



---

## **Der Einfluss kognitiver und motivationaler Faktoren auf die Konstruktion hydrologischen Wissens – eine Analyse individueller Lernpfade**

**Sibylle Reinfried** 

### **Zitieren dieses Artikels:**

Reinfried, S. (2015). Der Einfluss kognitiver und motivationaler Faktoren auf die Konstruktion hydrologischen Wissens – eine Analyse individueller Lernpfade. *Zeitschrift für Geographiedidaktik | Journal of Geography Education*, 43(2), 107-138. doi 10.60511/43104

### **Quote this article:**

Reinfried, S. (2015). Der Einfluss kognitiver und motivationaler Faktoren auf die Konstruktion hydrologischen Wissens – eine Analyse individueller Lernpfade. *Zeitschrift für Geographiedidaktik | Journal of Geography Education*, 43(2), 107-138. doi 10.60511/43104

# Der Einfluss kognitiver und motivationaler Faktoren auf die Konstruktion hydrologischen Wissens – eine Analyse individueller Lernpfade

Sibylle Reinfried

## Zusammenfassung:

*Wovon hängt die erfolgreiche Veränderung von Alltagsvorstellungen ab? Dieser Frage wurde mittels kognitiver Lernpfadanalysen nachgegangen, indem die konzeptuelle Entwicklung von hydrologischem Wissen bei 12-jährigen Lernenden detailliert erforscht wurde. Ziel der Studie war es, die Entwicklung von Wissen über Wasserquellen in Bergregionen zu rekonstruieren, um dadurch genauer zu verstehen, welche Faktoren für konzeptuelle Wissensveränderungen bedeutsam sind. Mit einer Lernumgebung, deren Wirksamkeit zuvor empirisch getestet worden war, erlernten Schülerinnen und Schüler Wissen über Quellen, wobei ihr Lernweg über ihre schriftlichen und mündlichen Äußerungen erfasst wurde. Aus Schülerzeichnungen, -texten, Wissenstests, Schülerinterviews und videographierten Schülerarbeitsphasen wurden Daten kategoriengeleitet gewonnen und mittels strukturierender qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet. In dieser Publikation werden die Wissenskonstruktionen und die individuellen Lernpfade von zwei Schülern fallstudienartig vorgestellt. Die beiden Schüler repräsentieren exemplarisch die Spannweite möglicher individueller Lernwege. Das Vorwissen der Schüler erwies sich als bedeutsam für die Wissenskonstruktion, kognitive und motivationale Faktoren üben aber ebenfalls einen großen Einfluss darauf aus. Besonders Vorwissen, das durch eigene Anschauung von Quellen in sozialen Kontexten gewonnenen wurde, zeichnet sich durch eine große Stabilität aus, so dass im Lernprozess Inkonsistenzen zwischen Vorwissen und instruktionalem Wissen nicht bemerkt und trotz großem Interesse nur geringe Lernfortschritte erzielt werden.*

**Schlüsselwörter:** Präkonzepte, Conceptual Change, hydrologisches Wissen, kognitive Lernpfadanalyse, mentale Modellentwicklung

## Summary:

*What is it dependent on whether learners change their preconceptions? To study this question 12-year-old students' conceptual development of knowledge about water springs was explored using cognitive analysis of conceptual pathways. The aim of the study concerned the reconstruction of the students' knowledge development on water springs in mountain areas in order to better understand which factors are important for conceptual change. With a learning environment, whose efficacy was empirically reviewed beforehand, a group of ten students acquired knowledge of springs, in which their learning pathways were reconstructed from their written and oral statements. Data was obtained from student drawings and texts, knowledge tests, student interviews and videos of student work phases and evaluated using a structuring qualitative content analysis. In this paper, the knowledge construction and the individual learning pathways of two students are presented in form of case analyses. The two students display the range of possible individual learning pathways in an exemplary manner. The learners' previous knowledge proved to be decisive for the construction of knowledge but cognitive and motivational factors are just as influential. In particular previous knowledge, which was acquired through personal observations in social contexts, is distinguished by great stability so that inconsistencies between previous knowledge and instructional knowledge are not perceived in the learning process and despite great interest, very little progress in learning is achieved.*

**Keywords:** preconceptions, conceptual change, hydrological knowledge, cognitive analysis of conceptual pathways, mental model development

**Autorin:** Prof. Dr. Sibylle Reinfried, Pädagogische Hochschule Luzern,  
sibylle.reinfried@phlu.ch

## 1 Einleitung

Geowissenschaftliche Themen, wie z. B. der globale Klimawandel, die Eignung von Gesteinen für die Lagerung gefährlicher Abfälle oder die Voraussetzungen für die Entstehung von genießbarem Trinkwasser, werden heute von den Medien in zunehmendem Maße aufgegriffen und diskutiert. Die naturwissenschaftlichen Grundlagen dieser Themen, wie der Treibhauseffekt, die petrographischen Eigenschaften von Gesteinen oder die Ursachen von Schadstoffbelastungen im Grundwasser, sind allerdings nicht direkt beobachtbar. Beim Versuch, solchen Themen aufgrund eigener Überlegungen einen Sinn zu geben, greifen Laien auf Vorwissen und intuitive Vorstellungen zurück. In der vorliegenden Studie geht es um das Thema Wasserquellen, deren Entstehung ebenfalls der unmittelbaren Anschauung entzogen ist, weshalb sich so viele Mythen und Geschichten um Quellen ranken. Quellwasser spielt als Trinkwasser in vielen Gebirgsregionen eine große Rolle, so z.B. in manchen Alpengegenden, wo bis zu 98% der gesamten Trinkwassermenge aus Quellen bezogen wird (SCHWEIZERISCHER VEREIN DER GAS- UND WASSERVERSORGER, 2010). Aus hydrologischer Sicht sind Quellen eine Art Fenster in den unterirdischen Teil des Wasserkreislaufs und hervorragend dazu geeignet, die komplexen Prozesse der Grundwasserbildung, -speicherung und -verschmutzung besser zu verstehen. Aus der Perspektive der geowissenschaftlichen Bildung und Umweltbildung ist Quellenwissen für das Verständnis von hydrogeologischen Zusammenhängen von Bedeutung, um eine größere Akzeptanz für den Schutz von Grundwasser sowie Quellen als Trinkwasserlieferanten und Ökosysteme herbeizuführen. Für die Conceptual-Change-Forschung ist Quellenwissen ein ideales Studienobjekt, weil Quellen

mit sehr plausiblen subjektiven Überzeugungen und intuitiven Ideen darüber, wo Quellwasser herkommt und wie Quellen entstehen, assoziiert wird (REINFRIED, TEMPELMANN & AESCHBACHER, 2012). Um weit verbreitete Präkonzepte über Quellen dauerhaft zu verändern und die Grundlagen für ein fachlich korrektes Quellenverständnis zu legen, haben REINFRIED, AESCHBACHER, KIENZLER UND TEMPELMANN (2013) eine Lernumgebung zum Thema Quellen im Berggebiet für Schülerinnen und Schüler der 7. Klasse entwickelt, die in einer quantitativen Studie auf ihre Lernwirksamkeit getestet wurde. Die Analyse ergab einen signifikanten und relativ beständigen Wissenszuwachs. Quantitative Studien mit Prä- und Posttest-Designs sagen jedoch nichts darüber aus, warum nicht alle Lernenden ihre Präkonzepte verändern, bzw. mit welchen Schwierigkeiten sie im Lernprozess zu kämpfen haben. Qualitative Forschung kann hingegen Erkenntnisse aus quantitativen Analysen in ihren unterschiedlichen Ausprägungen erklären. Um herauszufinden, wie Lernende ihr Wissen mit einer Lernumgebung, die auf lernpsychologischer Grundlage konzipiert wurde, aufbauen und verändern, wurde die Wissensentwicklung von 12-jährigen Schülerinnen und Schülern im Rahmen von Fallstudien detailliert untersucht. Bis jetzt gibt es in der geographischen Lernforschung meines Wissens nur die Studien von FELZMANN (2013) und REINFRIED ET AL. (2013), die Vorstellungsänderungen in ihrem zeitlichen Ablauf kleinschrittig untersuchen. Die Erkenntnisse der hier vorgelegten Untersuchung leisten einen weiteren Beitrag zu diesem Forschungsfeld. Sie geben einen Einblick in die Wissenskonstruktion eines hydrogeologischen Konzepts und zeigen auf, von welchen Faktoren eine erfolgreiche konzeptuelle Entwicklung hydrologischen Fachwissens abhängt.

## 2 Theoretischer Rahmen

Die Fähigkeit Wissen zu nutzen, es auf ähnliche gelagerte Fragestellungen anzuwenden und Beziehungen zwischen vergleichbaren Wissensinhalten herzustellen, wird als konzeptuelles Verständnis bezeichnet (BRANSFORD, BROWN & COCKING, 2000). Konzeptuelles Verständnis ist nur möglich, wenn das Wissen belastbar ist, d.h. über den Moment hinaus Gültigkeit hat, weil es durchdacht, hinterfragt und überprüft wurde. Da alles Lernen vor dem Hintergrund des Vorwissens geschieht (WANDERSEE, MINTZES & NOVAK, 1994), welches jedoch häufig aus intuitiven Ideen und Commonsense-Überzeugungen besteht, hängt die Entwicklung von konzeptuellem Verständnis im schulischen Kontext von den Änderungen von Vorwissen ab.

In dieser Forschung wird davon ausgegangen, dass Denken und Verstehen mit Hilfe von mentalen Modellen erfolgt, und dass Conceptual Change Ausdruck von wesentlichen Veränderungen von mentalen Modellen (MM) ist. MM werden hier im Sinne NERSESIANS (2013, 407) als komplexe Wissensstrukturen verstanden, in denen eine Wahrnehmung (z.B. ein Begriff, Prozess oder eine Situation) als idealisierte und schematisierte Abstraktion in Form von Ersatzobjekten, -eigenschaften, -beziehungen oder -funktionen mental repräsentiert ist. MM ermöglichen mentale Simulationsprozesse, aus denen Schlussfolgerungen gezogen werden können, die zu neuen Einsichten führen, die bei der Evaluation und Anpassung eines MM und damit bei der Weiterentwicklung einer Vorstellung eine Rolle spielen. Die MM von Laien bestehen vorwiegend aus sog. Präkonzepten oder alternativen Konzepten. Sie werden ihrerseits aus kognitiven Schemata, intuitiven Erfahrungen, Alltagsüberzeugungen, aber auch Begriffswissen und anderen Wissensstrukturen aufgebaut

(SEEL, 2003, 253). Präkonzepte sind im Langzeitgedächtnis verankert und bilden die Grundlage des wenig fundierten intuitiven schnellen Denkens und Urteilens in Alltagssituationen (HOLLAND, HOLYOAK, NISBETT & THAGARD, 1986, 13).

Kognitive Schemata spielen beim Wissenserwerb eine große Rolle. Nach PIAGET (1975) ist Wissenserwerb die Anpassung vorhandener kognitiver Schemata an eine aktuelle Situation durch das ständige Wechselspiel von Assimilation und Akkommodation. Assimilation bedeutet das Einfügen von Wahrgenommenem in bereits vorhandene, kognitive Strukturen. Akkommodation ist die Anpassung eines Schemas an eine wahrgenommene Situation, die mit den vorhandenen Schemata nicht bewältigt werden kann. Wenn also Informationen nicht zu dem passen, was man weiß und denkt, werden die vorhandenen kognitiven Strukturen durch Akkommodation so verändert, dass sie der Realität (wieder) entsprechen, d.h. nicht im Widerspruch zu anderen Schemata oder der Gesamtstruktur stehen und zukünftig für eine verbesserte, da ausdifferenziertere Problemlösung dienlich sind (vgl. MONTADA, 2003, 436). Piagets Erkenntnisse, die später weiter differenziert wurden, bilden nach wie vor die Basis der Conceptual-Change-Forschung in der Naturwissenschaftsdidaktik. Diese Sichtweise des Wissenserwerbs, der kognitive Konstruktivismus, bildet den theoretischen Rahmen dieser Studie. Der Impuls zur Differenzierung bestehender kognitiver Strukturen entsteht aus der Erfahrung eines Ungleichgewichts, einer sogenannten kognitiven Dissonanz oder eines kognitiven Konflikts, zwischen einem bestehenden Schema und einer neuen Erfahrung oder Wahrnehmung. Da Informationen durch Assimilation und Akkommodation gefiltert und dadurch verzerrt werden, beruht Wissen sowohl auf Erfahrung als auch auf kontinuierlichen Anpassungen, die aus fortwäh-

renden Reaktionen auf kognitive Konflikte bestehen, die zu einer Wiederherstellung des kognitiven Gleichgewichts oder neuen und komplexeren kognitiven Schemata führen (MARCHAND, 2012, 167). Folglich sind die mentalen Modelle der gleichen Sache bei allen Menschen unterschiedlich, was für das Lernen im schulischen Kontext von fundamentaler Bedeutung ist.

