## 2. Geologie

### *2.1 Geschichte der Glarneralpen*

Das Erscheinungsbild der Erde ist in einem steten Wandel begriffen. Als Folge der plattentektonischen Bewegungen entstehen dort, wo Kontinente mit maximalen jährlichen Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern ‹aufeinanderprallen›, Gebirge. In Zonen aber, wo Kontinente auseinandergerissen werden, bilden sich Ozeane. Das Gebiet zwischen Rhein, Seez-Walensee und Linth gehört zum so genannten Helvetikum, dem nördlichen Küstenbereich des einstigen Ur-Mittelmeeres Tethys, das vor rund 200 bis 35 Millionen Jahren die Kontinente Ur-Afrika und Ur-Europa trennte.

Die ältesten Gesteine in der Region sind Gneise, Granite und Ganggesteine des Aarmassivs, einem Teil des ‹europäischen› Grundgebirges. Die mindestens 300 Millionen Jahre alten Gesteine wurden bereits lange vor der Alpenfaltung von früheren Gebirgsbildungen erfasst und geprägt. Das Aarmassiv ist heute im Sarganserland und im Glarnerland nur im Raum Vättis, am Limmernboden, am Tödi und in der Surselva östlich von Breil/Brigels aufgeschlossen (Abbildung 1). In den übrigen Gebieten wird es von später abgelagerten, jüngeren Sedimenten bedeckt. Vor 300 Millionen Jahren bildeten die heute bekannten Kontinente inklusive Ur-Afrika und Ur-Europa noch einen riesigen Urkontinent.

Die ältesten Ablagerungsgesteine wurden vor 250 bis 300 Millionen Jahren, zur Zeit des späten Karbons und des Perms, auf dem weitgehend eingeebneten Aarmassiv abgesetzt. Es ist die selten fehlende, stellenweise mehr als 1500 Meter mächtige Sedimentabfolge, die als Glarner Verrucano bezeichnet wird. Diese Formation ist zwischen dem Pizolgebiet und dem Kärpfgebiet, dem Walensee und dem Vorderrhein aufgeschlossen (Abbildung 1) und umfasst eine breite Palette von verschiedenartigen Gesteinen.

In den randlichen Bereichen, im Kärpfgebiet, im Murgtal, gegen das Seeztal, im Pizolgebiet und im Vorderrheintal, ist der Verrucano vor allem an der Basis sehr grobkörnig ausgebildet. Diese Gesteine enthalten zentimetergrosse, schlecht gerundete und schlecht sortierte Komponenten und werden auch als Sernifit bezeichnet. Im Kärpfgebiet und im Pizolgebiet enthalten sie einen beträchtlichen Anteil an vulkanischem Material, im Kärpfgebiet gar vulkanische Horizonte. Die Sernifite zeigen eine grosse Farbenvielfalt. Sie erscheinen blassgrün bis kräftig lauchgrün (Ringelspitz, Vorderrheintal), violettrot (Mülibachtal, Mels), blutrot (Ennenda, Murgtal) oder gelblich-rötlich (Pizolgebiet).

Im zentralen Verbreitungsareal, im Schilstal, im westlichen Weisstannental und im Chrauchtal, besteht der Verrucano aus bedeutend feineren Ablagerungen. Im tieferen Bereich sind es violett-grün-graue Silt- und Tonschiefer mit Karbonatlagen. Nach oben werden die Gesteine zunehmend feiner und die Farbe wechselt von grauviolett über violettrot zu intensiv blutrot.

Da im Verrucano nur sehr selten versteinerte Pflanzen oder Tiere vorkommen, wird zur Entstehungszeit ein lebensfeindliches und wüstenhaftes Klima vermutet. Auf Grund seiner Verbreitung und seiner Ausbildung entstand er in grossen Tälern (Trögen), die sich auf dem Grundgebirge Ur-Europas vor rund 300 Millionen Jahren bildeten. Das Becken, in dem der Glarner Verrucano abgelagert wurde, war mindestens 60 Kilometer lang und 25 bis 30 Kilometer breit und wurde mit dem Abtragsschutt der umliegenden höheren Gebiete verfüllt. Das grobe Geschiebe wurde auf Schuttfächern an den Trogrändern abgelagert, während das feinere Material bis ins zentrale Becken gelangte.

