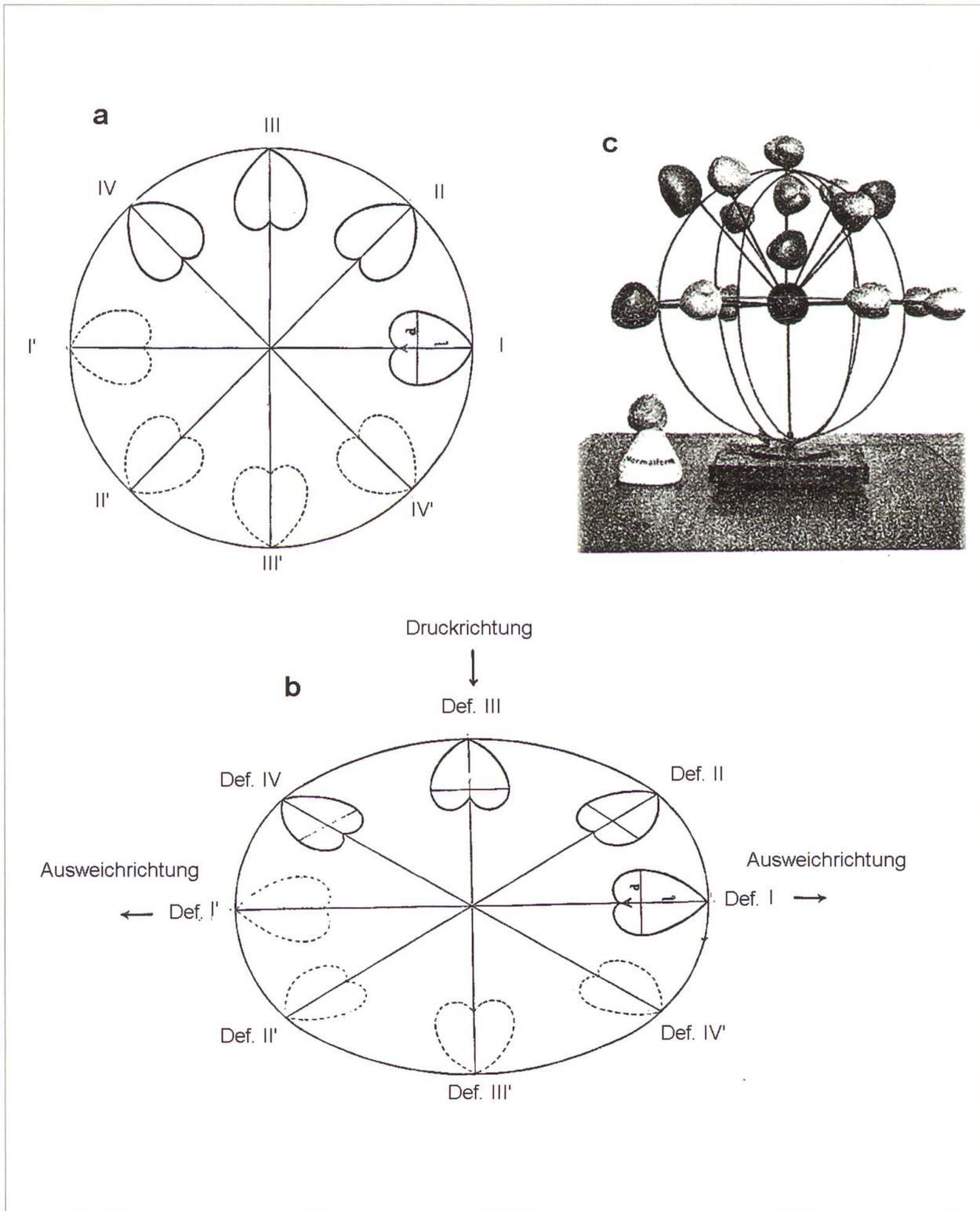


Abbildung 5:

Wie Abbildung 4, aber in räumlicher Darstellung. a: Anordnung eines Muschelquerschnitts in verschiedenen Lagen (I–IV und I'–IV') auf je vier sich schneidenden Ebenen einer Kugel (diese als Querschnitt dargestellt). b: Durch senkrechten Druck und laterale Ausdehnung entstandenes Ellipsoid mit den deformierten Muscheldreiecken (Deformationstypen Def. I–IV und Def. I'–IV'). c: Räumliche Wiedergabe der 16 deformierten Grenzformen, die aus der Normalform (links unten) entstanden sind. Nach FANCK (1929), modifiziert.

das in Abbildung 5c dargestellte Modell mit 16 Grenzformen, zwischen denen sich alle möglichen Übergänge befinden.

7 Von der Theorie zum Experiment

Im vorangehenden Kapitel wurden die Deformationserscheinungen an stilisierten Muscheln sichtbar gemacht. Doch eine gute Vorstellung über die möglichen Formen, die aus einer bestimmten Muschelart beim Verformungsprozess entstehen können, lässt sich nur anhand von Experimenten gewinnen. Wie bei der Erarbeitung der Grundlagen ging FANCK auch hier in zwei Schritten vor.

Die Bestimmung flacher Muscheln beruht vor allem auf Merkmalen der Muschelklappen. Die Symmetrieebene der Muscheln verläuft zwischen der rechten und linken Klappe, die sich spiegelbildlich von einander unterscheiden, aber sonst in allen Merkmalen identisch sind. Umriss, Lage des Wirbels und Schalenskulptur (wenn vorhanden) sind es, die an Deformationsformen erfasst werden müssen. Sie lassen sich gut auf eine Ebene projizieren. Zum Studium dieser Fälle wurde eine einfache, unmittelbar einleuchtende Vorrichtung entwickelt: eine zwischen zwei parallelen Leisten befestigte rechteckige Gummiplatte, die sich parallel auseinanderziehen und in einer bestimmten Position fixieren lässt. Auf die Gummiplatte wurde eine flache ca. 2 cm dicke Platte aus frischem verformbarem Glaserkitt mit guter Haftung auf die Gummiplatte gepresst. Auf dem noch weichen Kitt liessen sich in verschiedenen Lagen, wie schon dargelegt, negative Gipsabdrücke von Muscheln einprägen.

In Abbildung 6 ist das Gummiplatten-Experiment an einem Beispiel dargestellt. Mit gut erhaltenen Muscheln von *Paphia vetula* (BASTEROT) aus ungestörten Schichten des Burdigalian von Bordeaux (Westfrankreich) konnten die theoretisch zu erwartenden Deformationsformen erzeugt werden. Der Gipsabdruck der Normalgestalt wurde in den vier ausgewählten Positionen auf die