Die Frage nach dem Repräsentationsformat von individuellem Wissen im Gedächtnis wird in den Kognitionswissenschaften im Rahmen verschiedener Ansätze lebhaft diskutiert. Bisher haben die verschiedenen Conceptual-Change-Experten keinen Konsens darüber gefunden, welche Veränderungen des konzeptuellen Systems als Conceptual Change zu bezeichnen sind und welche kognitiven Mechanismen dem Conceptual Change zugrunde liegen (RUSANEN & LAPPI, 2013; BÖDECKER, 2006). In der naturwissenschaftlichen Lernforschung trifft man am häufigsten auf den Ansatz der ‚Framework theory‘ oder Rahmentheorie (VOSNIADOU & BREWER, 1994; VOSNIADOU, 2002; CHI & ROSCOE, 2002) und den Ansatz des ‚Knowledge-in-pieces‘ oder Fragmentierungsansatz (DISSA, 1993; Kurzbeschreibung der Ansätze bei REINFRIED, 2013). Die Rahmentheorie geht davon aus, dass disziplinspezifische, intuitive Konzepte von Laien *kohärente, systematische und miteinander verbundene kognitive Strukturen* sind und im Wesentlichen den Status einer naiven Theorie haben. Für einen Conceptual Change müssen implizite zentrale Annahmen verändert werden (VOSNIADOU, 2002), was einem radikalen Conceptual Change entspricht. Da Veränderungen von tief verankerten Denkstrukturen jedoch selten radikal, sondern meist graduell verlaufen und Zeit benötigen, werden im Lernprozess Synthesemodelle aus Vorwissen und neu erworbenem Wissen gebildet (VOSNIADOU & BREWER, 1994). DISSA (1993) argumentiert u.a.,

dass Konstrukte von Laien nicht das Niveau einer Theorie, auch nicht das einer naiven Theorie, erreichen, auch wenn die Fragmente subjektiv zusammenhängen. DISSA, GILLESPIE & ESTERLY (2004) führen aus, dass der Begriff der Kohärenz, wie er in der Literatur beschrieben wird, an sich problematisch ist, weil die Beurteilung von Kohärenz einen Referenzrahmen verlangt, mit dem ein Konstrukt verglichen wird. BÖDECKER (2006, 57) kritisiert, dass die Rahmentheorie nicht erklärt, wie Kohärenz mit Bezugnahme auf deskriptive Instrumente der Wissensrepräsentation zu begreifen ist. Im Gegensatz dazu sieht der ‚Knowledge-in-pieces‘-Ansatz (KIP) Konzeptionen von Laien als fragmentiert und hochgradig kontextualisiert (DISSA, 2002, 2008). Sie sind *ein lockeres Geflecht vieler elementarer kognitiver Einheiten*, die diSessa ‚phenomenological primitives‘ oder ‚P-prims‘ nennt. P-prims sind Abstraktionen mehrerer sensorischer Schemata oder Handlungserfahrungen, die unmittelbar einleuchtend sind und die Grundlage für die Begründung von Alltagserfahrungen liefern. Sie liegen jedoch außerhalb des bewussten, willentlichen Zugriffs, denn das Individuum weiß nicht, dass solche Strukturen existieren. P-prims werden wirksam, wenn sie durch bestimmte Situationen oder assoziative Wissensstrukturen aktiviert werden, d.h. sie sind grundsätzlich kontextgebunden, aber wenig kohärent (i.S.v. logisch, zusammenhängend und nachvollziehbar), da sie je nach Perspektive ganz unterschiedlich zur Interpretation von Situationen herangezogen werden. In diesem Sinn sind sie vergleichbar mit den kognitiven Schemata Piagets (DISSA, 1993, 112). Conceptual Change bedeutet nach diSessa nicht die Veränderung der P-prims, sondern das Hinzufügen von neuen Wissens-elementen, die Systematisierung von Wissens-elementen in ein größeres Ganzes und die Veränderung der Prioritäten, nach denen die P-prims

aktiviert werden. VOSNIADOU (1994) beanstandet an diSessas theoretischem Ansatz u.a., dass er keine Erklärungen dafür liefern kann, warum bestimmte Präkonzepte schwieriger zu überwinden sind als andere. Das Ziel dieser Studie ist es nicht, Argumente für oder gegen diese Ansätze zu finden. Es geht vielmehr darum, diese beiden Conceptual-Change-Theorien bei der Rekonstruktion der Wissensentwicklung der Lernenden mitzudenken und darauf zu achten, mit welchem Ansatz die analysierten Denkstrukturen besser interpretiert werden können.

Individuelle mentale Wissensrepräsentation können durch kognitive Konflikte erfolgreich verändert werden (POSNER, STRIKE, HEWSON & GERTZOG, 1982; Strike & POSNER, 1992). Unter einem kognitiven Konflikt wird eine Unzufriedenheit mit einer bisherigen Problemlösung oder Weltansicht verstanden, die nach einer Klärung verlangt. Wenn eine neue Information trotz eines kognitiven Konflikts nicht zur Akkommodation des Vorwissens führt, sondern mit einer bereits existierenden Vorstellung in Einklang gebracht, also assimiliert werden kann, kann es zu Fehlern und Irrtümern kommen. Wenn die neue Information hingegen grundlegend im Widerspruch zum Vorwissen steht, muss dieses aufgegeben oder wesentlich umstrukturiert, also akkommodiert werden, damit die neue Vorstellung entwickelt und akzeptiert werden kann (MARCHAND, 2012). Laut POSNER ET AL. (1982) sind vier Bedingungen für einen Conceptual Change notwendig: (1) Unzufriedenheit mit einer vorhandenen Vorstellung; (2) Verständlichkeit der neuen Vorstellung, d.h. sie muss Sinn machen; (3) Glaubwürdigkeit der neuen Vorstellung, d.h. sie muss einleuchten; (4) Fruchtbarkeit der neuen Vorstellung, d.h. sie muss neue Einsichten oder die Herleitung weiterer Hypothesen ermöglichen. Da kognitive Konflikte nicht notwendigerweise zu Concep-

tual Change führen müssen (vgl. HEWSON, 1981), schlägt CLEMENT (2013, 421) vor, Instruktionsstrategien zu verwenden, die aus einer Kombination von kognitiven Dissonanzen und Analogien bestehen, da Analogien Vorstellungsänderungen ebenfalls begünstigen können (COLL, FRANCE & TAYLOR, 2005). Geeignet sind auch Vorgehensweisen, bei denen Lernende zuerst ihre Vorstellungen erklären und diese dann mit der wissenschaftlichen Vorstellung kontrastieren, wobei auch kognitive Konflikte entstehen (McCLOSKEY, WASHBURN und FELCH, 1983; CHIU, CHOU und LIU, 2002). SCHECKER und NIEDERER (1996) gehen davon aus, dass sich Lernende bei dieser Strategie der unterschiedlichen Gesichtspunkte bewusst werden.

### 3 Bisherige Forschung über intuitive hydrologische und hydrogeologische Konzepte

Das Verständnis von Laien für hydrologische und hydrogeologische Prozesse ist ganz generell lückenhaft und fehlerbelastet. Studien zu Alltagsvorstellungen über Grundwasser ergaben, dass Jugendliche und Erwachsene weder angemessene Vorstellungen über die Entstehung, Speicherung und Dynamik von Grundwasser, noch über die Dimensionen von Grundwasservorkommen haben (DICKERSON & DAWKINS, 2004; DICKERSON, CALLAHAN, VAN SICKLE & HAY, 2005; REINFRIED, 2006). Dasselbe gilt für alle Teilbereiche des Wasserkreislaufs, also Verdunstung, Kondensation, Niederschlag, Abfluss, Quellen, den Zusammenhang von Gewässern und ihren Einzugsgebieten und das Wassermanagement (z.B. BAR, 1989; BEN-ZVI-ASSARF & ORION, 2005; CHANG, 1999; DOVE, 1998; DOVE, EVERETT & PREECE, 1999; ÖSTERLIND & HALLDÉN, 2007; REINFRIED ET AL., 2012; SHEPARDSON, WEE, PRIDY, SCHELLENBERG

& HARBOR, 2009). Zu Vorstellungen von Quellen liegen bis jetzt nur wenige Studien vor, obwohl die Frage, warum Quellen über Generationen hinweg ununterbrochen – selbst in lang andauernden Trockenzeiten – und in annähernd gleichbleibender Menge Wasser schütten können, die Menschheit schon immer beschäftigt hat. Eine weit verbreitete, plausible, wenn auch unzutreffende Erklärung für dieses Phänomen ist jene, dass das Wasser in großen unterirdischen Seen gespeichert ist, eine Idee, die schon aus der Antike bekannt ist. Bei Schülern kommt häufig die Vorstellung vor, dass es sich bei den unterirdischen Wasservorkommen um geschlossene Hohlräume handelt, in denen das Wasser unter Druck steht, gegen die Schwerkraft aufsteigt und in Quellen austritt. Diese Überlegung beruht u.a. auf der Erfahrung, dass hartes Gestein nicht von Wasser durchdrungen werden kann, wenn es keine Risse, Spalten oder Höhlen aufweist (REINFRIED ET AL., 2012).

Wasserführende unterirdische Hohlräume kennt man tatsächlich aus verkarsteten, durch Lösungsverwitterung gekennzeichneten Kalkgebieten, wobei es sich allerdings um relativ seltene Phänomene handelt, denn verkarstungsfähige Karbonatgesteine machen nur 13% der Gesteine der Erdoberfläche aus (PRESS & SIEVER, 1995). Um die Frage zu beantworten, warum Quellen auch in langen Trockenperioden noch Wasser schütten, kann die Karstquelle, die aus verkarsteten Kalkgesteinen entspringt, keine Antwort geben. Sie zeichnet sich gerade nicht durch eine ununterbrochene und annähernd gleichbleibende Schüttung aus, sondern ist stark von Niederschlägen abhängig. Karstquellen sind meist intermittierende Quellen, die bei Starkregen oder Schneeschmelze stark anschwellen und in niederschlagsarmen Zeiten trockenfallen. Schülervorstellungen über Quellen wurden erstmals systematisch durch REINFRIED ET AL. (2012) erhoben und auf lernpsycho-

logischer Grundlage analysiert. Anschließend wurde Lernmaterial erarbeitet, mit dem Lernende ihr Vorwissen über Quellen in Richtung wissenschaftlicher Quellenvorstellungen verändern und erweitern können. Der für die Instruktion gewählte Quellentyp war jener der Porenquelle, der im Schweizer Mittelland häufig vorkommt, dessen Funktionsweise aber kontra-intuitiv ist (vgl. Kap. 4). Das Lernmaterial bildete die Grundlage für die Konzeption einer Lernumgebung (LU), die in dieser Studie zum Einsatz kam und mit der das konzeptuelle Verständnis der Lernenden erweitert werden sollte.

#### **4 Ziel der Untersuchung**

Das Ziel dieser Studie war es, die Wissenskonstruktionsprozesse von 12-jährigen Lernenden bei ihrer Arbeit mit einer lernpsychologisch optimierten LU zum Thema Porenquellen zu untersuchen. Im Rahmen von fallbasierten Lernpfadanalysen wurden die Veränderungen des Vorwissens der Lernenden im Verlauf ihres Lernprozesses rekonstruiert und analysiert, um dadurch Erklärungen für erfolgreiche und weniger erfolgreiche konzeptuelle Veränderungen zu finden.

#### **5 Lernumgebung und Lernmaterial**

Gemäß der konstruktivistischen Lerntheorie wird konzeptuelles Verständnis entwickelt, indem neue Informationen mit bestehendem Wissen verknüpft und organisierte und integrierte Wissensstrukturen gebildet werden (LINN, EYLLON & DAVIS, 2004; SHAVELSON, 2009). Bezogen auf die Entstehung von Quellen im Bergland heißt dies, dass ein Lernender eine Reihe von geologischen, geomorphologischen und hydrologischen Konzepten zur Kenntnis nehmen

und miteinander verknüpfen muss, z.B. dass die Niederschlagsmenge variabel ist, Gesteine porös und permeabel sind und in großflächigen Schichten angeordnet sein können, Gesteine eine Speicherkapazität haben, die Wasserschüttung einer Quelle schwanken kann, Grundwasser in Aquiferen gespeichert wird und Bergflanken Aquifere anschneiden. Wenn Lernende ein fortgeschritteneres Verständnis entwickelt haben, können in einem späteren Schritt weitere Konzepte, wie zum Beispiel der Einfluss des Einzugsgebiets auf die Funktion einer Quelle, hinzukommen, welche dann mit dem bestehenden Wissen sinnvoll verknüpft werden können. Der Anwendungsbezug des Themas liegt in der Qualität von Quellwasser aus Quellen im Lebensumfeld der involvierten Schülerinnen und Schüler. Der im ausgewählten Gebiet häufige Quellenprototyp ist jener der Porenquelle, die im hügeligen Schweizer Mittelland mit seinen mächtigen quartären Sedimenten und tertiären Sedimentgesteinen an Berghängen entspringt, also in der Natur wirklich angetroffen werden kann.