Über dem Verrucano liegen Gesteine, die während der Triaszeit vor 250 bis 210 Millionen Jahren entstanden: Die Melser-Serie, die Röti-Serie und die Quarten-Serie. Die Melser-Serie besteht aus grünlich-weissen, massigen Sandsteinen, die Röti-Serie aus gelblich-beige anwitternden Dolomiten, knorrig-löcherigen Rauhwacken sowie sel-

ten (südlich des ‹Gipsgrat› am Wissmeilen) aus Gips und die Quarten-Serie aus den rotvioletten, den obersten Verrucano-Schiefern zum Verwechseln ähnlichen Quarten-Schiefern und den Melsersandstein-ähnlichen Quarten-Quarziten. Der Melsersandstein zeugt von einem Meer, das vor 250 Millionen Jahren auf den weitgehend eingeebneten Kontinent vorgestossen ist. In der mittleren Triaszeit, als nicht nur der Gips der Glarneralpen, sondern auch Europas grösste Salzlagerstätten entstanden, wechselten sich Austrocknungs- und Überschwemmungsphasen mehrmals ab, während gegen Ende der Triaszeit wieder wüstenhafte Verhältnisse vorherrschten.

Die Zeitperiode Jura (210–140 Mio. J.) wird in die drei Epochen Lias, Dogger und Malm gegliedert. Die Liasgesteine bestehen aus Ton- und Mergelschiefern und sandigen Kalken. Sie enthalten Wellenrippel und versteinerte Muscheln, Belemniten, Ammoniten und Korallen und zeugen von einem flachen, belebten, küstennahen Meer. Zur Malm-Zeit entstanden mehrere hundert Meter mächtige Kalkformationen, die in ihrer Ausbildung jedoch starke regionale Unterschiede aufweisen. Im nördlichen Teil des Ablagerungsgebietes (Calanda – Vättis – Ringelkette – Flimserstein – Panixer Alp – Limmernboden – Tödi) wurden Kalke ausgeschieden, die oft versteinerte Korallen aufweisen und daher einen küstennahen Meeresbereich belegen. In der Gonzen – Ellhorn – Kette hingegen bildeten sich zur gleichen Zeit fast fossilleere feine Kalke mit der bekannten Eisenlagerstätte, die auf ein mehrere hundert Meter tiefes Meer hinweisen.

Zur Kreidezeit (140–65 Mio. J.) wurde am Nordrand der Tethys eine mehrere hundert Meter mächtige Abfolge aus Kalken, Mergel- und Tonschiefern abgelagert. Die vielen Riffkalk-Horizonte im nördlichen Ablagerungsraum (Calanda – Ringelspitz – Flimserstein (Abbildung 11) – Panixer Alp – Bifertenstock, Glärnisch – unterer Teil Wiggis-Gruppe, Mürtschenstock – Betlis) bestätigen die Küstennähe, während die Gesteinsfor-



Abbildung 9:
Unter der Hauptüberschiebung zieht ein dunkles Band Flysch in das mächtige Kalkpaket zwischen der Hauptüberschiebung mit dem Verrucano (oben) und dem Flysch. Bild: Yvonne Willi.



Abbildung 10:
Eine der ältesten Darstellungen der Glarner Hauptüberschiebung ist das berühmte, 1812 geschaffene Aquarell von H. C. ESCHER von der Linth. ETH Bibliothek (HCE A IX 180a).

mationen im südlichen Ablagerungsraum (Fläscherberg – Churfirsten – Säntis, oberer Teil Wiggis-Gruppe) mächtiger werden, mergeliger ausgebildet sind und somit von grösserer Meerestiefe zeugen. Zur Kreidezeit sind die Meerestiefen geringer als zur Jurazeit. Vor rund 100 Millionen Jahren muss die Öffnung des Ur-Mittelmeeres gestoppt und Ur-Afrika mit der Bewegung Richtung Ur-Europa begonnen haben.