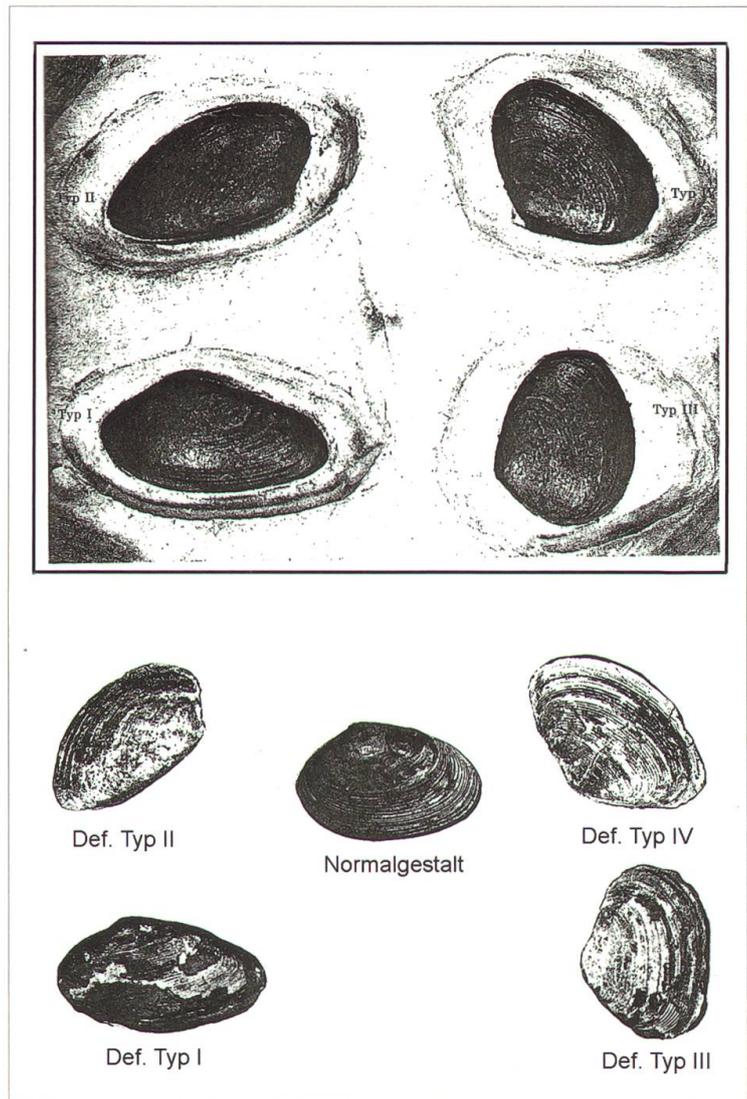


Abbildung 6:
Veranschaulichung des Gummi-/Kitt-Platte-Experiments an der Muschel *Paphia vetula* (BASTEROT) aus dem Burdigalian von Bordeaux. Oben: Ausschnitt der Gummiplatte nach dem Zug nach unten. Deformierte Negativ-Abdrücke in den Lagen Def. I–IV. Unten: Positiv-Abzüge der Deformationstypen Def. I–IV, um die Ausgangsmuschel herum angeordnet. Nach FANCK (1929).

Gummi-/Kittplatte gepresst und diese dann nach unten gezogen. Im unteren Teil der Abbildung sind die deformierten Gipsabdrücke rund um die Normalgestalt gruppiert.

Das Gummiplatten-Experiment kann auf flachschalige Muscheln, wie *Venus* und *Tapes* angewendet werden. Formveränderungen

an Muscheln von räumlicher Gestalt analysierte FANCK in einer speziell konstruierten Druckmaschine. Ein dazu erbautes Gerät lieferte, nach vielen Versuchen bei der Suche nach einem geeigneten Trägermaterial, schliesslich brauchbare Ergebnisse³. Damit konnte eine weiche Gesteinsmasse simuliert werden, die ähnlich wie ein unter tektonischem Druck stehendes Sediment reagiert. Aus Plastillin wurden Kopien der Muscheln hergestellt, im Gipsgemisch des Blocks in verschiedenen Lagen zur Druckrichtung eingebettet und dem Druck ausgesetzt. Nach der Erhärtung wurden die Plastillinmuscheln sorgfältig herauspräpariert. Die Versuche zeigten, dass die Verformungen in der erwarteten Weise erfolgt waren. Gegebenenfalls wurden die Plastillinformen zur besseren Handhabung in stabile Gipskopien umgewandelt (Fig 5c). Die Versuche mit der Druckkammer waren bedeutend aufwändiger als jene mit der Gummi-/Kittplatte und nur in wenigen Fällen auch wirklich nötig.

Mit diesen grundlegenden Experimenten konnten die tektonischen Kräfte nachgeahmt werden. Durch unterschiedliche Dehnung der Gummipatte und unterschiedlichen Druck am Druckapparat war die tektonische Wirkung variierbar. Im Gegensatz zur tektonisch bedingten Deformation, bei der ein Sediment durch Druck zusammengepresst wird, wird die Gummipatte durch Zug gedehnt. FANCK war schon bei seinen theoretischen Grundlagen davon ausgegangen, dass beim Zusammenpressen des Kreises (Abbildung 4) bzw. der Kugel (Abbildung 5) die Ellipse bzw. das Ellipsoid sich seitlich ausdehnen, d.h. die Gesteinsmasse bei der Deformation ihr ursprüngliches Volumen beibehält. So sind bei der Gummipatte Dehnung und Schrumpfung bei gleichbleibendem Flächenbetrag identisch, wobei nur die Lagen von Deformationstyp I und III gegen II und IV vertauscht sind (Abbildung 8d, e). Die Deformationsformen sind jedoch nicht mehr de-

ckungsgleich, wenn Dehnung bzw. Schrumpfung mit einer Zunahme bzw. Abnahme der Fläche erfolgen (vgl. Abbildung 8c und 8e bzw. 8b und 8d), ganz abgesehen von den willkürlichen Verschiebungsbeträgen. Wie die Sedimente der St.Gallen-Formation auf einen bestimmten tektonischen Druck reagierten, bis zu welchem Grad sie sich unter Volumenschwund zusammenpressen liessen und ob sich die tektonische Stossrichtung und damit das Spannungsfeld im Laufe der Zeit änderten, darüber konnte FANCK keine Angaben machen (Näheres dazu in Kapitel 9). Trotz diesen offenen Fragen versuchte er mit Erfolg, das Problem des Artenwirrwars der St.Galler Muscheln anzugehen.

8 Versuch einer taxonomischen Revision der Muschelfauna

FANCK prüfte die Eignung seiner Methoden für eine verlässliche Artbestimmung an Muscheln aus dem Tertiär von Bordeaux. Diese lassen sich hinsichtlich des geologischen Alters und der Artenzusammensetzung gut mit der Muschelfauna der St.Gallen-Formation vergleichen, und es konnte davon ausgegangen werden, dass sie tektonisch unbelastet sind.

Mit dem Gummi-/Kittplatten-Experiment konnten artspezifische Deformationsspektren hergestellt werden. Anschliessend wurde im Untersuchungsmaterial nach jenen Stücken gesucht, die, abgesehen von der Grösse, mit ihrer Form zu einem der Deformationstypen passen oder sich interpolierbar dazwischen befinden (Abbildung 9). Diese konnten dann als «Abkömmlinge» der Normalform erkannt und auf sie zurückgeführt werden. In vielen Fällen konnte diese Normalform auch in den St.Galler Muscheln identifiziert werden (Abbildungen 10–11). Dieses Verfahren kann – so die Argumentation von FANCK – durch Training von Anschauung und Intuition an einer grösseren

³Dieses Gerät ist eine abgeschlossene druckfeste Kammer, in der sich mittels eines Stempels Druck auf eine eingeschlossene Masse, bestehend aus einem langsam erhärtenden Gemisch aus Gips, Wasser und Sägemehl, ausüben lässt. Das spezielle Gemisch wurde nach vielen Fehlschlägen schliesslich als geeignetes Substrat für die darin einzubettenden Muscheln gefunden (Abbildung 7).