Um die Lernenden, die kein substantielles hydrogeologische Vorwissen haben, nicht zu überfordern, bezieht die LU nur elementare Kernkonzepte ein, die notwendig sind, um die Entstehung von Quellen in Bergregionen und die Bedeutsamkeit ihrer Struktur für die Quellwasserqualität zu verstehen. Porenquellen entstehen dadurch, dass Wasser in den Boden infiltriert und in die makroskopisch meist nicht erkennbaren Poren einer durchlässigen Gesteinsschicht eindringt. Über einer wenig durchlässigen darunterliegenden Schicht wird das versickerte Wasser gestaut, und es bildet sich darüber, in den Poren der permeablen Schicht, ein Grundwasserkörper. Das Ausstreichen der permeablen Schicht, also des Aquifers, an einem Talrand, lässt das Grundwasser austreten. Dieses Funktionsprinzip steht in fundamentalem Gegen-

satz zu der herrschenden Vorstellung, dass Quellwasser seinen Ursprung in unterirdischen Seen und Kavernen hat, aus denen es gegen die Schwerkraft zur Quelle aufsteigt (REINFRIED ET AL., 2012). Die Hohlraumvorstellung ist jedoch nicht grundsätzlich fehlerhaft, denn in Kalkgebieten des Schweizer Juras und in den Kalkalpen kommt der Spezialfall der Karstquelle tatsächlich vor, wobei sich ihre Entstehung und Struktur von der intuitiven Schülervorstellung wesentlich unterscheidet (vgl. Kap. 3).

Es geht also in dieser Studie nicht darum, falsches und richtiges Wissen zu klassifizieren, sondern die Schülervorstellungen in Richtung der wissenschaftlichen Sicht von Quellen zu erweitern. Die Schülervorstellungen werden nicht als hinderliche Fehlvorstellungen gesehen, sondern als nützliche konzeptuelle Anknüpfungspunkte. Sie bildeten die Grundlagen für die Konstruktion der LU (REINFRIED ET AL., 2013). In Anlehnung an POSNER ET AL. (1982) sollte die LU verständlich, einleuchtend und fruchtbar sein, um die beabsichtigten Vorstellungsänderungen ohne kognitive Überlastung zu erreichen. In einer quantitativen Studie konnte die Wirksamkeit der LU nachgewiesen werden, so dass zu Beginn der hier vorgestellten Studie davon ausgegangen werden konnte, dass die LU für den Aufbau und die Rekonstruktion von Quellen(vor)wissen geeignet ist. Die theoretische Fundierung der Entwicklungsprozesse und der Aufbau der LU sind ausführlich in REINFRIED ET AL. (2013) beschrieben.

Was die unterrichtsmethodische Struktur der LU betrifft, wurde ein kognitiv aktivierender Aufbau mit Phasen rezeptiven und gelenkt-entdeckenden Lernens gewählt, der für Lernende ohne domänenspezifisches Wissen geeignet ist (vgl. MAYER, 2009). Die Struktur lehnt sich an das Basismodell ‚Knowledge building and concept building‘ aus der Lernskript-Theorie von OSER & BAERISWYL (2001, 1054) an und ist

als sorgfältig orchestrierte Sequenz von Unterrichtsschritten mit progressivem Aufbau und zunehmender Komplexität organisiert (vgl. Tabelle 1). Aus forschungsmethodischen Gründen wurde der Lernphase eine Vorerhebung vorangestellt, und im Hinblick auf die Evaluation des finalen Wissensstands der Lernenden und die Notwendigkeit einer Reflexionsphase über den individuellen Lernprozess eine Nacherhebung angefügt.

Die Versuchspersonen (Vpn) wurden vor der Intervention befragt, was sie sich unter einer Quelle vorstellen. Anschließend setzten sie sich mit dem Lernmaterial auseinander, das aus einem Lehrtext (LT), Anschauungsmaterial und verschiedenen Modellen, besteht. Mit dem LT (vgl. REINFRIED & AESCHBACHER, 2013) wurden neue Informationen über Porenquellen bereitgestellt, die in Einzelarbeit studiert wurden. Der LT

baut auf einem Gedankenexperiment und Analogien auf und vermittelt die folgenden Kernkonzepte hinsichtlich der Entstehung von Porenquellen:

- Grundwasser wird in Poren, die sich zwischen Kiesgeröllen und Sandkörnern befinden, gespeichert. Poren gibt es in lockeren Kies- und Sandablagerungen, aber auch in deren verfestigten Varianten, den Konglomeraten und Sandsteinen.
- Da die Poren miteinander verbunden sind, kann das Grundwasser durch hartes Gestein ganz langsam hindurchfließen.

Diese für die Lernenden i.d.R. fundamental neue Perspektive hat das Potential, einen kognitiven Konflikt auszulösen. Aufgrund

**Tab. 1:** Struktur und Lerngelegenheiten der Lernumgebung

Aufbau der Lernumgebung	Vorerhebung (t1)	Lernphase					Nach-erhebung (t3)
		Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3 (t2)	Schritt 4	Schritt 5	
<b>Struktur</b>	Aktivierung des Vorwissens vier Wochen vor der Lernphase	Re-Aktivierung und Reflexion über das Vorwissen	Einführung des Porenquellenkonzepts	Wiederholen der Kernelemente des Porenquellenkonzepts	Anwendung und Vergleichen des Porenquellenkonzepts mit einem zweiten Quellentyp	Anwendung der Quellenkonzepte in komplexerem Kontext	Evaluation und Reflexion
<b>Eckpunkte des Lernprozesses</b>	Initiale Quellenvorstellungen in Fragebogen, Zeichnung und Text externalisieren	Einzelinterview über die in der Vorerhebung externalisierte Quellenvorstellung	Lehrtext bearbeiten	Infos aus Lehrtext in eigener Zeichnung und Text rekapitulieren	Gesteins-handstücke untersuchen und mit Experimentier-Set experimentieren	Mit Landschaftsmodellen experimentieren	Finale Quellenvorstellung in Fragebogen, Zeichnung und Text externalisieren; Einzelinterviews zur Überprüfung des finalen Wissens u. Reflexion über Lernprozess

Anmerkung: t1, t2 und t3 beziehen sich auf Zeitpunkte, zu denen die Schülerinnen und Schüler Zeichnungen und Texte ihres aktuellen Wissensstandes angefertigt haben.

der Tatsache, dass ein einzelner kognitiver Konflikt nicht notwendigerweise zu einer Vorstellungsänderung führt (CHINN & BREWER, 1998), wurden in die Intervention weitere milde Dissonanz-produzierende Konfrontationen eingebaut.

Das Anschauungsmaterial diene dazu, das Aussehen eines Gesteins mit seinen Eigenschaften zu verbinden, d.h. auch Verknüpfungen der makroskopischen und mikroskopischen Maßstabebene des Porenquellenphänomens zu erreichen. Gestein kann, wie oben ausgeführt, wasserdurchlässig sein, auch wenn es hart und kompakt ist. Dies ist eine Frage der Betrachtungsdimension: Ein makroskopisch dichter, sich hart anführender, solider Sandstein erweist sich unter dem Mikroskop als porös und permeabel. Wenn verstanden ist, dass ein Sandstein nichts anderes ist als Sand, dessen Körner an ihren Kontaktstellen durch einen natürlichen Zement zusammengehalten werden, dann leuchtet auch ein, dass er ein Wasserspeicher sein kann, aus dem über lange Zeit kontinuierlich Wasser heraus fließt, auch in langen Trockenzeiten. Im nächsten Schritt wurden darum die Unterschiede von verschiedenen Sedimentgesteinen anhand von Gesteins-handstücken und Lupen mit 10-facher Vergrößerung untersucht. Mit rasterelektronenmikroskopischen Fotos wurde ein Blick in das Innere der Gesteine geworfen, um das anforderungsreiche Verknüpfen von makroskopischer mit mikroskopischer Ebene zu erleichtern.

Daran schloss das paarweise Experimentieren mit Modellen an, mit denen die zuvor vermittelten Informationen als dynamisches Geschehen studiert werden konnten (PET-Flaschenexperimente, vgl. REINFRIED, 2015). Mit einem einfachen Experimentierset werden zunächst die beiden Quellentypen Porenquelle und die Karstquelle einander gegenübergestellt und dann ihre unterschiedlichen Eigenschaf-

ten, die Auswirkungen auf die Quellwasserqualität haben, erforscht. Damit wurde der Alltagsbezug hergestellt, denn der Eintrag von Verschmutzungen ins Grundwasser wirkt sich in Sandsteingebieten anders auf Quellwasser aus, als in Kalkgebieten. Aus diesem Grund wurde in der LU mit zwei Quellentypen, der Karstquelle und der Porenquelle experimentiert. Konkret ging es bei den Experimenten darum, Hypothesen zu formulieren, Vorhersagen zu machen und zu beobachten,

- dass die Dauer der Quellschüttung nicht nur von der Menge des Wasserinputs, sondern auch vom Substrat, aus dem die Quelle entspringt, abhängig ist.
- dass die Wasserqualität von Quellwasser von den Eigenschaften des Substrats, durch welches das verschmutzte Oberflächenwasser fließt, abhängt.

Um anschließend das neu gewonnene Wissen auf komplexere Verhältnisse zu übertragen, zu testen und zu festigen, experimentierten die Vpn mit großen (80cm x 80cm x 20cm) physischen Landschaftsmodellen, die das Schweizer Voralpengebiet realitätsnah darstellen. Ein Modell repräsentiert eine Porenquelle, das andere eine Karstquelle. Mit diesen Landschaftsmodellen erhielten die Lernenden ein anschauliches, einprägsames und plausibles Abbild der beiden Quellentypen in der Natur. Mittels der Größe der Quellmodelle wurde noch zusätzlich ins Spiel gebracht, dass eine Quelle ein Einzugsgebiet hat, und dass die Schichten eine flächenhafte Ausdehnung besitzen, was für das lange und kontinuierliche Fließen von Wasser aus einer Porenquellen von großer Bedeutung ist. Durch verschiedene Experimente mit den Modellen sollte

- der Zusammenhang von Quellschüttung, Gesteinsaufbau des Untergrunds

und Größe des Einzugsgebiets erkannt werden.

- das System Quelle als multifaktorielles und multikausales Phänomen wahrgenommen und nachvollzogen werden, dass Wasseraustritte im Gebirge die Folge des Zusammenwirkens von Relief, Geologie und Hydrologie sind.

## 6 Methoden

Lernabhängige Veränderungen von MM werden in dieser Studie als Ergebnis der Wechselwirkungen zwischen den bestehenden individuellen kognitiven Strukturen und den Lernaktivitäten einer Vpn verstanden. Die lernabhängigen Verän-

derungen können nicht direkt beobachtet werden, sondern müssen durch Schüleräußerungen beschrieben und aus pädagogischer Sicht interpretiert werden. Das heißt, dass nicht das MM an sich, sondern nur seine externalisierte Form studiert werden kann (AL-DIBAN, 2002, 109). Um individuelle, bisher unbekannte Denkstrukturen in ihrer Tiefe offenzulegen, eignen sich qualitative Datenerhebungstechniken aufgrund ihrer Offenheit und ihres explorativen Charakters (FLICK, 2009; PATTON, 2002). Aus den externalisierten Schülervorstellungen können Rückschlüsse auf ihre inneren MM gezogen werden (CLEMENT, 2013, 413). Sie bilden die in der Situation konstruierten Vorstellungen der Vpn ab, die sich auf deren intuitives und

**Tab. 2:** Kategorien, mit denen das Wissen von Porenquellen erfasst wurde (REINFRIED ET AL., 2013).

Kategorien	Subkategorien	Erläuterung
<b>Definition einer Quelle</b>		Allgemeine Charakterisierung der wesentlichen Eigenschaften oder Merkmale einer Quelle
<b>Geologische Voraussetzungen für Quellen</b>	<i>Struktur der Erdkruste</i>	Charakterisierung der Struktur der Erdkruste (z. B. strukturlos, geschichtet)
	<i>Gesteinseigenschaften</i>	Charakterisierung der Eigenschaften der Erdkruste in Bezug auf Wasser (Porosität, Permeabilität, Kompaktheit, Filterwirkung, usw.)
	<i>Unterirdisches Wasservorkommen</i>	Charakterisierung der Art und Weise, wie unterirdisches Wasser vorliegt (z. B. in Höhlen, Kanälen, Poren)
<b>Input/Output</b>		Erkennen und/oder Beschreiben des Zusammenhangs zwischen Wasserzufluss (z. B. Regen) und Quellschüttung
<b>Qualität von Quellwasser</b>		Beschreibung der Qualität von Quellwasser (z. B. rein, sauber) und von Einflüssen auf die Qualität (z. B. Eintrag von Jauche)
<b>Ursachen für Wasseraustritt</b>	<i>Geomorphologische Ursachen</i>	Geomorphologische Gründe für den Austritt von Grundwasser (Anschnitt eines Aquifers am Hang, Austritt aus Felswand)
	<i>Physikalische Ursachen</i>	Physikalische Ursachen für den Austritt von Wasser (Gravitation, Stauwirkung des Stauers, usw.)
<b>Darstellung des Quellaustritts</b>		Der Quellaustritt befindet sich in irgendeiner Form an der Erdoberfläche (am Hang/Hangfuß, in Geländemulde, an Felswand, auf ebener Fläche, usw.).

deklaratives Wissen, ihre Erfahrungen, Erlebnisse und die Verknüpfung dieser Bereiche in der Lernsituation beziehen. Für die Beschreibung der inneren MM wurden in dieser Studie alle Schüleräußerungen, die Einblick in die Schülervorstellungen geben können, ausgewertet. Die Lernprozesse jedes einzelnen Lernenden bei seiner Arbeit mit der LU wurden mit Video aufgezeichnet und alle vom Lernenden produzierten mündlichen und schriftlichen Äußerungen qualitativ im Rahmen eines iterativen Prozesses analysiert und die Aussagen anschließend nach einem eigens entwickelten Kategoriensystem kategorisiert (s. Tabelle 2; vgl. Kap. 5.3). Diese Art der differenzierten Erfassung und Auswertung von Schüleräußerungen ist nicht nur dazu geeignet, die mentale Modellbildung der Lernenden zu rekonstruieren, sondern dient auch dazu, neue Hypothesen über die Entwicklung der Vorstellungsänderungen im Laufe des Lernprozesses zu generieren (FLICK, 2009).