Während der Tertiärzeit (65–2 Mio. J.) entstanden die Flyschgesteine und die Molasse. Unter dem Namen Flysch werden kilometermächtige Abfolgen von bräunlichgrauen bis dunkelgrauen Brekzien, Kalksandsteinen, Kalksteinen, Quarziten, Ton- und Mergelschiefern zusammengefasst. In den Dachschiefern aus dem Landesplattenberg Engi wurden viele einmalig erhaltene Fossilien, vor allem versteinerte Skelette von Fischen und Meeresschildkröten, entdeckt. Zudem zeugen Frass- und Weidespuren von Meeresorganismen wie Würmern und Schnecken, gradierte Schichten (Sedimentkörner werden gegen oben zunehmend feiner) und wirbelförmige Strukturen von der Vergangenheit der oft verfalteten und verschuppten Flyschgesteine.

Die Entstehung der Flyschgesteine steht im Zeichen der Kollision von Ur-Afrika und Ur-Europa und somit der Entstehung der Alpen. Im Norden der entstehenden Alpen befand sich noch ein schmales Restmeer mit einem Riffbereich im Norden, einem steilen Abhang und einem tieferen Becken im Süden. Die nordwärts vorrückenden Gesteinspakete verursachten eine rege Erdbebentätigkeit, die an den steileren Meeresabhängen Schlammströme auslöste und die gradierten Schichten und wirbelförmigen Strukturen verursachte. Schon kurz nach ihrer Bildung wurden die Flyscheinheiten von den vorrückenden Decken überfahren und in die Alpenfaltung miteinbezogen. Gesteinspakete wurden verfaltet, von der Unterlage abgetrennt und übereinander geschoben, sodass der Aufbau der Flyscheinheiten heute schwierig zu entwirren ist.

Die durch die Kollision verursachten Überschiebungen von kilometermächtigen Gesteinspaketen führten dazu, dass ursprünglich in südlichen Gebieten abgelagerte Gesteine (Gonzen/Sargans) heute nördlicher liegen als Gesteine, die ursprünglich weiter nördlich abgelagert wurden (Vättis).

### *2.2 Geologie und Tektonik an der Glarner Hauptüberschiebung*

An der Glarner Hauptüberschiebung liegen 250 bis 300 Millionen Jahre alte Verrucanogesteine auf viel jüngeren Gesteinen. Stellenweise sind dies helle Kalke mit einem Alter von 100–150 Millionen Jahren, stellenweise bräunlichgraue, meist schiefrige Flyschgesteine, welche vor 35 bis 50 Millionen Jahren gebildet wurden (Abbildung 7).

Der Verrucano über der Hauptüberschiebung gehört zum untersten Teil der helvetischen Decken. Als Decken werden Gesteinspakete bezeichnet, die bei der Alpenbildung ausgequetscht und als Einheit verschoben wurden. Während der Entstehung der Alpen wurden die helvetischen Decken entlang der Überschiebungsflächen mehr als 35 Kilometer weit über die darunter liegenden Gesteine nach Norden transportiert. Diese Bewegung dauerte mehrere Millionen Jahre und lief mit einer Geschwindigkeit von nur wenigen Zentimetern pro Jahr ab. Die Gesteine unterhalb der Überschiebung liegen teilweise noch auf dem Grundgebirge. Sie wurden auch verfaltet, zerbrochen und leicht verschoben, aber nie über grosse Distanzen transportiert.

An der Überschiebungsfläche findet man einen oft nur 1–2 Meter mächtigen, weisslichgrauen, gelbbeige anwitternden Kalkstein, den so genannten Lochseitenkalk. Dieser hat ein schlieriges, marmorartiges Aussehen (Abbildung 7), das durch extreme Verfaltung entstanden ist und oft als Knetstruktur bezeichnet wird. Ein grosser Teil der Bewegung an der Hauptüberschiebung muss in diesem Kalk stattgefunden haben. Laboranalysen zeigen, dass der Lochseitenkalk bei etwa 320 Grad Celsius und einem Druck von bis



Abbildung 11:
Von Bargis aus ist die nach Norden aufsteigende Glarner Hauptüberschiebung in der obersten Partie des Crap da Flem über den parautochthonen Kreideschuppen erkennbar. Bild: David Imper.

zu 5 Kilobar verformt wurde. Solche Bedingungen herrschen in einer Tiefe von etwa 16 Kilometern unter der Erdoberfläche. Somit müssen die Bewegungen an der Glarner Hauptüberschiebung bis 16 Kilometer unter der Erdoberfläche stattgefunden haben!