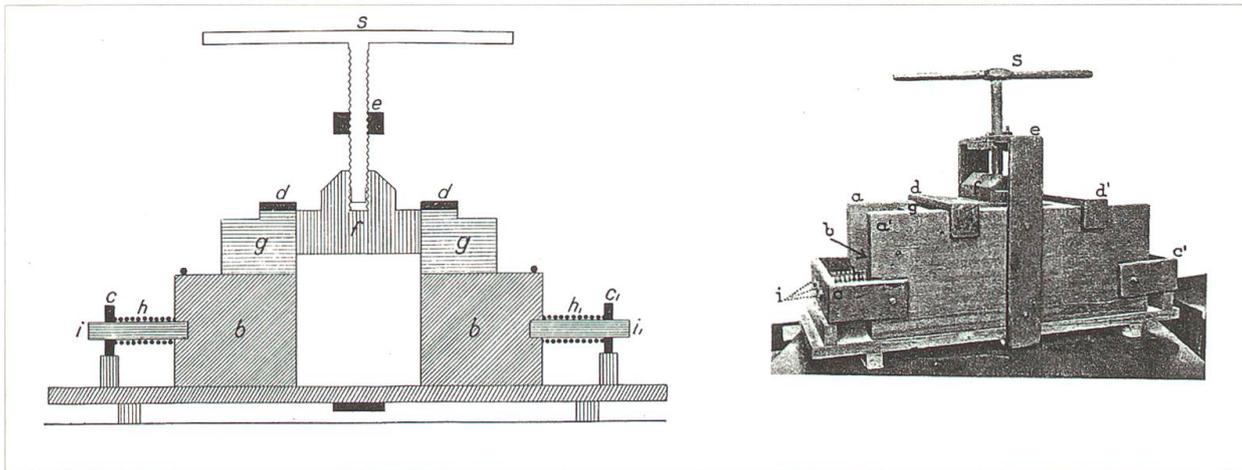


Abbildung 7:

Abbildung der Druckmaschine. Links: Schematischer Querschnitt mit dem an einem Gewinde (e) verschiebbaren Stempel (f), der sich auf das im Hohlraum befindliche «künstliche Sediment» pressen lässt. Dieses muss zwischen den zwei seitlichen Blöcken (b) und gegen den Widerstand (h und h') ausweichen. Rechts: Ansicht der massiv gebauten Druckkammer. Nach FANCK (1929).

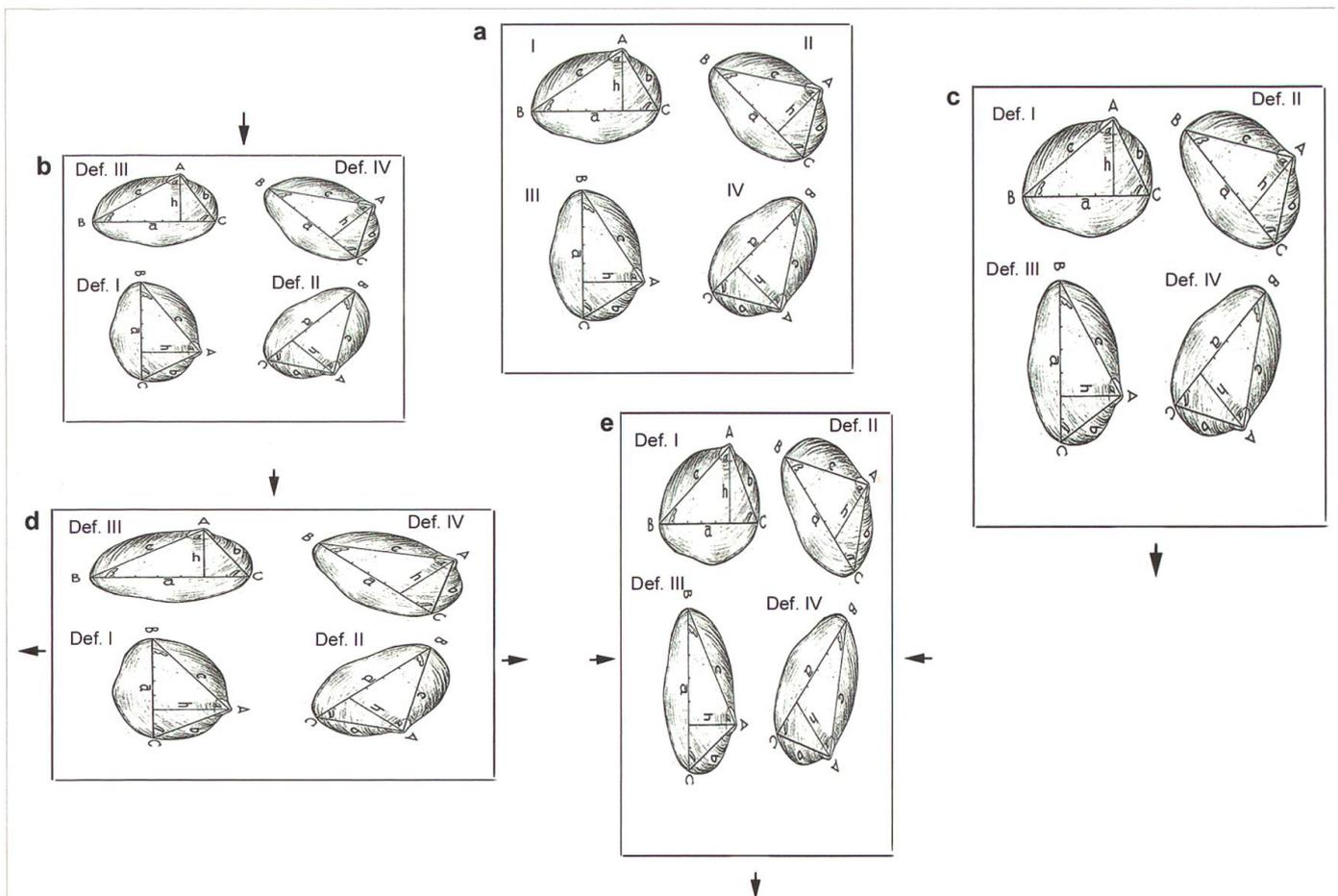


Abbildung 8:

Deformation durch Computer-Simulation. a: Muscheln mit eingezeichnetem Dreieck in den Lagen I-IV auf einer Fläche angeordnet. b, c: Verformungen in der Schubrichtung um $\pm 25\%$. b: Verkürzung, c: Verlängerung. Ausser Größenunterschieden (als Folge der Ab- oder Zunahme des Flächeninhalts) und vertauschten Lagen sind die deformierten Muscheln identisch. d, e: Verformungen wie in b und c, aber unter Beibehaltung des Flächeninhalts: d: durch Pressung von oben und seitlicher Dehnung, e: durch Zug nach unten und seitlicher Einengung. Die deformierten Muscheln sind identisch, wenn man die um 90° verschobenen Lagen Def. I-IV berücksichtigt.

Anzahl von Muscheln durchgeführt werden.