## 6.1 Teilnehmer

Aus administrativen Gründen musste eine Kooperationsschule der Pädagogischen Hochschule Luzern für diese Studie ausgewählt werden. Der Schulort befand sich im hügeligen, ländlichen Gebiet des Schweizer Mittellands, wo an den Hängen Quellen vom Typ Porenquellen austreten und wo eine intensive landwirtschaftliche Bewirtschaftung der Felder betrieben wird, die auch das Düngen mit Gülle einschließt. Mit der Situierung der Problemstellung im lokalen Kontext sollten das Interesse und die Motivation der Lernenden für das Thema Quellen gesteigert werden. Im Rahmen der Vorerhebung wurden aus allen Klassen des 7. Schuljahres dieser Schule per Losentscheid zwei Klassen mit insgesamt 41 Vpn ausgewählt und mittels eines

Fragebogens über ihre Quellenvorstellungen befragt. Bei der Rekrutierung wurde das 7. Schuljahr als Zielstufe gewählt, weil dieses bis zum Untersuchungszeitpunkt noch keinen nennenswerten Unterricht in Geographie und den Naturwissenschaften hatte und das Vorwissen der Schüler noch wenig durch schulische Instruktion beeinflusst war. Bei der Auswahl der beiden Klassen wurde außerdem darauf geachtet, dass sie denselben Lehrer in Geographie und Naturwissenschaften haben und bis zum Untersuchungszeitpunkt kein schulisches Wissen über Quellen vermittelt worden ist. Der in der Vorerhebung eingesetzte Fragebogen enthielt 30 Wissensfragen zum Thema Quellen und die Aufforderung die eigene Quellenvorstellung zu zeichnen und schriftlich zu beschreiben (vgl. REINFRIED ET AL., 2012). Für die Auswahl der Vpn für die Lernpfadanalyse wurden die Daten der 41 Jugendlichen auf ihr allgemeines Quellenverständnis untersucht. Fünf Schülerinnen und fünf Schüler (im Schnitt 12.4 Jahre alt), die sehr unterschiedliche Quellenvorstellungen zeigten, wurden für die Lernprozessanalyse ausgewählt. Der Vorteil eines solchen deduktiven Vorgehens liegt darin, dass möglichst unterschiedliche Fälle berücksichtigt werden können, die eine maximale Bandbreite an Informationen erwarten lassen. Mit dem Prinzip der Varianzmaximierung soll trotz der geringen Probandenzahl bei qualitativen Studien eine maximale Heterogenität der Aussagen erreicht werden (PATTON, 2002), wodurch auch Aspekte entdeckt werden können, die nicht von vornherein bedacht wurden. Von den zehn Fallstudien werden in dieser Publikation zwei Beispiele vorgestellt.

## 6.2 Datenerhebung und Instrumente

Da MM nicht direkt beobachtbar, theore-

tisch nicht eindeutig definiert und nicht permanent existierende Konstrukte sind (AL-DIBAN, 2002, 108), können sie nur über ihre dekodierten Repräsentationen untersucht werden. Dafür eignen sich wegen ihrer Offenheit qualitativ orientierte Erhebungsmethoden, wie Interviews, Schülerzeichnungen und -texte (FLICK, 2009; PATTON, 2002). Durch die Kombination verschiedener Datenquellen können die subjektiven Konstruktionen der Vpn adäquat erfasst, umfassender beschrieben und so besser verstanden werden. Diese Strategie der Triangulation dient in qualitativen Studien auch dazu, eine höhere Validität der Forschungsergebnisse zu erreichen (vgl. FLICK, VON KARDORFF & STEINKE, 2004). Die Datenerhebung war so angelegt, dass den Vpn während ihres Lernprozesses möglichst häufig Gelegenheiten geboten wurden, ihren Wissensstand zu externalisieren und ihre Denkprozesse offenzulegen. Jeweils zwei Jugendliche arbeiteten in einem Team zusammen. Zu Beginn der Lernphase (Schritt 1, Tab. 1) wurde mit jeder Vpn einzeln ein problemzentriertes Interview mit einer Dauer von 10 Minuten zu deren Quellenvorstellungen durchgeführt, welche die Vpn vier Wochen zuvor im Rahmen der Vorerhebung externalisiert hatte. Im Interview erklärte jede Vpn anhand ihrer eigenen Quellenzeichnung und ihrem Text, was sie sich unter einer Quelle vorstellt und woher sie ihr Wissen hat. Die Interviews hatten den Sinn, die konzeptuellen Strukturen, die den Zeichnungen und Texten zugrunde liegen, für die Analyse besser verständlich zu machen. Im Anschluss daran durchliefen die beiden Teampartner gemeinsam alle Schritte der LU bis zum Schlussinterview, das wieder getrennt durchgeführt wurde. Im Schritt 3, also nach ihrem Studium des LT, zeichneten und beschrieben die Vpn erneut, wie sie das Porenquellenkonzept zu diesem Zeitpunkt verstanden hatten und erklärten

es sich gegenseitig. Dieser Schritt war aus zwei Gründen sinnvoll: (1) die kurz zuvor aufgenommenen visuellen Informationen, die noch im Kurzzeitgedächtnis gespeichert sind, verblassen nicht so schnell; (2) Lernende, die ihr Wissen zeichnerisch darstellen und in ihrer Lerngruppe Bedeutungen austauschen und klären, explizieren und spezifizieren ihr Denken (AINSWORTH, PRAIN & TYTLER, 2011). Die Schritte 4 und 5 der Lernphase erfolgten in Form eines Teaching Experiments nach STEFFE, 1983, STEFFE, THOMPSON & VON GLASERSFELD, 2000; für die genauere Beschreibung s. REINFRIED ET AL., 2013.). In der Nacherhebung zeichneten und beschrieben die Lernenden ihre Quellenvorstellungen noch einmal und füllten denselben Fragebogen wie in der Vorerhebung aus. Abgeschlossen wurde die Untersuchung mit einem standardisierten leitfadengestützten Einzelinterview. Die gesamte Lernphase dauerte 90 Minuten und wurde videographiert.

### **Wissensfragen**

Die Stärke der Präkonzepte wurde mit Wissensfragen geprüft (Anhang A). Sie drückt sich in der Stabilität des Vorwissens gegenüber Versuchen, es zu verändern, aus (DOLE & SINATRA, 1998, 118). Die Resistenz von Präkonzepten kann dadurch getestet werden, dass Scheinplausibilitäten erzeugt werden, denen die Lernenden erliegen, wenn ihre Präkonzeptionen subjektiv kohärent strukturiert sind (AESCHBACHER, 1992). Da der Irrtum intuitiv geschieht, kann die Lernerreaktion auf Scheinplausibilitäten als ein Prädiktor für die Stabilität/Stärke von Präkonzepten verstanden werden. In Anlehnung an Aeschbacher (ebd.) wurde mit elf Items (Anhang A) geprüft, ob diese auch nach der Lernphase noch im Sinn der fehlerhaften Präkonzepte beantwortet werden, was ein Hinweis darauf ist, dass das ursprüngliche individuelle Konzept eine große Stabilität hat.

### ***Interviewleitfäden***

Die Interviewfragen für die in Schritt 1 verwendeten halbstandardisierten problemzentrierten Einzelinterviews waren auf die individuellen Zeichnungen und Texte jeder Vpn zugeschnitten. Damit sollten möglichst viele relevante Aspekte der vorunterrichtlichen Schülervorstellungen erfasst werden (vgl. WITZEL, 2000). Da beim Conceptual Change auch motivationale und soziale Faktoren eine Rolle spielen (PINTRICH, MARX & BOYLE, 1993), wurde nach der Herkunft des eigenen Wissens gefragt, um etwas über den Kontext, in dem das Wissen erworben worden war, zu erfahren. Die Herkunft des Wissens sagt etwas über die Identifikation mit der Sache aus, da erlebnishaft-episodisch erfasste Dinge und Inhalte, die mit starken Emotionen verbunden sind, schneller und nachhaltiger im Gedächtnis hängen bleiben, als reine Fakten (ROTH, 2011, 105; SINATRA & MASON, 2013, 387). Die Herkunft des Wissens kann daher als Prädiktor für die Identifikation mit dem Vorwissen gesehen werden. Für die Evaluation der finalen mentalen Modelle wurden im Rahmen der Nacherhebung mit Blick auf die Vergleichbarkeit der Schüleräußerungen strukturierte Interviewleitfäden gewählt (FLICK, 2009). Mit Sondierungsfragen (Anhang B), die sich auf die schwierigen, oft mit Fehlern behafteten Vorstellungen des Quellen-Konzepts beziehen, wurde überprüft, inwieweit die in der LU vermittelte wissenschaftliche Porenquellenvorstellung erreicht wurde. Diese Fragen waren in Übereinstimmung mit den Lernzielen der einzelnen Lernschritte entwickelt worden und dienten dazu, den finalen Wissensstand und die Robustheit des neuen Wissens in sachlogischer Hinsicht zu überprüfen. Die Konstruktvalidität des Fragebogenteils wurde von zwei Experten geprüft. Der Anhang C enthält Fragen zum Lernprozess der Vpn und ihrem Interesse

an der LU sowie Fragen, die die Bedingungen für einen Conceptual Change im Sinne POSNER ET AL. (1982) betreffen. Die Autorin und ein geschulter Mitarbeiter führten die Interviews durch.

### **6.3 Datenanalyse**

Folgende externalisierte Schüleräußerungen standen zur Verfügung:

- von jeder Vpn drei Quellenzeichnungen mit erläuterndem Text, welche die Quellenvorstellungen der Vpn zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten (t1, t2, t3, s. Tab. 1) im Lernprozess abbildeten,
- die Antworten jeder Vpn auf die Wissensfragen aus den Fragebogen der Vor- und Nacherhebung (Fragebogen publiziert in REINFRIED ET AL., 2013).
- die transkribierten und redigierten Gesprächsaufzeichnungen der Vpn aus den Arbeitsphasen mit der LU und die Interviewmitschnitte.

Alle Datenquellen jeder Vpn wurden mittels strukturierender qualitativer Inhaltsanalyse mit MAXQDA 10 auf der Grundlage eines Kategoriensystems, das sich auf die fachliche Angemessenheit der Lernvorstellungen bezieht, ausgewertet (KRIPPENDORP, 2004; MAYRING 2002, 2004, 2007; vgl. Tabelle 2). Die Entwicklung des Kategoriensystems ist bei REINFRIED ET AL. (2013) nachzulesen. Da das Vorwissen den Ausgangspunkt der Lernpfadanalyse bildete, wurden in einem ersten Durchgang alle Äußerungen jeder Vpn kategorisiert und gemäß den Schritten der Lernphase der LU zeitlich geordnet aufgelistet, wodurch die mentale Modellentwicklung jeder Vpn strukturiert dargestellt werden konnte. Um einen möglichst genauen Einblick in das Vorwissen zu erhalten, wurde anschließend das gesamte Datenmateri-

al auf alle Aussagen, die dem Vorwissen zugeordnet werden können, durchsucht. Die Aussagen wurden hinsichtlich ihrer Fachlichkeit analysiert, wobei zwischen externalisiertem geowissenschaftlichem Vorwissen, auch wenn dieses nicht aus Quellen-Kontexten stammte, und intuitiven Ideen unterschieden wurde. Mit geowissenschaftlichem Wissen sind z. B. Kenntnisse über den geologischen Bau der Erde, Kenntnisse über den Zusammenhang von versickertem Oberflächenwasser und Grundwasser, Karstphänomene oder geomorphologische Formen, wie Flusskolke oder Gletschertöpfe, gemeint. Intuitive Ideen sind z.B. unterirdische, weitgehend abgeschlossene Wasserblasen, Wasseradern oder die Idee, dass Wasser grundsätzlich einen ihm innewohnenden Druck hat, der ihm den Aufstieg gegen die Schwerkraft ermöglicht oder es aus dem Berg hinausdrückt. Das auf diese Weise erfasste Vorwissen diente als Ausgangspunkt der Lernpfadanalysen, an den die kategorienbasierten, zeitlich geordneten Schüleräußerungen anschlossen, die in Form einer explizierenden Inhaltsanalyse interpretiert wurden.