Die helvetischen Decken, die entlang der Hauptüberschiebung nordwärts verfrachtet wurden, waren etwa 3 Kilometer dick, 50 Kilometer lang und über 100 Kilometer breit. Wenn ein derart grossflächiges Gesteinspaket verschoben wird, müssen an der Überschiebungsfläche sehr grosse Reibungskräfte entstehen. Auf Grund von Berechnungen sind diese Kräfte so gross, dass die Gesteinspakete, statt als Einheit transportiert zu werden, in viele kleine Schollen zerbrechen würden. Das war jedoch nicht der Fall: Die Decken blieben als mehr oder weniger zusammenhängende Gesteinspakete erhalten. Daher muss ein Schmiermittel die Reibungskräfte an der Überschiebungsfläche so stark reduziert haben, dass ein Gleiten ermöglicht wurde.

Viele grosse Überschiebungen in Gebirgen verlaufen in Schichten aus weichen, leicht verformbaren Gesteinen wie Salz, Gips oder Ton, die als Schmiermittel wirken. An der Glarner Hauptüberschiebung hingegen wirkte offensichtlich der Lochseitenkalk als Schmiermittel. Auch das ist erstaunlich, denn normalerweise sind Kalke eher schlecht verformbar. Somit wurde der Lochseitenkalk zu einem wichtigen Schlüssel für das Verständnis der Glarner Hauptüberschiebung.

Im südlichen Teil der Hauptüberschiebung (beispielsweise am Crap da Flem/Flimserstein, Abbildung 11) scheint der Lochseitenkalk aus älteren Kalkpaketen entstanden zu sein. An anderen Stellen, wie an den Tschingelhoren (Abbildungen 9 und 10) oder am Foostock (Abbildung 6), liegen mehrere Dutzend Meter mächtige Kalkpakete – auch mesozoische subhelvetische Kalkscherben genannt – aus der Jura- und aus der Kreidezeit direkt unter der Überschiebungsfläche.

Auch über diesen Kalken kann jedoch meist das dünne Band des stark verformten, eigentlichen Lochseitenkalkes mit der charakteristischen, teilweise intensiv verfältelten Bänderung und der so genannten ‹Knetstruktur› – die eigentliche Überschiebungszone – erkannt werden. Da die subhelvetischen Kalkscherben älter sind als die Flyschgesteine, müssen diese vor der Glarner Hauptüberschiebung auf die Flyscheinheiten geschoben worden sein.

Die Bewegung an der Glarner Hauptüberschiebung erfolgte nach den heutigen Annahmen auf einer leicht nach Südsüdost geneigten Fläche – die Gesteinspakete wurden somit leicht aufwärts geschoben. Erst später, als die Alpen angehoben und die überliegenden Gesteine abgetragen wurden, gelangte die Überschiebungsfläche an die heutige Lage, hoch in den Bergen. Die gekrümmte Form (Abbildung 3) erhielt sie, weil die Hebung der Alpen im zentralen Bereich bedeutend schneller erfolgte als am Alpenrand. Im Kulminationsbereich der Glarner Hauptüberschiebung hat die Abtragung dazu geführt, dass isolierte Massen des aufgeschobenen Gesteins erhalten blieben, während die alten Verrucanogesteine in der Umgebung aberodiert wurden. Solche übriggebliebenen, isolierten Gesteinsmassen nennt man Klippen. Sie bauen viele Berggipfel in der Region auf, beispielsweise die Ringelkette (Abbildung 4), die Piz Sardona – Piz Segnas – Piz Atlas – Gruppe oder den Hausstock.

### *2.3 Der bekannteste Aufschluss: Die Lochsite bei Sool/Schwanden*

Auf Grund der guten Erreichbarkeit und der guten Aufschlussverhältnisse wurde die Lochsite bei Sool/Schwanden zu einem Mekka der Erdwissenschaftler. So erstaunt es nicht, dass viele wichtige Beobachtungen und Erkenntnisse an der Lochsite gemacht wurden und diese Lokalität zu einem der bekanntesten Gesteinsaufschlüsse der Alpen und zu einem Geotop (Naturdenkmal) von internationaler Bedeutung wurde.