Ein Mangel in seiner Arbeit liegt darin, dass er die von MAYER als Arten bezeichneten Exemplare nicht namentlich als solche aufführte. Wahrscheinlich waren diese Daten in der Originalfassung seiner Arbeit vorhanden. Wie aus seiner Biographie (siehe Anhang) hervorgeht, ging diese Fassung in den Kriegswirren verloren. Er reichte 10 Jahre später eine gekürzte und zum Teil wohl aus Notizen zusammengestellte neue Version ein, die dann als Promotionsarbeit anerkannt wurde.

Von den 426 Arten in MAYERs Verzeichnis blieben noch 62 übrig, was einer Reduktion von 85% (!) entspricht. MAYER hatte allein für die St.Galler Funde 126 neue Arten aufgestellt. Bei einigen Gattungen ist die Artenreduktion besonders gross: *Mactra* (18 → 1), *Lutraria* (22 → 2), *Tellina* (13 → 1) und *Thracia* (14 → 1), *Pecten* und *Chlamys* (20 → 3), *Cardita* (14 → 1), *Cardium* und verwandte Gattungen (27 → 6).

In Tabelle 1 sind die von FANCK als gültig erklärten Bivalvenarten gemäss der teilweise noch in Revision befindliche Systematik aufgelistet.

9 Schlussbemerkungen und Ausblick

FANCKs Verdienst ist die Erkenntnis, dass eine zunächst als Hypothese aufgestellte Deformation tatsächlich stattgefunden hatte.

Seine Arbeiten blieben weitgehend unbekannt. Unabhängig entwickelte BAMBACH (1973) eine rechnerische Methode zur Erfassung plastisch deformierter Muschelabdrücke. Er erfasste die Form der Muschel mittels Länge, Höhe und Distanz zwischen Wirbel und vorderem Schalenende. In vier verschiedenen Lagen in einem Kreis angeordnet, wurden diese Abdrücke zur Ellipse verformt und die drei genannten Parameter dann berechnet. Danach wurde geprüft, ob sich diese Masse an bekannten Muschelarten als Resultat einer vermuteten Deformation nachweisen liessen.

Ziel dieser Arbeiten waren paläontologische Bereinigungen. In anderen, auf die Geologie fokussierten Untersuchungen wurden die Fossilien benutzt, um tektonische Deformationsprozesse besser zu verstehen. So bestimmte BREDDIN (1958, 1964) das Ausmass der Deformation der St.Galler

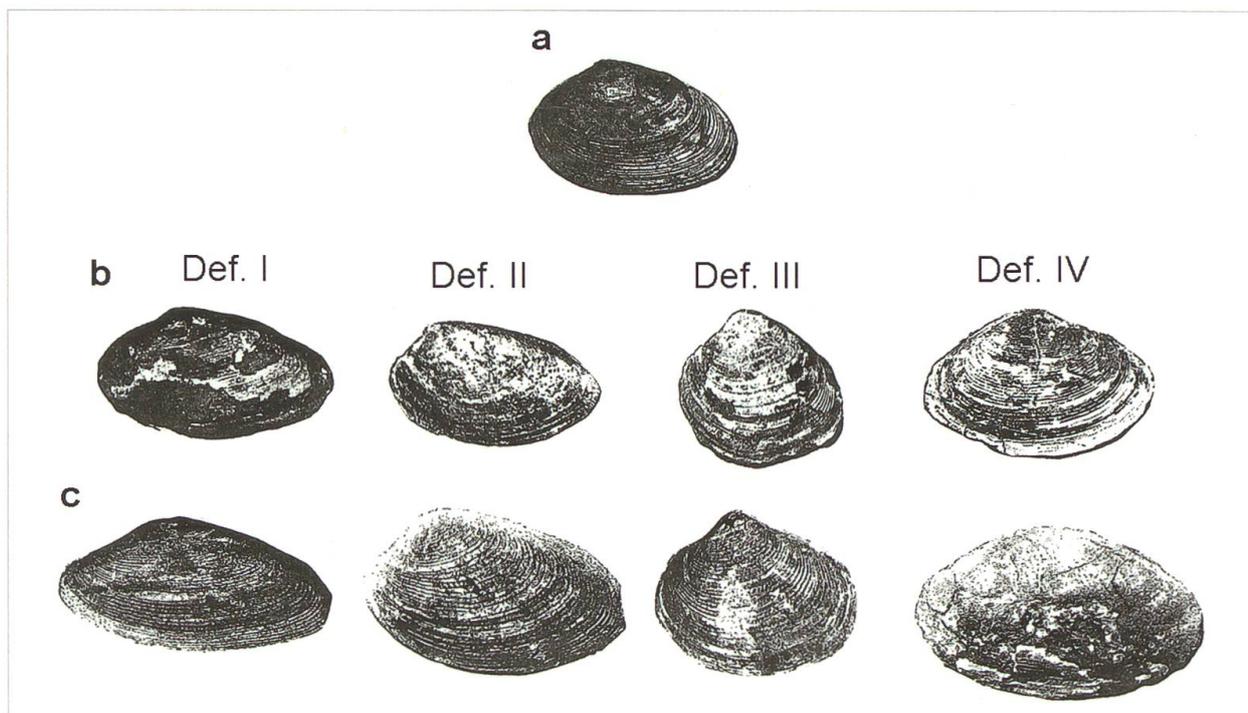


Abbildung 9: Deformationsreihe von *Paphia vetula* (BASTEROT). a: Normalgestalt eines Exemplars aus dem Burdigalium von Bordeaux. b: Zugehörige Deformationsreihe. c: Zugeordnete Exemplare aus der St.Galler Meeresmolasse. Zum leichteren Formvergleich wurden die unterschiedlichen Grössen zum Teil angepasst. Nach FANCK (1929), modifiziert.