Der Indikator für einen Conceptual Change war, dass die finalen MM einen hohen Grad an Übereinstimmung mit dem instruktionalen Modell der Porenquelle aufwiesen, d.h. dass die folgenden Kernelemente des Porenquellenkonzepts in den Schüleräußerungen identifizierbar waren und in sinnvollen widerspruchsfreien Beziehungen zueinander standen:

1. Wechsellagerung von permeablen (z.B. Sandstein) und impermeablen Gesteinen (z.B. Ton, Mergel), wobei letztere als Stauhorizont wirken,
2. Vorhandensein von mikroskopisch kleinen, miteinander verbundenen Poren im permeablen Gestein, mit denen sich die Reservoir-Eigenschaften und Filter-

eigenschaften des Gesteins erklären lassen,

3. Fehlen von großen (makroskopisch) sichtbaren Hohlräumen in den Gesteinen,
4. Versickerung von Oberflächenwasser aufgrund der Gravitation,
5. Vorhandensein eines Reliefs, das sich dadurch ausdrückt, dass eine wasserführende Schicht an einem Hang angeschnitten wird und es zum Quellwasseraustritt kommt.

Aus dem Vergleich der finalen mit den initialen MM der Vpn wurden Rückschlüsse darüber gezogen, ob eine Vpn (1) kein oder sehr wenig neues Wissen assimiliert und ihr MM kaum verändert hat, (2) neues Wissen assimiliert und ein modifiziertes MM gebildet hat oder (3) eine Akkommodation des ursprünglichen Wissens und damit einen wesentlichen Conceptual Change vollzogen hat. Der Vergleich ermöglichte auch Hypothesen darüber, was die Ursachen für diese Ausprägungen sein könnten.

Folgende Schritte der Gütesicherung qualitativer Forschung wurden angewendet: Die intersubjektive Nachvollziehbarkeit der Analyse erfolgte mittels Intra- und Interkoderreliabilitäten und konsensueller Validierung (JACOBS, KAWANAKA & STIGLER, 1999). Das gesamte Datenmaterial wurde von einem geschulten Wissenschaftler und der Autorin regelgeleitet kategorisiert, verglichen und dann ein zweites Mal rücküberprüft. Danach durchlief das Datenmaterial das Analyseverfahren mehrmals in Form eines iterativen Prozesses, indem die individuellen Lernwege der Vpn mehrfach sorgfältig mit den Originaldaten abgeglichen und die Vpn miteinander verglichen wurden. Ein Subsample von drei Lernenden (33% der Daten) wurde von den beiden Wissenschaftlern unabhängig voneinander

kodiert und eine Interkoderreliabilität von 80% erreicht.

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Mentale Modellentwicklung am Beispiel von zwei Fallstudien

Die individuellen mentalen Modellentwicklungen von zwei Vpn, genannt Andi und Benni, werden im Folgenden detailliert dargestellt (Namen geändert; Alter der Schüler: 12 Jahre). Die beiden Fälle wurden ausgewählt, weil sie die außerordentliche Spannweite der individuellen Wissenskonstruktion repräsentieren und einen Eindruck davon geben, was in inhaltlich und methodisch identischen Lernsituationen in den Schülerköpfen abläuft. Der Wissenskonstruktionsprozess von Andi und Benni wurde anhand ihrer schriftlichen und mündlichen, transkribierten Daten zu drei Zeitschnitten (mit t1, t2 und t3 bezeichnet; vgl. Tab. 1; Abbildungen 1 und 2) rekonstruiert und wird hier in verdichteter Form wiedergegeben und anschließend zusammenfassend interpretiert. Wörtlich wiedergegebene Aussagen werden im Text in Anführungs- und Schlusszeichen gesetzt. In eckigen Klammern eingefügte Kommentare dienen dazu, die Schüleraussagen interpretierbarer zu machen. Die externalisierten Schülervorstellungen zu den drei Erhebungszeitpunkten werden als Abfolge kontextspezifischer kognitiver Zustände oder MM verstanden. Die Veränderungen von stabilen und metastabilen kognitiven Elementen in diesen MM werden als Lernprozesse interpretiert. Mit den Beschreibungen wird jedoch nichts über die wirkliche kognitive Struktur der Schülervorstellungen ausgesagt. Die MM sind hypothetische Konstrukte, die auf der Basis der analysierten Daten entwickelt und durch die Forscher interpretiert wurden.

#### 7.1.1 Mentale Modellentwicklung von Andi

##### *Vorwissen t1*

Für Andi ist eine Quelle eine Stelle, an der Wasser aus dem Boden (gemeint ist der Untergrund) oder einem Felsen sprudelt. Gezeichnet hat er ein Becken aus Stein, in das Wasser von unten zufließt (Abb. 1, t1). Die „Steinschicht“, in die das Becken eingetieft ist, liegt auf Erde (gemeint ist Boden), weil ein ganzer Berg nicht aus „Stein“ sein kann. Wenn dies nämlich so wäre, könnte man laut Andi nicht in die Tiefe bohren. Wasser, das im Boden von Flüssen und weiter durch Gänge in der Erde (gemeint ist die Erdkruste) versickert, wird von der „Hitze des Erdkern“ erwärmt und steigt als Wasserdampf wieder nach oben, so wie Wasserdampf im Kochtopf. Der nach oben drängende Wasserdampf schafft sich Röhren für seinen Aufstieg, in dem er immer wieder ein wenig „Gestein wegschiebt“. Abgekühlt und kondensiert fließt er als Wasser an der Erdoberfläche aus und formt mit seiner „Stärke“ oder Kraft, also der „Wasserkraft“, ein Becken. Das ist die Quelle. Mit „Stärke“ des Wassers meint Andi dessen „Schnelligkeit“. Der ganze Prozess der Quellenentstehung dauert seiner Meinung nach sehr lange. Das Becken kann sich an einem Berghang oder auf dem Talboden befinden und erinnert ihn an Auskolkungen, die er von Flüssen in der Südschweiz kennt. Das austretende Wasser ist größtenteils sauber, weil Bakterien vom Gestein aufgenommen werden, ganz „ähnlich wie es Boden macht, der auch Bakterien aus verschmutztem Wasser aufnimmt“.

##### *Intermediäres mentales Modell t2*

Dargestellt ist ein Berg, ähnlich dem im LT, der aus verschiedenen Schichten mit unterschiedlicher Struktur besteht. Der größte Teil des Berges besteht aus „verklebtem Sand“, der von einer „undurchdringlichen

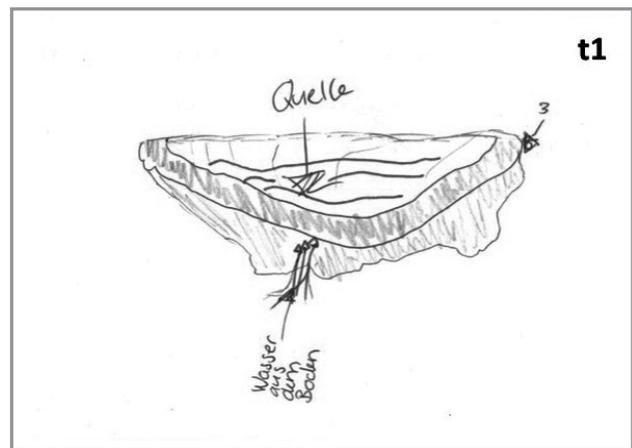
Schicht“ unterlagert wird. Regen fließt in die Poren des Sandes, aber pro Tag fließt nur sehr wenig Wasser durch den Berg, weil der Sand verklebt ist und sich das Wasser „hindurchkämpfen“ muss (Abb. 1, t2). Über der „wasserundurchdringlichen“ Schicht wird das Wasser „gelagert“ und kann nicht weiter nach unten fließen. Das Wasser wird in den Poren des Sandes gespeichert. Weil der Berg einen Abhang hat, quillt das Wasser dort heraus. Quellen können tagelang fließen, auch wenn es wenig regnet.

**Finales mentales Modell t3**

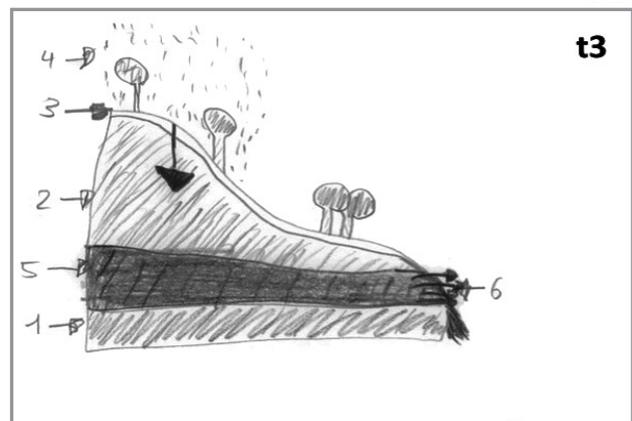
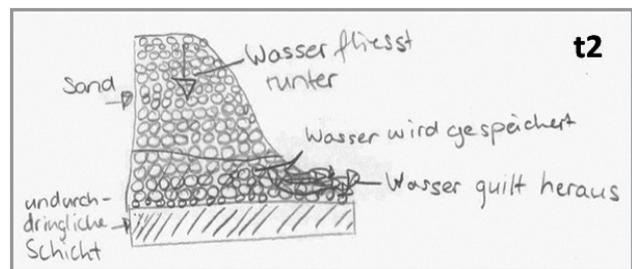
Eine Quelle entsteht meistens an einem Berghang. Quellwasser ist Regenwasser. Die Erdkruste im dargestellten Landschaftsausschnitt ist geschichtet. Der Regen sickert von oben nach unten durch die Poren im Sand/Sandstein und wird über einer undurchlässigen Schicht gestaut. Das Wasser liegt als Grundwasser vor und es bildet sich ein Grundwasserspiegel aus (Abb. 1, t3). Der „Boden“ [gemeint ist Gestein], welcher über der mit Grundwasser gesättigten Schicht liegt, ist schwer, drückt nach unten und presst so das Wasser aus und dann kommt es am Hang als Quelle wieder hervor. Wasser füllt die Poren des Sandsteins und es kann von Pore zu Pore fließen. In einem Kalkstein sind hingegen größere Löcher für den Durchfluss notwendig. Der Sandstein ist ein Wasserspeicher, der auch dann noch Quellen speist, wenn es lange nicht regnet. Grobe Verschmutzungen bleiben im Sand/Sandstein hängen, nur „flüssige“ [gelöste] Verschmutzungen gehen durch.

Die Konfrontation mit dem Porenquellen-Konzept in der LU hat Andi so erlebt, dass er regelrecht erschrocken ist, weil er nicht damit gerechnet hat, dass es so anders ist, als er es sich vorgestellt hat. Auf die Frage, ob er das in der LU vermittelte Wissen für verständlich und überzeugend hält sagt er: „Ja, beides. Ich glaube wirk-

lich, dass es so ist“. Das Quellenthema hat ihn interessiert und er hält Quellenwissen für nützlich in der Landwirtschaft, wo man Gülle ausbringt, bzw. in Arbeitsgebieten auf einem Amt oder in einer Behörde, in denen man etwas mit Wasser zu tun hat. Die Frage, wozu man denn wissen sollte, wie Quellen funktionieren, antwortet er: „Ich fand es



Legende:  
3= Die Stärke des Wassers hat das Becken geformt  
● Erde ● Stein ● Wasser



Legende:  
1= undurchdringliche Schicht 2= Sandschicht 3= Boden  
● = Wasser 4 = Regen 5 = Grundwasserspiegel 6 = Wasser quillt heraus

**Abb. 1:** Andis Quellenvorstellungen zu t1, t2, t3

spannend und schön, also ja, interessant zu sehen, wie es funktioniert und so lernt man es auch. Ich finde es ist einfach interessant, das zu wissen“.

### **Interpretation**

Das Vorwissen von Andi erinnert stark an die Verdampfungstheorie aus der Antike (vgl. REINFRIED ET AL., 2012, 1371). Er weiß, dass Wasser verschiedene Aggregatzustände einnehmen kann, stellt Analogien zu Geysiren und zu geomorphologischen Phänomenen wie Auskolkungen, aber auch zu Beobachtungen im Alltag mit kochendem Wasser, her. Für ihn hat bewegtes Wasser Stärke und Kraft und kann deshalb Gestein erodieren. Das Präkonzept *Gestein ist hart und deshalb dicht, weshalb große Hohlräume für den Wasserdurchfluss notwendig sind* erweist sich bei ihm als nicht sehr ausgeprägt, weil er annimmt, dass der Erdkörper mit zunehmender Tiefe weicher wird und sich Gestein deshalb vom Wasserdampf wegschieben lässt. Zu t2 äußert er fundamental andere Vorstellungen: Er reproduziert die Darstellung des Berges und dessen Aufbau gemäß dem LT sowie die Gesteinseigenschaften und den Weg des Wassers vom Regen bis zur Quelle. Auch erinnert er sich an die niedrigen Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers im durchlässigen klastischen Sedimentgestein, dem „verklebten Sand“, durch den sich das Wasser „durchkämpfen“ muss. Er kann sich die Arbeit des Wassers gegen den Widerstand der engen Windungen und Kanälchen zwischen den Poren, durch die es hindurch fließen muss, vorstellen. Zu t3 wird die selbst gezeichnete Skizze abstrahiert und systematisiert, in dem sie geordnet beschriftet wird. Schriftlich wird erwähnt, dass Quellwasser aus Sandstein oder Kalkstein austreten kann und dass es demzufolge zwei verschiedene Quelltypen gibt. Im Interview stellt er beim Vergleich seiner Zeichnung von t1 und t3 fest, dass alles an-

ders ist, als er gedacht hat: „Quellwasser kommt normalerweise nicht von unten, wo es erwärmt wurde, und eine Quelle ist auch kein Steinbecken in dem sich Wasser sammelt, sondern das Quellwasser fließt nach seinem Austritt eher in Form eines Bächleins weg“. Auf die Frage, ob Wasser durch hartes Gestein hindurchfließen kann, sagt er: „Es kommt auf das Gestein an. Wenn es Poren hat, kämpft sich das Wasser durch. Und wenn es Kalkstein ist, [der keine Poren, aber Löcher hat], geht es durch die Löcher“. Die im LT gegebene Information, dass das Porenwasser durch den hydrostatischen Druck des nachsickernden Oberflächenwassers aus der Quelle gedrückt wird, findet sich nicht in seinen Äußerungen. Hingegen äußert es zu t3 zum ersten Mal die Schwammanalogie. Das Wissen darum, dass Sandstein wasseraufnahmefähig ist, aktiviert bei ihm offensichtlich die Entsprechung des Schwamms. Da Schwämme sich ausdrücken lassen, wird dieser Prozess intuitiv im Sinne einer Problemlösung auf den Wassertritt der Porenquelle angewendet.