An der Lochsite können die drei Gesteinsarten Flysch, Lochseitenkalk und Verrucano auf kleinem Raum erkannt werden (Abbildung 8):

Unter der Geländekerbe sind 35 bis 50 Millionen Jahre alte *Flyschgesteine* aufgeschlossen: dunkelgrauschwarze, hell bräunlich-grau anwitternde, verschieferte Mergel- und Tonlagen mit Kalkbänken.

In der am stärksten zurückwitternden Zone kann ein wenige Dezimeter mächtiges, gelbbeige anwitterndes, weisslich-graues Kalkband, der so genannte *Lochseitenkalk,* entdeckt werden. Er hat ein schlieriges, marmorartiges Aussehen, das oft als Knetstruktur bezeichnet wird (Abbildung 7). Durch den Lochseitenkalk verläuft eine scharfe, gerade, fast horizontale Linie.

Das Dach des Aufschlusses bilden 250 bis 300 Millionen Jahre alte *Verrucanogesteine*. Der Verrucano besteht an der Lochsite aus weisslich-gelblich anwitternden, bergfrisch violettroten, stellenweise hellgrünlich-gelblich ausgebleichten grobkörnigen Sernifiten. Darin sind mehrere Zentimeter grosse, eckige bis leicht angerundete Geröllkomponenten erkennbar. Diese setzen sich grösstenteils aus dunkelgrünlichem und dunkelbraunrotem vulkanischem Material, klaren bis weisslichen Quarzen und Quarziten sowie rötlichen und grünlichen Quarzporphyren zusammen.

Auf Grund der Knetstruktur muss der Lochseitenkalk (Abbildung 7) durch extrem starke Verformung und Verfaltung unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen entstanden sein. Die scharfe Linie zeugt von einer späten Druckentlastung, als die Überlagerung (und damit auch Druck und Temperatur) bereits deutlich abgenommen hatte und das Gestein spröde zerbrach. Der grösste Teil der Bewegung erfolgte jedoch nicht an dieser Linie, sondern zuvor während der Verformung des Lochseitenkalkes (Vergleiche Kapitel 2.2, 3.2).

## 3. Erforschung der Glarner Hauptüberschiebung

### *3.1 Historische Erforschung*

Einer der ersten Erforscher der Berge zwischen Linth, Rhein und Seez war Hans Conrad Escher (1767–1823), ein grossartiger Beobachter und Zeichner (Abbildung 10). Er beschrieb bereits 1807 die Glarner Hauptüberschiebung, konnte sie aber beim damaligen Stand der Wissenschaft nicht verstehen. Seither ist das Interesse an der Hauptüberschiebung ungebrochen. So erstaunt es nicht, dass bahnbrechende Theorien über die Entstehung von Gebirgen in den Glarneralpen entwickelt oder stark beeinflusst wurden. Eschers wichtigste Beobachtung war, dass die Abfolge der Gesteine in den Glarneralpen nicht der damals gängigen Theorie entsprach, wonach der jüngere ‹Alpenkalk› immer über den älteren ‹Grauwacken› [hier: grobkörnige Verrucanogesteine] liegen musste. Diese Theorie wurde namentlich vom damals einflussreichsten deutschen Geognostiker Leopold von Buch (1774–1853) vertreten, der Eschers Beobachtungen trotz Besuch in den Glarneralpen 1809 abstritt: ‹Grauwacke gehört zur Übergangsformation und kann und darf nie auf Alpenkalkstein ruhen.›