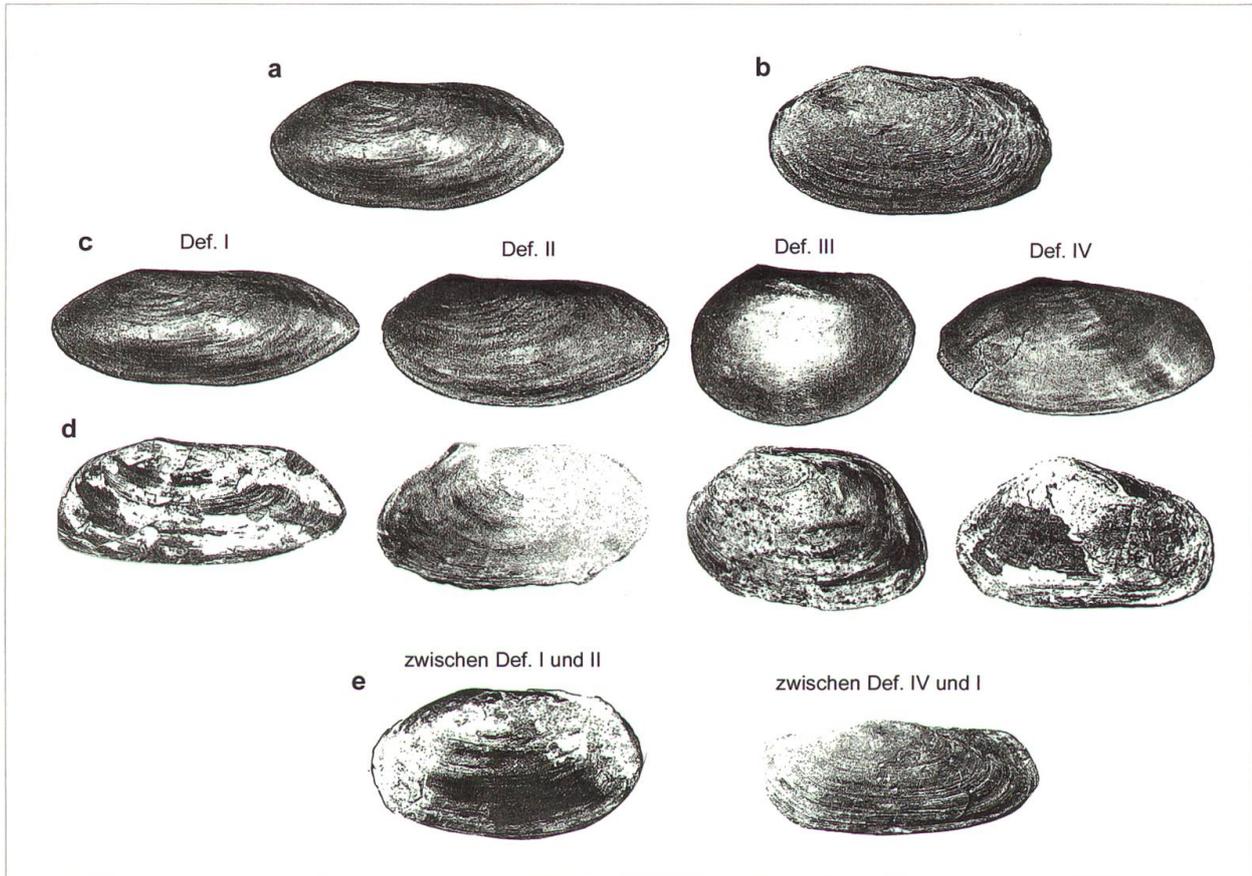


Abbildung 10:
Deformationsreihe von *Lutraria sanna* BASTEROT. a: Normalgestalt eines Exemplars aus dem Burdigalian von Bordeaux. b: Idem aus der St. Galler Meeresmolasse. c: Mittels Gummi-/Kitt-Platte erzeugte Deformationsreihe aus a. d: Den entsprechenden Deformationstypen zugeordnete Exemplare aus der St. Galler Meeresmolasse und einzelnen Zwischenformen in e. Zum besseren Formvergleich wurden die unterschiedlichen Grössen zum Teil angepasst. Nach FANCK (1929), modifiziert.

Molasse anhand von darin eingeschlossenen Muscheln. Neben den Fossilien liessen sich auch deformierte Tongallen in Sandsteinen auf tektonische Auswirkungen zurückführen. Er fand für die Region um St. Gallen eine Verkürzung der Gesteine von etwa 27%, quer zum Alpennordrand liegend. Die St. Gallen-Formation liegt in der Zone der aufgerichteten Molasse. Diese grenzt gegen Süden an die steil gestellte subalpine Molasse am Alpennordrand und gegen Norden an die weitgehend ungestörte mittelländische Molasse. Bemerkenswert ist jedoch die Feststellung von BREDDIN (1964), dass nördlich von St. Gallen die tektonische Verkürzung noch immer etwa 10–15% beträgt.

Eine wichtige Erkenntnis war, dass es sich um eine kompressive Deformation handelt, die einachsiger und parallel zu den Schichtflächen verläuft. Das heisst, dass der tektonische Druck lediglich eine Verkürzung in der Schubrichtung ohne wesentliche seitliche Ausdehnung zur Folge hatte. BREDDIN nahm dabei auch Bezug auf die Arbeiten von FANCK, mit der Bemerkung, dass sich vielleicht auch eine Druckapparatur bauen liesse, die eine kompressive Verformung unter Volumenverlust zulässt (vgl. dazu auch Abbildung 8).

Es ist interessant, dass auch Druckspuren auf der Oberfläche von Molassegeröllen, die raumorientiert dem Gestein entnommen

Fam.	Gattung und Art	von FANCK (1929) verwendete Namen
Arcidae	LAMARCK <i>Anadara fichteli</i> (DESHAYES)	[<i>Arca fichteli</i>]
Cardiidae	LAMARCK <i>Cardium commune</i> MAYER (Abb. 2a) <i>Cardium darwini</i> MAYER <i>Cardium burdigalinum</i> LAMARCK (Abb. 12b) <i>Acanthocardium praecellens</i> (KISSLING) <i>Trachycardium multicostatum</i> (BROCCHI) <i>Nemocardium spondyloides</i> (HAUER) (Abb. 11b)	[<i>Cardium praecellens</i>] [<i>Cardium polycolpatum</i>] [<i>Cardium (Discors) discrepans</i>]
Carditidae	Fleming <i>Megacardita guenterti</i> PFIST. & WEGM. (Abb. 12f)	[<i>Cardita (Venericardia) jouanneti</i> BASTEROT]
Chamidae	LAMARCK <i>Pseudochama gryphina</i> (LAMARCK) (Abb. 12h)	[<i>Chama gryphina</i>]
Clavagellidae	D'ORBIGNY <i>Clavagella bacillum</i> (BROCCHI) <i>Clavagella brocchi</i> (LAMARCK)	
Corbulidae	LAMARCK <i>Corbula confusa</i> COSSMAN & PEYROT	
Gastrochaenidae	GRAY <i>Gastrochaena hoernesii</i> BENOIST	
Glossidae	GRAY <i>Isocardia burdigalensis</i> (DESHAYES)	
Glycymeridae	DAL <i>Glycymeris violacensus</i> (LAMARCK)	[<i>Pectunculus violacensus</i>]
Hiatellidae	GRAY <i>Panopea menardi</i> (DESHAYES) Abb. (12a)	[<i>Glycymeris (Panopaea) menardi</i>]
Mactridae	LAMARCK <i>Mactra helvetica</i> MAYER <i>Lutraria oblonga</i> GMELIN <i>Lutraria sanna</i> BASTEROT (Abb. 2b, 10b) <i>Eastonia mitis</i> MAYER <i>Eastonia sp.</i> (Abb. 12e)	[<i>Mactra subcordiformis</i> DOLLFUSS] [<i>Lutraria latissima</i> DESHAYES] [<i>Eastonia sacyi</i> COSSMAN & PEYROT]
Mytilidae	RAFINESQUE <i>Mytilus aquitanicus</i> MAYER (Abb. 12g) <i>Brachidontes studeri</i> MAYER <i>Lithodomus avitensis</i> MAYER	[<i>Modiola escheri</i> MAYER] [<i>Modiola plicata</i> DESHAYES]
Nuculanidae	GRAY <i>Nuculana emarginata</i> (LAMARCK)	[<i>Leda deltoidea</i> RIS]
Nuculidae	Gray <i>Nucula nucleus</i> (LINNÉ)	[<i>Nucula mayeri</i> HÖRNES]
Ostreidae	RAFINESQUE <i>Ostrea lamellosa</i> BROCCHI (Abb. 13c) <i>Ostrea tegulata</i> MÜNSTER <i>Ostrea sp.</i> <i>Ostrea sp.</i>	[<i>Ostrea boblayei</i> DESHAYES] [<i>Ostrea crassicaosta</i> SOWERBY]
Pandoridae	RAFINESQUE <i>Pandora granum</i> COSSMAN	
Pectinidae	RAFINESQUE <i>Chlamys scrabriuscula</i> MATHÉRON (Abb. 12d) <i>Pecten hornensis</i> DEPERT & ROMAN (Abb. 12c) <i>Pecten sp.</i> <i>Anomia ephippium</i> LINNÉ	[<i>Pecten scrabriusculus</i>] [<i>Pecten rollei</i> HÖRNES] [<i>Pecten holgeri</i> GEINITZ]
Pholadidae	LAMARCK <i>Pholas desmoulinsii</i> BENOIST	
Pholadomyidae	GRAY <i>Pholadomya alpina</i> MATHÉRON (Abb. 12i)	
Pinnidae	Leach <i>Atrina pectinata</i> (LINNÉ)	[<i>Pinna brocchi</i> D'ORBIGNY]