Andis Vorwissen hat keine ausgeprägte Stärke, denn er beantwortet alle Fragebogenitems im Nachtest korrekt. Sein Vorwissen ist auch nicht durch eine besondere Identifikation mit der Sache geprägt, denn er hat seine Quellenvorstellung mittels Analogien zu seinem Alltags- und schulischen Wissen (er kennt Flusskolke und Geysire) wahrscheinlich ad hoc in der Befragungssituation konstruiert. Im Lernprozess ist ihm bewusst geworden, dass seine Ausgangsvorstellung so nicht stimmen kann und er hat großes Interesse daran, zu verstehen, wie Quellen wirklich funktionieren. Er zeigt eine Haltung des Lernens, die darauf aus ist, Neues lernen und verstehen zu wollen. Die Quelleninformationen der LU sind für ihn verständlich und glaubhaft und machen für ihn persönlich, aber auch in einem weiter gefassten Kontext Sinn. Folglich kann er sein initiales mentales Modell fundamental

verändern. Das alte Konzept spielt in seiner Denkstruktur über Quellen keine Rolle mehr. Ein neues Prinzip wurde konstruiert, das am Schluss des Lernprozesses mit der alten Denkstruktur unvereinbar ist.

## 7.1.2 Mentale Modellentwicklung von Benni

### *Vorwissen t1*

Benni ist explizit davon überzeugt, dass Quellwasser immer aus Höhlen kommt: „Wo Quellwasser austritt, *muss* es Höhlen geben“. In seiner Zeichnung ist eine Höhle in einem strukturlosen Berg dargestellt. Regenwasser versickert in Spalten und Ritzen des Gesteins, und tropft von der Höhlendecke in einen Bach am Höhlenboden, der Schmelzwasser von einem Gletscher mitführt (Abb. 2, t1). Der Bach tritt am Berg hang als Stromquelle aus. Gemäß Benni, versickert das Wasser in der Höhle nicht weiter in die Tiefe, weil das Gestein des Höhlenbodens hart ist. Er sagt: „Je weiter man in die Tiefe geht, desto härter wird Gestein“. Das Quellloch entsteht dort, wo sich das Wasser einen Ausfluss gegraben hat. Er erklärt: „Das Wasser gräbt sich Löcher. Ich bin schon einmal in einer Höhle gewesen, wo das Wasser so [zeigt mit der Handfläche steil nach unten] runter fließt. Das ist sehr eindrücklich gewesen. Da kommt das Wasser mit riesen Tempo von oben nach unten; man hat richtig gesehen, wie sich das Wasser den Weg von oben nach unten gebohrt hat“. Er verfügt über eine sehr bildhafte Vorstellung dieser Höhle, die auch darin zum Ausdruck kommt, dass er Formen, die durch fluviatile Erosion in der Höhle entstanden sind, sehr genau beschreiben kann: „Es ist alles abgerundet und hat Kurven, hervorstehenden Ecken und Kanten sind alle abgerundet“. Dass Wasser Löcher „graben“, „bohren“ und sich in den Stein „fressen“ kann, kommt gemäß Benni von

dessen Bewegung und weil es an Felswände klatscht. Er kennt Ähnliches auch von den Gletschertöpfen im Gletschergarten Luzern und auch sein Vater hat schon davon erzählt. Seine Informationen über die Prozesse in Höhlen hat er von einem Besuch in einer Tropfsteinhöhle, wo ein Führer alles erklärt hat. Zur Wasserqualität sagt er, dass Gletscherwasser nicht sauber ist, „weil Menschen über Gletscher gehen“.

### *Intermediäres mentales Modell t2*

Bennis zweite Zeichnung enthält nur wenig neue Fakten, obwohl sie sich auf den ersten Blick deutlich von seiner ersten Zeichnung unterscheidet (Abb. 2, t2). Dargestellt ist eine stark vereinfachte und abstrahierte Repräsentation des Blockbildes aus dem LT, ohne Schichtaufbau und Gesteinsstrukturen. Wasser durchdringt den „Stein“ in Form von vertikalen Linien, sammelt sich an der Basis des Berges in Form von parallelen Linien an, und tritt am Fuß des Hangs aus. Benni erklärt: „Die Erde (gemeint ist der Untergrund) besteht aus vielen kleinen Kügelchen, zwischen denen Regenwasser hindurchfließen kann. Je weiter man nach unten kommt, desto härter wird der Stein. Im Berg versickertes Wasser wird zu Grundwasser und wird über härterem Stein gestaut. Es tritt aus, weil der Wasserdruck unten am Größten ist“.

### *Finales mentales Modell t3*

Bennis dritte Zeichnung ist fast identisch mit seiner ersten Zeichnung (Abb. 2, t3). Das Höhlengewölbe besteht jetzt allerdings aus Sandstein. Den Boden der Höhle bildet wie zu t1 der „Hartstein“. Die Höhle liegt zwischen Sandstein und Hartstein. Im Sandstein versickert Regenwasser und tropft in die Höhle. Durch die Höhle fließt ein Bach, genannt Gletscherwasser, in den auch das von der Höhlendecke einsickernde Regenwasser tropft. Benni erklärt, dass der Bach durch einen [natürlichen] Kanal,

der sich unter einem Gletscher befindet, in die Höhle kommt, was beides in der Zeichnung aber nicht dargestellt ist. Der Höhlenbach „schießt“ gemäß seiner Vorstellung durch eine Öffnung in der Felswand ins Freie. Auf die Frage, ob denn für die Entstehung einer Quelle eine solche Höhle, wie er sie gezeichnet hat, notwendig sei, sagt er:

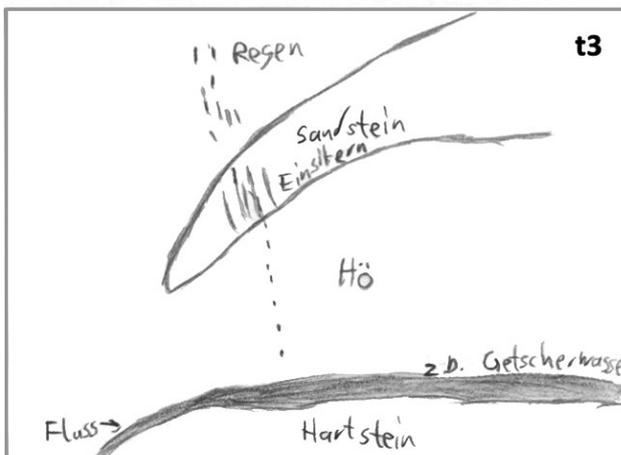
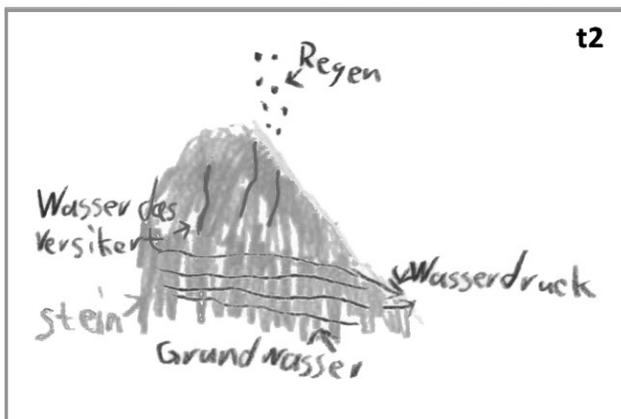
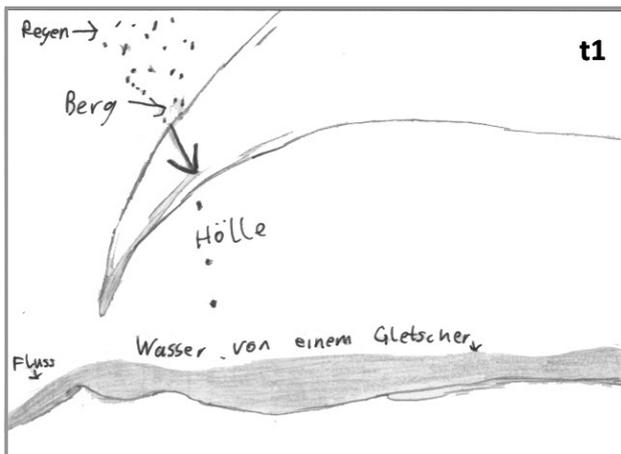


Abb. 2: Bennis Quellenvorstellungen zu t1, t2, t3

„Nein, eigentlich nicht, es muss einfach der richtige Stein da sein. Wenn es nur Hartstein ist, kann das Wasser gar nicht erst einsickern. Es braucht eigentlich keine Höhle, es braucht einfach den richtigen Stein, dass es weiter transportiert wird“. Die Qualität von Quellwasser, das durch Sandstein geflossen ist, beurteilt er als sauberer als die von Quellwasser, das durch Kalkstein geflossen ist, weil das Wasser im Sandstein „gesiebt“ wird. „Ein bisschen Dreck wird aber im Wasser drin bleiben“, meint er. Die LU ist für ihn verständlich und überzeugend und er fand die Arbeit interessant und spannend. Er war nicht überrascht davon, wie eine Quelle funktioniert, weil er ja schon davon gehört hat. Nur dass Sandstein wasser-durchlässig sein kann, war für ihn neu. Auf die Frage, wozu die Quelleninformationen nützlich sind, antwortet er: „Damit man weiß, wie's funktioniert“. Die Frage, wozu man dies wissen soll, beantwortet er mit: „Jetzt bin ich sicher einen Schritt weiter in diesem Thema im Vergleich zu meinen Kollegen, und auch nachher, im Job“.

### Interpretation

Es konnte rekonstruiert werden, dass Bennis Vorwissen von einem Besuch in den Beatus-Höhlen am Thuner See in der Schweiz stammt, die er im Rahmen einer geführten Besichtigung, möglicherweise mit seinen Eltern (er erwähnt mehrmals, was er alles von seinem Vater gelernt hat), besucht hat. Benni verfügt zu t1 über ein sehr detailliertes und anschauliches MM, das auf authentischer Wahrnehmungsinformation beruht. Zu t2 lassen seine Äußerungen erkennen, dass er einige Informationen aus dem LT reproduzieren kann. Es handelt sich um Oberflächenmerkmale, wie die Form des Berges oder die Richtung, in die der Hang einfällt. Ein grundlegend neuer Gedanke, den er aus dem LT aufgenommen hat, ist hingegen der, dass der Untergrund aus einem wasser-durchlässigen Gestein ohne

große Höhlen bestehen kann und dass der nach unten zunehmende Wasserdruck das Wasser aus der Quellenöffnung drückt.

Zu t3 externalisiert Benni ein MM, das fast identisch ist mit seiner Ausgangsvorstellung, die er in der Vorerhebung vier Wochen vor der Intervention produziert hat. Die Frage, was er durch die Lernumgebung gelernt habe, beantwortet er so: „Also, ich habe jetzt gelernt, dass es Sandstein gibt und darum habe ich wieder dasselbe Bild [wie zu t1] gezeichnet, einfach ein bisschen genauer. Es regnet, der Regen kann durch den Sandstein [der Höhlendecke] durchsickern und dann in die Höhle gehen. Unterhalb des Wassers [des Höhlenbaches] gibt es Hartstein, so dass das Wasser nicht weiter versickert“. Auf die Frage, worin sich seine erste Zeichnung (t1) von seiner dritten (t3) unterscheidet antwortet er: „Hier [t1] habe ich noch nicht gewusst dass es Sandstein und Kalkstein gibt, also, dass es sie gibt, habe ich schon gewusst, aber nicht dass Sandstein aus vielen kleinen Körnchen besteht. Und jetzt habe ich ein viel logischeres Bild im Kopf von einer Quelle, also davon, wie das in etwa aussehen könnte. In einer Tropfsteinhöhle tropft es immer von der Decke herunter. Da habe ich mich schon gefragt, wie das funktioniert, wie kommen da die Tropfen hin, dass sie runtertropfen. Jetzt weiß ich es“.