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts gelang die relative Altersbestimmung von Gesteinsschichten auf Grund ihrer Versteinerungen. Um die Mitte des 19. Jahrhunderts erkannte Arnold Escher (1807–1872), Hans Conrad Eschers Sohn und erster Professor für Geologie in Zürich, dass in den Glarner Alpen ältere Gesteine über jüngeren liegen. Er kam zum Schluss, dass hier eine ‹colossale Überschiebung› existiere und sprach bereits 1845 von einer ‹Decke›. 1848 führte er einen der bedeutendsten Geologen jener Zeit, Roderick Impey Murchison (1792–1871) auf den Pass dil Segnas (Segnespass). Auch Murchison schloss sich Eschers Interpretation an und beschrieb 1849 ‹one enormous overthrow›. Doch bald begann Escher zu zweifeln, weil das Ausmass der Verstellung alles damals Bekannte überschritten hätte: ‹Kein Mensch würde es glauben, man hielte mich für einen Narren›. So erfand er die absurde Theorie der Doppelfalte: zwei liegende Falten, eine von Norden und eine von Süden, welche eine tabakbeutelförmige Mulde von Flysch einschliessen sollten. Die Stirnen beider Falten hätten sich in einer schmalen Lücke, wo keine Gesteine erhalten sind und niemals genug Platz gewesen wäre, gegenüber stehen sollen.

Eschers Schüler und Nachfolger Albert Heim (1849–1937) übernahm die Doppelfalten-Theorie seines Meisters (Abbildung 2). Dank seinen bahnbrechenden Untersuchungen über Gesteinsverformung, seinen grossartigen Zeichnungen und seiner klaren Schreibweise wurde die These allgemein akzeptiert, obschon sie in geometrischer und mechanischer Hinsicht ein Unding war. Die Doppelfalten-Theorie passte gut zu den damaligen Vorstellungen über die Entstehung der Erde: Man nahm an, dass die Erde seit ihrer Entstehung langsam abkühle und schrumpfe, wobei die Erdoberfläche zu Gebirgen verfaltet werde. Albert Heim war ein einflussreicher Geologe und rechnete mit seinen Kritikern in ziemlich bösartiger Weise ab.

So blieb die kleine Schrift (1884) des Franzosen Marcel Bertrand (1847–1907) fast unbeachtet. Bertrand, der die Glarner Alpen nicht aus eigener Anschauung kannte, zeigte, dass eine einzige, von Süden gegen Norden gerichtete Überschiebung den Bau dieser Gebirge viel plausibler erklären konnte als die berühmte Doppelfalte. Der bedeutendste Alpen-Geologe jener Zeit, der Wiener Eduard Suess (1831–1914), kam 1892 in den Glarneralpen zur Einsicht, dass Bertrand Recht haben musste, konnte Heim aber nicht überzeugen. 1893 wies Hans Schardt (1858–1931) aus Neuchâtel nach, dass die westschweizerischen Préalpes einer Schubmasse aus dem Inneren der Alpen angehören. Der Waadtländer Maurice Lugeon (1870–1953) und der Franzose Pierre Termier (1859–1930) verallgemeinerten die Theorie,

und 1903 musste sie auch Albert Heim endlich anerkennen. In der Folge konnte deren Siegeszug nicht mehr aufgehalten werden. So schrieb Albert Heim 1921 in seinem Standardwerk der Schweizergeologie: ‹Wer noch an der grossartigen Deckentektonik zweifelt, der möge sich zuerst die Lochseite ansehen …›

So wurde die gut erreichbare Lochsite bei Sool/Schwanden zu einem der berühmtesten Aufschlüsse der Alpen. Es begannen drei Jahrzehnte, die wohl die produktivsten der alpinen Geologie wurden. Vorher unbegreifliche Strukturen ordneten sich in ein logisches Bild ein und man konnte rekonstruieren, wo die beobachteten Sedimentgesteine ursprünglich abgelagert wurden. Die Glarner Alpen wurden zu einem Schlüsselgebiet der neuen Deckenlehre. Der Zeichenlehrer Jakob Oberholzer (1862–1939), der nie ein Hochschulstudium absolviert hatte, nahm hervorragende geologische Karten des ganzen, komplizierten Gebietes auf. Seine 1933 erschienene ‹Geologie der Glarneralpen›, die eine Fülle von genauen Beobachtungen sowie eindrückliche Bergansichten und Profile beinhaltet (Abbildung 6), stellt heute noch eine wertvolle Grundlage für neue Interpretationen dar. Die Monografie der Churfirsten-Mattstock-Gruppe von Albert Heims Sohn Arnold Heim (1882–1965) ist ein Musterbeispiel für die Analyse der Zusammensetzung und Altersabfolge von Sedimentgesteinen. Arnold Heim entwickelte auch neue Methoden zur Rekonstruktion der Ablagerungsgebiete von Sedimenten, bei welchen die Bewegungen von Decken zurückverfolgt und ihre ursprüngliche Lage ermittelt wird. Wolfgang Leupold (1895–1986) und seine Schüler entwirrten schliesslich den Bau der Glarner Flysche.