Tabelle 1:

Muscheln (Gattung und Art) der St. Galler Oberen Meeresmolasse, die von FANCK als gültig bezeichnet wurden (Kolonne 2), geordnet nach Familien (Kolonne 1). In Kolonne 3 die Bezeichnungen nach FANCK. Fett markiert sind die häufigeren Arten, z. T. abgebildet (Abbildungen 2, 10–13).

Fortsetzung		
Fam.	Gattung und Art	von FANCK (1929) verwendete Namen
Pteriidae	Gray	
	<i>Pinctada studeri</i> (MAYER)	[<i>Avicula (Meleagrina) studeri</i>]
	<i>Pinctada phalaenacea</i> (LAMARCK)	[<i>Avicula (Meleagrina) phalaenacea</i>]
Solecurtidae	D'Orbigny	
	<i>Solecurtus basteroti</i> DESMOULINS	
	<i>Pharus sanctatsensis</i> DESMOULINS	
Solenidae	LAMARCK	
	<i>Solen burdigalensis</i> DESHAYES (Abb. 13d)	
Tellinidae	DE BLAINVILLE	
	<i>Tellina</i> sp. (? <i>planata</i> LINNÉ)	[<i>Tellina ?donacina</i> LINNÉ]
	<i>Psammotreta lacunosa</i> (CHEMNITZ)	[<i>Capsa lacunosa</i>]
	<i>Gastrana fragilis</i> (LINNÉ)	
	? <i>Petricola</i> sp.	[<i>Gastrana peregrina</i> BASTEROT]
Thraciidae	STOLICKA	
	<i>Thracia dollfussi</i> COSSMAN & PEYROT	
Ungulidae	ADAMS & ADAMS	
	<i>Diplodonta</i> sp.	[<i>Diplodonta ancodes</i> COSSMAN & PEYROT]
Veneridae	RAFINESQUE	
	<i>Venus haidingeri</i> HÖRNES	[<i>Chione (Venus) haidingeri</i>]
	<i>Venus aquitana</i> (COSSMAN & PEYROT)	[<i>Chione (Venus) aquitana</i>]
	<i>Venus</i> sp.	[<i>Chione (Venus) fasciolata</i> REUSS]
	<i>Venus</i> sp.	[<i>Chione (Venus) casinoides</i> BASTEROT]
	<i>Pitar islandicoides</i> (LAMARCK) (Abb. 13a)	[<i>Meretrix intercalaris</i> COSSMAN & PEYROT]
	<i>Paphia vetula</i> (BASTEROT)	[<i>Tapes vetulus</i>]
	<i>Sphenia anatina</i> BASTEROT	[<i>Aspidopholas branderi</i> BASTEROT]
	<i>Tapes helvetica</i> MAYER (Abb. 13b)	

werden, auf tektonische Verschiebungskräfte zurückgeführt werden können. So konnte SCHRADER (1988) zeigen, dass im westlichen Molassebecken die Richtung der Dehnung bzw. der Einengung parallel bzw. senkrecht zum Alpenrand verlief, die Deformation also im wesentlichen unter Volumenerhaltung geschah und eine Kompaktion mit entsprechender Volumenverminderung praktisch ausgeschlossen werden konnte. Wenn man die Reduktion des Porenvolumens als wichtigsten Faktor der Einengung annimmt, ist dieser in einem Gestein vom Typ Nagelfluh geringer. Ausserdem müssen Gerölle wegen der Platzbeanspruchung senkrecht zum Schub seitlich ausweichen können. Als maximale Verkürzung durch tektonische Beanspruchung gab SCHRADER einen Betrag um 25% an, welcher der Angabe von BREDDIN nahekommt.

Die Kompressibilität hängt in einem gegebenen Sediment von einer Anzahl Fakto-

ren, wie Homogenität, Porenvolumen, Dichte, Wassergehalt usw. ab. Die Arbeiten von BREDDIN und SCHRADER gaben hier für zwei verschiedene Molassegebiete im Alpenvorland unterschiedliche Antworten. Dass für die St.Galler Molasse und ihre Fossilien von einer tektonischen Gesteinskompaktion auszugehen ist, wäre ein Anreiz, die Muscheln unter diesem Aspekt erneut unter die Lupe zu nehmen; denn die Artenliste von FANCK ist nicht definitiv. Gemäss dem Kenntnisstand seiner Zeit berücksichtigte er zu wenig, dass die Arten nicht nur tektonisch verformt sind, sondern noch eine mehr oder weniger ausgesprochene biologische, genetisch oder ökologisch bedingte Variabilität aufweisen, die sich den tektonisch erzeugten Formen überlagert.

Nicht erkannte Effekte von tektonischen Deformationen bei Fossilien können zuverlässige Artbeschreibungen behindern. Solche sind jedoch wichtig, z.B. für den Vergleich von