Das Vorwissen von Benni erweist sich als sehr stabil, was darin zum Ausdruck kommt, dass er sechs der elf Wissensfragen sowohl im Vor- wie im Nachtest falsch im Sinn des fehlerhaften Präkonzepts beantwortet. Er hat zwar im Verlauf seines Lernprozesses Informationen aus der Lernumgebung, wie die Versickerung von Niederschlag oder das Austreten von Quellwasser am Hang, aufnehmen können, diese stehen jedoch nicht in Widerspruch zu seiner Ausgangsvorstellung und lassen sich an das Vorwissen assimilieren. Er rekonstruiert nicht das Wissen, mit dem er in der

LU konfrontiert wurde, sondern reproduziert eine Gestaltwahrnehmung aus dem Gedächtnis, die von seinem Höhlenbesuch stammt. Schon während der Arbeit mit dem LT kann er die dargebotene Information nicht genau genug erfassen, denn sein kognitives System hat bereits eine plausible Lösung im Gedächtnis verankert, die aktiviert wird. Diese subjektiv bedeutungsvolle und plausible Vorstellung ist so stabil, dass der Schüler unter den gegebenen Bedingungen in ihr verharrt und keine kognitive Dissonanz zwischen seinem Quellenkonzept und dem in der LU vermittelten Porenquellenkonzept empfindet. Für ihn ist nicht denkbar, dass Wasser durch „Stein“ hindurch fließt, was in seiner zu t1 geäußerten, subjektiv folgerichtigen Aussage „Wo Quellwasser austritt, muss es Höhlen geben“ zum Ausdruck kommt. In der Aussage des „muss“ kommt die ‚Denknotwendigkeit‘, die seine Höhlen-Erinnerung überformt, deutlich zum Ausdruck. Obwohl er während der Lernphase neue Wissens-elemente assimiliert (t2), zeichnet er am Schluss (t3) wieder Höhlen, scheint aber – als eigentliches Lernergebnis – nicht mehr diesem ausschließlichen „muss“ unterworfen zu sein. Er zeichnet möglichst konform zu seiner konkreten, lebensweltlich verankerten Höhlen-Erinnerung, erlaubt dabei aber auch das Durchfließen durch „Stein“ – dort wo eben der „richtige“ Stein, der Sandstein, vorhanden ist. Das neue Wissen wird zwar als glaubwürdig und „wahr“ angesehen, aber es ist der bisherigen Quellenvorstellung an Stärke unterlegen. Angesichts der Gegenüberstellung von Kalkstein- und Sandsteinquellen in der LU bleibt er wegen seiner konkreten Höhlen-Erinnerung auf Seiten der Kalksteinvariante, unter Einbezug von Sandstein-Möglichkeiten – obwohl in der LU mit der Gegenüberstellung der beiden Quellentypen eigentlich umgekehrt die Sandsteinvariante schärfer in den Vordergrund gerückt werden sollte. Die Kern-

aussage des Lernmaterials ist die, dass für Wasserdurchfluss keine großen unterirdischen Hohlräume nötig sind.

## 7.2 Personenübergreifende Denkstrukturen

Die Rekonstruktion der MM ermöglicht auch die Identifizierung personenübergreifender Denkschemata. Das Vorwissen von Benni enthält ein robustes Denkmuster, das auf dem kognitiven Schema ‚je härter, desto dichter‘ beruht, und auch bei fast allen anderen Teilnehmenden der Lernprozessstudie gefunden wurde. Dieses Schema liegt dem Präkonzept *Hartes Gestein ist wasserundurchlässig. Damit Wasser hindurchfließt, sind große Hohlräume notwendig*, im Folgenden Hohlraum-Präkonzept genannt, zugrunde. Die Denkstruktur ‚härter/dichter‘ (je härter, desto dichter/undurchlässiger) weist im Fall der vorliegenden Quellenstudie Eigenschaften eines P-Prims auf (DISSA, 1993). Sie ist eine stabile Konstruktion aus einfachen Wissensselementen, welche auf abstrahierten Erfahrungen von bekannten Alltagsphänomenen, die subjektiv kohärent sind, beruht. Sie wird bei ähnlichen Sachlagen, wie z.B. der subjektiven Vorstellungen über Grundwasser- und Erdölvorkommen im Untergrund (REINFRIED, 2006; FRIDRICH, 2009a, 2009b), prioritär und als Gesamtheit aktiviert (DISSA, 1993, DISSA & SHERIN, 1998). Ein weiteres, sehr häufig aufgetretenes Präkonzept ist jenes, dass bewegtes Wasser Kraft hat, die ihm die Eigenschaft verleiht, Felswände zu durchbohren oder gegen die Schwerkraft aufzusteigen. Ihm liegt das kognitive Schema oder P-prim ‚Bewegung beinhaltet Kraft‘ (HAMMER, 1996, 103) zugrunde. Dieses P-prim ist aus der intuitiven Physik bestens bekannt (vgl. auch DISSA, 1993), ist aber noch nicht im Kontext von Quellen beschrieben worden.

## 8 Diskussion

### 8.1 Überlegungen aus der Kognitions- und Sozialpsychologie

Im Rahmen von Lernpfadanalyse wurde rekonstruiert, wie sich intuitives Vorwissen über Wasserquellen durch Unterricht verändert. In dieser Publikation wurde anhand zweier Fallstudien exemplarisch vorgestellt, wie die Entwicklung der MM der Vpn bei deren Lernarbeit mit einer lernpsychologisch optimierten LU verläuft. Dabei zeigte sich, dass die Entwicklung sehr unterschiedlich in Abhängigkeit vom Vorwissen verläuft:

1. Das initiale MM von Andi wurde im Laufe des Lernprozesses vollständig verworfen. Sein finales MM beinhaltet sehr differenzierte Kenntnisse des Porenquellenkonzepts. Er kennt aber auch den Anwendungsbereich der Hohlraumvorstellung auf Karstquellen. Es ist ihm bewusst geworden, dass die Permeabilität von Sedimentgesteinen eine Frage des Vorhandenseins und der Größe von Hohlräumen ist.
2. Das initiale MM von Benni ist das Karstquellenmodell. Es wird im finalen MM fast identisch reproduziert, ergänzt durch die Gesteinseigenschaften von Sandstein, die er in der LU kennengelernt hat. Er verharrt in seiner hybridisierten Hohlraumvorstellung.

Wie sind diese unterschiedlichen Lernergebnisse trotz der Lernarbeit mit den gleichen Inhalten und Methoden zu erklären? Die Datenanalyse ergab Hinweise darauf, dass die Wissenskonstruktion und -rekonstruktion nicht nur vom fachlichen Vorwissen, sondern auch von kognitiven und motivationalen Faktoren abhängig ist. Kognitive Faktoren sind (1) die Stärke des Vorwissens, womit der Grad seiner Elaboration

(gut entwickelt und detailliert vs. spärlich und fragmentiert) und seiner Verankerung in der kognitiven Struktur gemeint sind, sowie (2) die Kohärenz des Vorwissens und das Commitment mit dem Vorwissen (DOLE & SINATRA, 1998). Kohärenz wird als Widerspruchsfreiheit des konzeptuellen Wissens beschrieben, Commitment als Ausmaß der persönlichen Verbundenheit und Identifikation mit dem Wissen. Auch verschiedene motivationale Faktoren, wie das Interesse (ALEXANDER, KULIKOWICH & SCHULZE, 1994), individuelle Leistungsziele (SINATRA & MASON, 2103) oder das Bedürfnis, verstehen zu wollen (MARCHAND, 2012), spielen eine Rolle. Gemäß DOLE & SINATRA (1998, 121) interagieren folgenden Bereiche beim Conceptual Change in dynamischer Art und Weise: (1) die Eigenschaften des Vorwissen (Stärke, Kohärenz, Commitment), (2) die Eigenschaften der neuen Information (Verständlichkeit, Kohärenz, Plausibilität, Überzeugungskraft) und (3) die Motivation der Lernenden, die neuen Informationen verarbeiten zu wollen (Empfinden eines kognitiven Konflikts, persönliche Relevanz, sozialer Kontext, Bedürfnis nach Verstehen, individuelle Lernziele). Aus der Interaktion dieser Faktoren resultiert ein Kontinuum der Informationsverarbeitung von geringer bis hoher kognitiver Lernaktivität, von der es abhängt, ob ein starker, schwacher oder kein Conceptual Change erfolgt. Bei hohem kognitiven Engagement, setzen sich Individuen aufmerksam, beharrlich und in analytischer, reflexiver und kritischer Art und Weise mit Informationen auseinander und verarbeiten sie tief, was zu einem starken und permanenten Conceptual Change, d.h. zur Akkommodation des Vorwissens an die neuen Informationen, führt. Bei geringem Engagement erfolgt die Informationsverarbeitung oberflächlich und unter Verwendung von einfachen Heuristiken, was zu einem schwachen oder nicht sehr

beständigen Conceptual Change führt. Neue Informationen werden in diesem Fall assimiliert, führen aber nicht zu einer maßgeblichen Änderung des Vorwissens. Zwischen diesen beiden Endpunkten des Kontinuums gibt es mittlere Ausprägungen, die zu unterschiedlichen Graden der Wissensveränderungen führen (DOLE & SINATRA, 1998, 121), was auch in der hier vorgestellten Studie nachgewiesen werden konnte. SINATRA und MASON (2013, 379) sehen einen Zusammenhang zwischen dem kognitiven Engagement eines Lerners und den Gründen, weshalb und wie er sich mit einer Lernaufgabe auseinandersetzt. Das Konstrukt der persönlichen Leistungsziele definiert das motivationale Ziel, das ein Lerner mit einer Leistung anstrebt. Es wird in Performanzziele und Beherrschungsziele (= Mastery-orientierte Ziele) unterteilt (DWECK, 1986). Bei einer Performanz-orientierten Lernhaltung geht es darum, möglichst gut im Vergleich zu einer bestimmten Personengruppe abzuschneiden. Bei einer Mastery-orientierten Lernhaltung steht das Ziel, neue Fähigkeiten zu erlernen und bereits vorhandene zu verbessern, im Zentrum. Beherrschungsziele werden mit hohem kognitiven Engagement, tiefer Verarbeitung und erfolgreicherem Lernen assoziiert. Dementsprechend erkennen Lernende Diskrepanzen zwischen ihrem Vorwissen und neuen Informationen. Performanzziele werden mit geringem kognitivem Engagement, oberflächlichen Lernstrategien und schlechteren Lernergebnissen, die mit einer weniger tiefen Verarbeitung einhergehen, in Verbindung gebracht (PINTRICH, 2000; PINTRICH & SCHAUBEN, 1992). Von Lernenden mit Performanzzielen wird folglich angenommen, dass sie seltener einen kognitiven Konflikt erleben, weil sie gut dastehen wollen und ungern zugeben (auch gegenüber sich selbst), dass ihr Vorwissen fehlerhaft war. Die Analyse des Datenmaterials aus den

Lernpfadanalysen dieser Studie ergab eine Reihe von Hinweisen, welche mit den oben ausgeführten Überlegungen aus der Kognitions- und Sozialpsychologie erklärt werden können und im Folgenden im Sinn von Hypothesen diskutiert werden.

### ***Commitment und individuelle Leistungsziele***

Die Analysen der Lernwege zeigen, dass das Hohlraum-Präkonzept je nach Herkunft und dem damit verbundenen Commitment sehr stabil sein kann. Mit Informationen aus Schulbüchern oder dem Fernsehen fühlen sich Lernende offensichtlich weniger verbunden, als mit Informationen, die in sozialen Kontexten in eindrucksvollen, erlebnisreichen und aufregenden Situationen, erworben werden. Aus der Gedächtnispsychologie ist bekannt, dass bei der Verarbeitung von Informationen der Kern der Sache, auffällige Details und Emotionen gespeichert werden. Die Erinnerung daran ist eine Rekonstruktion der behaltene Teile zu einem sinnvollen Ganzen. Die Rekonstruktion wird besonders durch die emotionalen Aspekte der Einstellung zum Gedächtnisinhalt gesteuert, was meist unbemerkt geschieht (BARTLETT, 1932; EDELMANN, 2000, 166). Bennis Lernweg belegt dies deutlich, während Andi weniger große Hürden hat, das mit der LU vermittelte Porenquellenkonzept zu lernen. Die subjektiven Erklärungen von Andi dienen in der Situation vor allem der mehr oder weniger erfolgreichen Problemlösung, ohne dass, wie bei Benni, ein mit einer abstrahierten Wahrnehmung verknüpftes, eindrucksvolles Erlebnis im Gedächtnis aktiviert wird. Andi hat geowissenschaftliches Vorwissen und kein sehr konkret ausgeprägtes Hohlraum-Präkonzept. Er kommt im Lernprozess sehr weit und versteht auch das Konzept höherer Ordnung, welches der Entstehung einer Porenquelle an einem Berghang zugrunde liegt und darin

besteht, dass eine Quelle die Schnittstelle zwischen dem Hang und permeablen und impermeablen Gesteinen kennzeichnet, was auch das Phänomen von Quellhorizonten im Gelände erklärt. Andi gelangte offenbar zu schlussfolgernden und gehaltserweiternden Überlegungen, die über seine unmittelbaren Erfahrungen hinausgehen, was sich gut mit dem Konstrukt des erhöhten kognitiven Engagements im Sinne von DOLE & SINATRA (1998) in Einklang bringen lässt.