Da diesem Alpenraum ein Modellcharakter zukam, testeten hier Robert Helbling (1874–1954) und seine Mitarbeiter auch neue Aufnahmemethoden für geologische Karten. In seinem Gefolge entwarf Rudolf Staub (1891–1960) ein recht eigenwilliges Bild des Baus der Gebirge zwischen Linth und Rhein sowie eine Übersicht der Erforschungsgeschichte.

Rudolf Trümpy und seine Schüler studierten vor allem die verschiedenen Gesteinsformationen zwischen Rheintal und Reusstal und versuchten die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Decken aufzuzeigen. Wichtig für das Verständnis der Glarner Hauptüberschiebung war auch die genaue Untersuchung des Aufbaus des Verrucano und seiner Vorformung in den Sechziger- und Siebzigerjahren des 20. Jahrhunderts.

In den letzten Jahrzehnten rückten die genauen Mechanismen der Überschiebung in den Mittelpunkt des Interesses. Martin Frey (1940–2000) studierte den Zusammenhang zwischen Bewegungen an der Hauptüberschiebung und schwacher Gesteinsmetamorphose (Gesteinsumwandlung als Folge von erhöhten Drücken und Temperaturen). Frey machte auch erste Angaben über das Alter der Deformationsphasen. Adrian Pfiffner untersucht seit den Siebzigerjahren intensiv die Gesteinstrukturen an der Glarner Hauptüberschiebung, bestimmte daraus Bewegungsphasen und Transportweiten der Decken und untersuchte Gesteinsverformungen in Kalken, inklusive Lochseitenkalk.

### *3.2 Aktuelle Forschungstätigkeiten*

Heute zweifelt niemand mehr daran, dass in den Glarneralpen kilometerdicke Gesteinspakete abgeschert und über weite Distanzen nordwärts geschoben wurden. Schwierigkeiten bereitet jedoch die Erklärung der Mechanismen, die den Transport der im Verhältnis zu ihrer grossen Fläche geringmächtigen Gesteinspakete auf einer so dünnen Überschiebungszone ermöglichten (Kapitel 2.2). Daher beschäftigen sich heute die Erdwissenschaftler vor allem mit der Suche nach dem Schmiermittel und mit der Entstehung des Lochseitenkalkes.

Mikroskopische Untersuchungen des Lochseitenkalkes zeigen, dass er hauptsächlich durch das aneinander Vorbeigleiten einzelner, nur rund 10 Mikrometer grosser

Kalkkörner gestreckt wurde. Das Innere der kleinen Kalzitkristalle hat sich dabei trotz der enormen Streckung des Gesteins kaum verformt. Aus Laborversuchen ist bekannt, dass Metalle unter besonderen Bedingungen ein anormales Fliessverhalten zeigen und sich ungewöhnlich stark verformen lassen ohne dabei zu zerbrechen. Dieses Phänomen nennt man Superplastizität. In den Siebziger Jahren gelang es Stefan Schmid in Laborversuchen, den Lochseitenkalk unter hohen Drucken und Temperaturen, wie sie an der Überschiebungsfläche geherrscht hatten, superplastisch zu verformen. Damit konnte er erstmals erklären, wie es möglich gewesen sein könnte, eine mächtige Kalkschicht zu einer ‹zig› Kilometer langen, jedoch nur wenige Meter dicken Schicht auszuwalzen. Doch schon bald begannen Kritiker an der superplastischen Verformung zu zweifeln, denn Superplastizität ist nur möglich, wenn sich die Gesteine an der Bruchfläche während langer Zeit gleichmässig und mit derselben Geschwindigkeit bewegen.