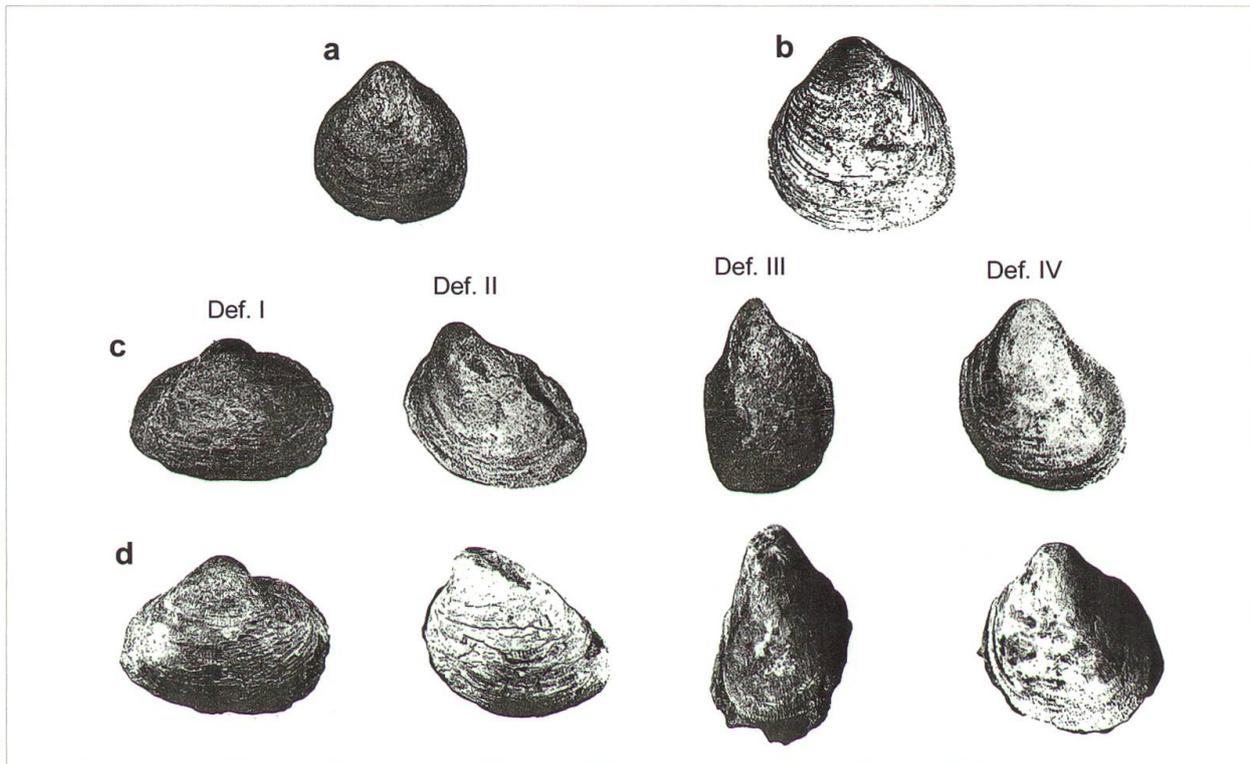


Abbildung 11:
Deformationsreihe von *Nemocardium spondyloides* (HAUER). a: Normalgestalt eines Exemplars aus dem Burdigalian von Bordeaux. b: Nicht-deformiertes Exemplar aus der St.Galler Meeresmolasse. c: Mittels Druckapparat erzeugte Deformationsreihe aus a. d: Entsprechende Deformationsexemplare aus der St.Galler Meeresmolasse. Nach FANCK (1929), modifiziert.

Populationen verschiedener Herkunft. In der Folge der pionierhaften Versuchsanlagen von FANCK stehen heute für die Rückführung verzerrter Fossilien in ihre ursprüngliche Form (auch Retrodeformation genannt) moderne elektronische Hilfsmittel zur Verfügung. So wie räumliche Formen digital erfasst und als präzise 3D-Kopien reproduziert werden können, sind Rechenprogramme verfügbar, um numerische Datenmengen zum Vergleich von Formverwandtschaften nach allen möglichen Kriterien einzusetzen (z.B. HUGHES & JELL 1992, SRIVASTAVA et al. 2006, SHAH et al. 2010). Würden diese neueren Methoden auf die von FANCK eruierte Anzahl «echter Arten» angewandt, müsste wohl erneut nach unten oder oben korrigiert werden. Hier stellt sich aber auch die Frage, mit welchem experimentellem Aufwand solche besser fundierten Fossilbestimmungen

durchgeführt werden sollen; denn auch jenseits aller technischen Feinessen wird ein Rest von Unsicherheit bleiben.

Anhang

ARNOLD FANCK (1889–1974) studierte an der Universität Zürich Geologie und schrieb vor dem 1. Weltkrieg seine Dissertation über die «Die bruchlose Deformation von Fossilien durch tektonischen Druck und ihr Einfluss auf die Bestimmung der Arten». Da das Manuskript in den Berliner Umsturztagen von 1918 verloren ging, reichte er die Arbeit in gekürzter Form ein und wurde 1929 promoviert. FANCK blieb dem Fach Geologie nicht treu. Bereits 1913 hatte er einen Dokumentarfilm über eine Besteigung des Monte Rosa gedreht und galt seit-

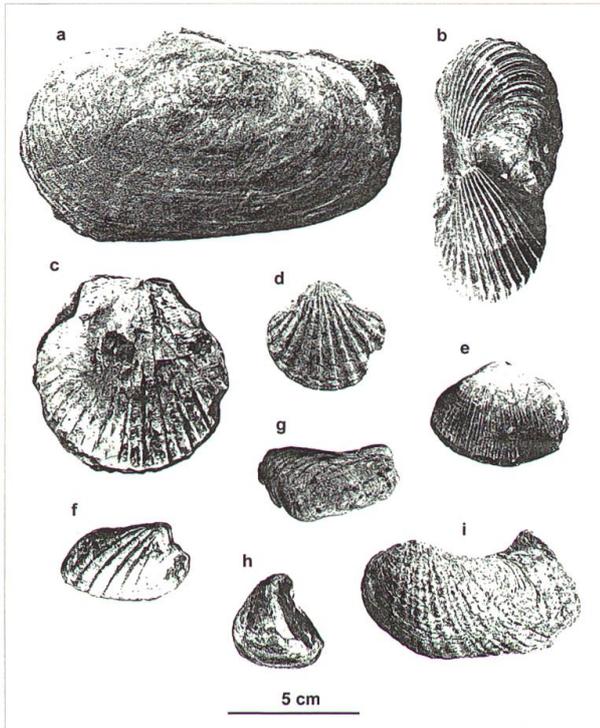


Abbildung 12:
Muschelarten der St. Galler-Schichten. a: *Panopea menardi* (DESHAYES). b: *Cardium burdigalinum* LAMARCK. c: *Pecten hornensis* DEPERT & ROMAN. d: *Chlamys scabriuscula* MATHÉRON. e: *Eastonia* sp. f: *Megacardita guenterti* PFISTER & WEGMÜLLER. g: *Mytilus aquitanicus* MAYER. h: *Pseudochama gryphina* (LAMARCK). i: *Pholadomya alpina* MATHÉRON.

dem als Pionier des Berg-, Sport-, Ski- und Naturfilm. International bekannt wurde er mit den Bergdramen «Die weisse Hölle von Piz Palü» (1928) und der «Der weisse Rausch» (1931). In der Zeit des Nationalsozialismus lehnte er zunächst die Zusammenarbeit mit dem Propaganda-Ministerium ab und geriet durch die Zusammenarbeit mit einem jüdischen Produzenten in ökonomische Schwierigkeiten. Obschon er sich später zur Zusammenarbeit mit der faschistischen Propaganda bereit erklärte, konnte er Dokumentationsfilme über das «Neue Berlin» nicht mehr selbständig produzieren und musste sie unter der Verantwortung seiner einstigen und heute berühmten Schülerin Leni Riefenstahl realisieren. Seine Werke

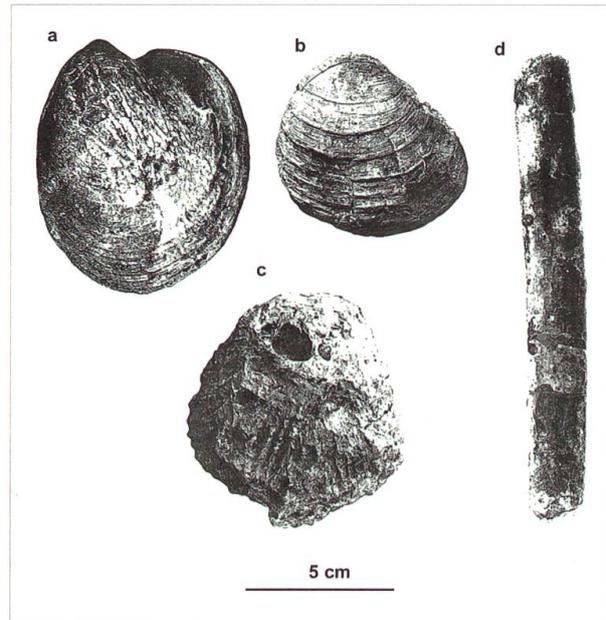


Abbildung 13:
Muschelarten der St. Galler-Schichten. a: *Pitar islandicoides* (LAMARCK). b: «*Tapes helvetica*» MAYER. c: *Ostrea lamellosa* BROCCCHI. d: *Solen burdigalensis* DESHAYES.

der Nazizeit wurden nach dem 2. Weltkrieg von den alliierten Militärregierungen verboten. FANCK erhielt keine Aufträge mehr, verarmte und arbeitete als Waldarbeiter. Am Bergfilmfestival in Trient (1957) erlebte er mit der Aufführung seines Films «Der ewige Traum» nochmals künstlerische Anerkennung. Durch den Verkauf der Rechte seiner Filme konnte er ökonomisch überleben, bis sich durch Fernsehaufführungen seine finanzielle Situation verbesserte (Quelle: Wikipedia der freien Enzyklopädie).

Dank

Den Herren Dr. Oskar Keller und Dr. Henry Naef verdanke ich die sorgfältige Durchsicht und Vorschläge zur Verbesserung des Manuskripts. Insbesondere Herr Dr. Naef machte mich auf geologische Publikationen und Geröllstudien aufmerksam, welche die Tektonik der St. Galler Meeresmolasse betreffen und die Arbeiten von FANCK ergänzen.

Literaturverzeichnis

- BAMBACH, R. K. (1973): Tectonic deformation of composite-mold fossil Bivalvia (Mollusca). – *American Journal of Science*, Cooper 273–A: 409–430.
- BREDDIN, H. (1958): Die regionale tektonische Fossil- und Gesteinsdeformation in der Molasse der Ost- und Mittelschweiz. – *Eclogae geologicae Helvetiae* 51: 378–379.
- BREDDIN, H. (1964): Die tektonische Deformation der Fossilien und Gesteine in der Molasse von St.Gallen (Schweiz). – *Geologische Mitteilungen* 4: 1–68.
- BÜCHI, U. P. (1955): Zur Geologie der Oberen Meeresmolasse von St.Gallen. – *Eclogae geologicae Helvetiae* 48
- BÜCHI, U. & HOTMANN, F. (1945): Die obere marine Molasse zwischen Sitter-Urnäsch und dem Rheintal. – *Eclogae geologicae Helvetiae* 38/1
- FALKNER, CH. & LUDWIG, A. (1903/04): Geologische Karte von St.Gallen und Umgebung.
- FANCK, A. (1929): Die bruchlose Deformation von Fossilien durch tektonischen Druck und ihr Einfluss auf die Bestimmung der Arten, beobachtet und bearbeitet an den Pelecypoden der St.Galler Meeresmolasse. – Inaugural-Dissertation Universität Zürich, 59. S., 9 Textfig., 16 Taf.
- HÖLTKE, O. (2009): Die Molluskenfauna der Oberen Meeresmolasse (Untermiozän) von Ermingen und Ursendorf (SW-Deutschland). – *Palaeodiversity* (Stuttgart) 2: 67–95.
- HEER, O. (1879): Die Urwelt der Schweiz. 2. umgearbeitete und vermehrte Auflage. 713 S., 12 Taf. F. Schulthess, Zürich.
- HEIM, ALB. (1878): Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung im Anschluss an die geologische Monographie der Tödi-Windgällen-Gruppe, Atlas-Band.
- HUGHES, N. C. & JELL, P. A. (1992): A statistical/computer graphic technique for assessing variation in tectonically deformed fossils and its application to Cambrian trilobites from Kashmir. – *Lethaia* 25: 317–330.
- KELLER, B. (1989): Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse (Unteres Miozän) zwischen Napf und Bodensee. – Inaugural-Dissertation, Univ. Bern (Schweiz), 402 S.
- LUDWIG, A. & FALKNER, CH. (1902/03): Beiträge zur Geologie der Umgebung St.Gallens. – 1. und 2. Teil. *Jahrbuch der St.Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft*: 474–620 (1901/02); 374–495 (1902/03).
- MAYER-EYMAR, K. (1858): Versuch einer neuen Klassifikation der Tertiärsgebilde Europa's. – *Verhandlungen der allgemeinen Schweizerischen Gesellschaft für die gesamten Naturwissenschaften* 42: 165–199.
- MAYER, K. (1872): Systematisches Verzeichnis der Versteinerungen des Helvetian der Schweiz und Schwabens. – *Beiträge der geologischen Karte der Schweiz*. 11. Lieferung: 475–527.
- PFISTER, T. & WEGMÜLLER, U. (1994/1998/1999/2000/2001): Beschreibung, Vergleich und Verarbeitung der Bivalven-Arten aus den Belpbergschichten (Obere Meeresmolasse, mittleres Burdigalium) in der Umgebung von Bern, Schweiz. 1. Teil: Palaeotaxodonta und Pteriomorphia exklusive Ostreacea. 2. Teil: Ostreacea, Heterodonta pro parte (Lucinacea, Chamnacea, Carditacea und Cardiaceae). 3. Teil: Heterodonta pro parte (Macracea, Solenacea und Tellinacea). 4. Teil: Veneracea. 5. Teil: Heterodonta pro parte (Myacea, Hiattellacea, Pholadacea). Nachtrag zu Palaeotaxodonta (Nuculacea, Nuculanacea), Pteriomorphia (Pectinacea) und Heterodonta (Carditacea, Cardiaceae, Solenacea). – *Eclogae geologicae Helvetiae* 87/3: 895–973, Taf. 1–9 (1994); 91/3: 457–491, Taf. 9–15 (1998); 92/3: 395–449, Taf. 16–33 (1999); 93/3: 445–470, Taf. 1–14 (2000); 94/3: 399–426, Taf. 1–18 (2001).
- RUTSCH, R. (1929): Die Gastropoden des subalpinen Helvétien der Schweiz und des Vorarlbergs. – *Abhandlungen der schweizerischen paläontologischen Gesellschaft* 2: 77 S., 2 Taf.
- SCHRADER, F. (1988): Das regionale Gefüge der Drucklösungsdeformation an Geröllen im westlichen Molassebecken. – *Geologische Rundschau*, Stuttgart 77/2: 347–369.
- SRIVASTAVA, D. C. & SHAH, J. (2006): Digital method for strain estimation and retrodeformation of bilaterally symmetric fossils. – *Geological Society USA*.
- SHAH, J., SRIVASTAVA, D. C., RASTOGI, V., GHOSH, R. & PAL, A. (2010): Strain estimation from single forms of distorted fossils – a computer graphics and MATLAB approach. – *Journal Geological Society of India* 75: 89–97.
- WETTSTEIN, A. (1886): Über die Fischfauna des tertiären Glarnerschiefers. – *Schweizerische paläontologische Abhandlungen* 13/2: 103 S., 8 Taf.