Beobachtungen an aktiven Brüchen zeigen jedoch, dass die Bewegungen eher in vielen kleinen, ruckartigen Schritten ablaufen. Neuere Modelle schlagen nun vor, dass eine solche ruckartige Bewegung durch das Vorhandensein von Wasser gefördert wurde. Wasser verringert unter hohem Druck die Reibung an der Überschiebungsfläche kurzzeitig und ermöglicht dadurch ein kurzes Gleiten der Gesteinspakete. Im Norden der Hauptüberschiebung deuten scharf begrenzte, helle Bänder im Lochseitenkalk darauf hin, dass dieser aus Kalzitadern entstanden ist. Die Adern sind mit neu gebildetem Kalzit verfüllte Risse, die als Folge der ruckartigen Bewegungen entstanden. Das würde bedeuten, dass der Lochseitenkalk zumindest teilweise erst während der Überschiebung aus kalkreichem Wasser auskristallisierte und nicht ein ausgewalztes Band aus altem Meereskalk darstellt. Dies konnte Martin Burkhard durch Sauerstoffisotopanalysen im Lochseitenkalk nachweisen. Zu diskutieren gibt nun aber die Frage nach der Herkunft der dafür notwendigen grossen Wassermengen … So versucht beispielsweise Josef Mullis durch die Interpretation der Flüssigkeits- und Gaseinschlüsse in Kristallen neue Aspekte zur Beantwortung dieser alten Fragen und Probleme einzubringen.

Forschungsprojekte an mehreren Universitäten und verschiedene laufende Nationalfondprojekte über den Lochseitenkalk, andere ähnliche Gesteine sowie über die Kalke unter dem Lochseitenkalk (unter anderen Rainer Abart, Marco Herwegh, Adrian Pfiffner) belegen, dass die Glarner Hauptüberschiebung noch weitere Geheimnisse birgt und noch lange nicht vollständig verstanden wird. So wird sie auch in Zukunft noch neue Erkenntnisse über die Entstehung von Gebirgen preisgeben.

## Verdankungen

Der vorliegende Artikel basiert auf dem Nominationsdossier und dem Regionalmanagementplan, die durch das Büro für Geologie & Umweltfragen D. Imper, Heiligkreuz/Mels, im Auftrag des Bundesamtes für Wald, Umwelt und Landschaft (BUWAL) erstellt wurden. PD Dr. M. Küttel vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) leitete die Arbeiten. Herzlichen Dank für tatkräftige Unterstützung und die Zustimmung zur Verwendung der Daten aus Nominationsdossier und Regionalmanagementplan.

Prof. A. Pfiffner, Universität Bern und Präsident Wissenschaftlicher Beirat, und Prof. M. Burkhard, Université de Neuchâtel, danke ich für die tatkräftige Mithilfe bei der Erarbeitung der erdwissenschaftlichen Texte (Kapitel 2 und 3.2), em. Prof. R. Trümpy für die wertvollen Informationen über die Erforschungsgeschichte der Glarner Hauptüberschiebung (Kapitel 3.1) sowie M. Ackermann und R. Guidon für ihre Unterstützung bei der Redaktion und der Erstellung der Beilagen.

## Literaturverzeichnis

BÜRO FÜR GEOLOGIE & UMWELTFRAGEN D. IMPER (2003a): Nomination of the Glarus Overthrust as a UNESCO World Natural Heritage site. – unpubliziert.

BÜRO FÜR GEOLOGIE & UMWELTFRAGEN D. IMPER (2003b): Glarus Overthrust – UNESCO World Heritage site (candidate) – Regional Management Plan. – unpubliziert.

HEIM, Alb. (1878): Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung im Anschluss an die geologische Monografie der Tödi-Windgällen-Gruppe. – Schwabe, Basel.

MURCHISON, R. I. (1849): On the geological structure of the Alpes, Apennines and Carpathians. – Qu. J. Geol. Soc. London, 5, 157–312.

OBERHOLZER, J. (1933): Geologie der Glarneralpen. – Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz. Geologische Kommission der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft.

PFIFFNER, O. A. (1994): Die Tiefenstruktur der Alpen. – Geowissenschaften 12/5–6, 132–135.

SCHMID, S. M. (1975): The Glarus Overthrust: Field Evidence and Mechanical Model. – Ecl. Geol. Helv. 68/2.

TRÜMPY, R. (1980): Geology of Switzerland. – Wepf, Basel.