Bennis Höhlen-Erinnerung ist an eine Vielzahl sinnlicher Erfahrungen und Emotionen geknüpft, weil sie unmittelbar und in einem sozialen Kontext erlebt und durch Autoritäten vermittelt wurden. Sie ist gut im Gedächtnis verankert, sodass die gedankliche Problemlösung um das initiale MM herum erfolgt. Eigene Schlussfolgerungen, die mit seinem Vorwissen übereinstimmen, werden akzeptiert, auch wenn sie nicht mit den Informationen im Lernmaterial in Einklang stehen, im Gegensatz zu solchen, die zwar logisch und widerspruchsfrei sind, aber mit dem Vorwissen nicht übereinstimmen. Diese kognitive Verzerrung (kognitiver Bias) kommt in der Konstruktion seines Hybridmodells zum Ausdruck, in welches der Sandstein eingebaut wird, wodurch die tropfende Höhlendecke erklärt werden kann und sich der subjektive Erklärungswert seines MM erhöht. Sein initiales MM verändert sich im Laufe des Lernprozesses jedoch kaum und er weist aus schulischer Perspektive kaum sichtbare Lernfortschritte auf.

Die Schülerantworten auf die Frage, wozu man wissen soll, wie Quellen funktionieren, wurden als Informationen über die individuellen Leistungsziele der Vpn interpretiert. Andi findet es einfach interessant, schön und spannend zu wissen, wie eine Quelle funktioniert und weiß, dass das die Voraussetzung dafür ist, das Konzept zu lernen. Diese Haltung kann als intrinsisch

motivierte, Mastery-orientierte Haltung des Lernens interpretiert werden, die mit einer hohen Verarbeitungstiefe assoziiert wird. Benni beantwortet die Frage, wozu man wissen sollte, wie Quellen funktionieren, mit: „Jetzt bin ich sicher einen Schritt weiter in diesem Thema im Vergleich zu meinen Kollegen, und auch nachher, im Job“. Aus dieser Antwort kann geschlossen werden, dass seine Lernmotivation durch extrinsisch motivierte Performanzziele geprägt ist, was zusammen mit der Stabilität seiner Höhlen-Erinnerung und seiner großen Identifikation mit seinem Vorwissen möglicherweise zu einer geringeren Verarbeitungstiefe des dargebotenen Stoffs geführt hat.

### ***Kognitiver Konflikt***

Bei Inkonsistenzen zwischen Vorwissen und normativem Wissen führt selbst Lernmaterial, das als verständlich, plausibel, überzeugend und fruchtbar charakterisiert wird, nicht zwingend zu einem kognitiven Konflikt, wenn die Präkonzepte, auf denen das Vorwissen beruht, eine große Stärke haben, und das Commitment mit diesem Vorwissen groß ist. Ob ein kognitiver Konflikt erlebt wird oder nicht, hat Einfluss auf die Wissenskonstruktion, denn er ist Ausdruck davon, dass ein Individuum Anomalien zwischen seinem bestehenden Wissen und den neuen Informationen erkennt. Da die Veränderung von tief verankerten Denkstrukturen erhebliche kognitive Anstrengungen verlangt, lassen sich Individuen auf solche Anstrengungen nicht ein, solange sie ihre bestehende Konzeption im Hinblick auf eine Problemlösung nicht als unbefriedigend empfinden (POSNER ET AL., 1982). Wenn kein kognitiver Konflikt empfunden wird, ist auch nicht unbedingt eine erhöhte kognitive Aktivität und damit einhergehend eine tiefe Verarbeitung von neuem Wissen gefordert. Der Fall von Benni demonstriert diese Zusammenhänge in

eindrücklicher Weise. Sein Commitment gegenüber seinem Vorwissen und dessen Stärke beeinflussen seinen Lernprozess so, dass er keinen grundlegenden Unterschied zwischen seinem Quellenkonzept und dem Porenquellenkonzept wahrnimmt und keinen kognitiven Konflikt erlebt. Andi empfindet hingegen einen richtigen Schreck, als er mit dem Lernmaterial konfrontiert wird, und will wissen, wie es richtig ist.

## **8.2 Rahmentheorie oder Fragmentierungsansatz?**

Die vorliegenden Lernpfadanalysen werfen die Frage nach dem Stellenwert der Conceptual-Change-Ansätze im Lernprozess mit der Quellen-LU auf. Aus der Sicht des Rahmentheorie-Ansatzes müssten die Vpn durch ihre Arbeit mit der LU ihre Rahmentheorien entschieden modifizieren, damit sich ihre spezifischen, darauf aufbauenden Common-Sense-Theorien ändern und ein Conceptual Change stattfindet. Doch warum sollte die ontologische Überzeugung, dass „Stein“ als Entität dicht ist, geändert werden, wenn sie in anderen Kontexten, z.B. der Karstmorphologie, nachweislich Sinn macht? Die Ergebnisse dieser Studie weisen nach Auffassung der Autorin eher darauf hin, dass sich im Lernprozess mit der LU in Anlehnung an den ‚Knowledge-in-pieces-Ansatz‘ DISESAS (1993) die einfachen konzeptuellen Elemente der Schemata oder P-prims nicht in ihrer Semantik ändern, sondern nur wie und wann sie aktiviert werden. Conceptual Change besteht demnach darin, Wissen auszubauen und zu differenzieren, die für ein Konzept relevanten Elemente zu erkennen, kontext-spezifisch anzuwenden und den Anwendungsbereich des Wissens auf verschiedenen Maßstabsebenen, im Fall der Quellen von der makroskopischen zur mikroskopischen Ebene, zu erweitern.

Das heißt konkret: Die Tatsache, dass hartes Gestein wasserdurchlässig sein kann, widerspricht der elementaren Erfahrung fundamental. Es ist diese Tatsache, die in Erstaunen versetzt. Das Gestein als solches mit seinen Eigenschaften muss folglich als Objekt ‚out of context‘ verstanden werden – darin liegt der fundamentale Conceptual Change. Erst wenn klar ist, dass das Schema *je härter, desto dichter* nicht generell auf Gesteine angewendet werden kann, sondern dass es harte, solide und trotzdem wasserdurchlässige Gesteine ohne große Hohlräume gibt, deren Wasserdurchlässigkeit mit winzigen, miteinander verbundenen Gesteinsporen zu erklären ist, kann ein adäquates Porenquellenmodell konstruiert werden.

## 9 Implikationen

Die Ergebnisse machen deutlich, dass Lernen kognitives Konstruieren ist. Gute, empirisch validierte LU führen zwar zu hohen Wissenszuwächsen und längeren Behaltensleistungen (REINFRIED, ROTTERMANN, AESCHBACHER & HUBER, 2010; REINFRIED ET AL., 2013), lösen aber nicht zwingend bei jedem Lernenden die intendierten Lernprozesse aus. Selbst wenn man personenübergreifende Denkstrukturen, die beim Erlernen eines Konzepts eine Rolle spielen, kennt und bei der Konzeption von Unterricht mitberücksichtigt, wie dies bei der Konzeption der hier verwendeten LU geschehen ist, konstruieren die Lernenden aus der dargebotenen Information aus lernpsychologischen Gründen, die ihnen nicht bewusst sind, ihre eigenen, vom instruktionalen Modell abweichenden MM der Sache.

Die hier vorgestellten, stark variierenden Lernpfade beziehen sich auf das Beispiel Quellen, das aber auch exemplarisch für andere Lerngegenstände steht, bei

denen zwar inhaltlich andere Lernpfade zu erwarten sind, jedoch grundsätzlich auch mit stark variierenden Lernpfaden zu rechnen ist. Daraus darf allerdings nicht die Schlussfolgerung gezogen werden, dass im Klassenunterricht die vielen Individualvorstellungen aller Schülerinnen und Schüler detailliert zu analysieren sind und flexibel und punktgenau darauf zu reagieren ist. Es geht vielmehr darum, dass Lehrkräfte besser verstehen, was Wissenskonstruktion konkret bedeutet und ein verändertes Lernverständnis entwickeln.

In der in dieser Studie vorliegenden Versuchsanordnung erhielten die Lernenden keine Lernprozess-begleitende Unterstützung durch die Lehrperson, weil es darum ging, die individuelle Wissenskonstruktion der Lernenden mit dem Lernmaterial zu verfolgen. Sie wurden z.B. nicht darauf aufmerksam gemacht, wenn sie wichtige Informationen übersahen, oder auf kognitive Konstrukte, die im Widerspruch zum zu lernenden Konzept standen, zurückgriffen. Vorwissen verändert man, indem man es sich bewusst macht, schrittweise um neue, wissenschaftsnahe Perspektiven erweitert, und zu unterscheiden lernt, welche Perspektive in welchen Kontexten angemessener ist. Dabei stellen intermediäre MM wichtige Weiterentwicklungen auf dem Weg zur wissenschaftsnahen Vorstellung dar. Die Wissenskonstruktionsprozesse können unterstützt werden, in dem der Unterricht so strukturiert wird, dass immer wieder Phasen eingeplant werden, in denen in eigenen Worten, Zeichnungen oder Handlungen zum Ausdruck gebracht und diskutiert wird, wie der Stoff bis jetzt verstanden wurde. Dadurch kann jeder Schüler und jede Schülerin überprüfen, ob ihr aktiviertes Wissen zu den im Lernstoff dargebotenen Informationen passt. Dazu eignen sich formative Evaluationen, wie z.B. das von HATTIE (2015, 206ff) skizzierte lernrelevante Feedback.

## Dank

Ich danke Dr. Sebastian Tempelmann und Valentin Rast für ihre Hilfe bei der Erhebung und Analyse der Daten. Dr. Urs Aeschbacher

danke ich für die anregenden Hinweise bei der Dateninterpretation. Diese Forschung wurde vom Schweizerischen Nationalfonds unterstützt (Projekt No. 13DPD3\_13424).

## Literatur

- AESCHBACHER, U. (1992). Meinungen, Wissen und Verstehen von Lehrerstudентinnen und Lehrerstudenten in Sachen „Treibhaus-Effekt“. *Bildungsforschung und Bildungspraxis*, 14(2), 149-161.
- AINSWORTH, S., PRAIN, V. & TYTLER, R. (2011). Drawing to Learn in Science. *Science*, 333, 1096-1097.
- AL-DIBAN, S. (2002). *Diagnose mentaler Modelle*. Hamburg: Dr. Kovac.
- ALEXANDER, P.A., KULIKOWICH, J.M. & SCHULZE, S.K. (1994). How Subject Matter Knowledge Affects Recall and Interest. *American Educational Research Journal*, 31, 313-337.
- BAR, V. (1989). Children's Views about the Water Cycle. *Science Education*, 73(4), 481-500.
- BARTLETT, F.C. (1932). *Remembering. A Study in Experimental and Social Psychology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- BEN-ZVI-ASSARF, O. & ORION, N. (2005). A Study of Junior High Students' Perceptions of the Water Cycle. *Journal of Geoscience Education*, 53(4), 366-373.
- BÖDECKER, K. (2006). Die Entwicklung intuitiven physikalischen Denkens im Kulturvergleich. Münster: Waxmann.
- BRANSFORD, J.D., BROWN, A.L. & COCKING, R.R. (2000). *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*. Washington, DC: National Research Council.
- CHANG, J.-Y. (1999). Teachers College Students' Conceptions about Evaporation, Condensation, and Boiling. *Science Education*, 83(5), 511-526.
- CHI, M. T.H. & ROSCOE, R.D. (2002). The Processes and Challenges of Conceptual Change. In M. LIMÓN & L. MASON (Eds.), *Reconsidering Conceptual Change: Issues in Theory and Practice* (pp. 3-27). Dordrecht: Kluwer.
- CHINN, C.A. & Brewer, W.F. (1998). An Empirical Test of the Taxonomy of Responses to Anomalous Data in Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 35, 623-654.
- CHIU, M.-H., CHOU, C.-C. & LIU, C.J. (2002). Dynamic Processes of Conceptual Change: Analysis of Constructing Mental Models of Chemical Equilibrium. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(8), 688-712.
- CLEMENT J.J. (2013). Roles of Explanatory Models and Analogies in Conceptual Change. In S. VOSNIADOU (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*, 2<sup>nd</sup> Edition (pp. 412-446). New York, NY: Routledge.
- COLL, R., FRANCE, B. & TAYLOR, I. (2005). The Role of Models/Analogies in Science Education: Implications from Research. *International Journal of Science Education*, 27(2), 183-198.
- DICKERSON, D. & DAWKINS, K. (2004). Eighth Grade Students' Understandings of Groundwater. *Journal of Geoscience Education*, 52(2), 178-181.
- DICKERSON, D., CALLAHAN, T. J., VAN SICKLE, M. & HAY, G. (2005). Students' Conceptions of Scale Regarding Groundwater. *Journal of Geoscience Education*, 53(4), 374-380.
- DISSA, A.A. (1993). Toward an Epistemo-

- logy of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2 and 3), 165-255.
- DISSA, A.A. (2002). Why „Conceptual Ecology“ is a Good Idea. In M. LIMÓN & L. MASON (Eds.), *Reconsidering Conceptual Change* (pp. 29-60). Dordrecht: Kluwer.
- DISSA, A.A. (2008). A Bird's-Eye View of the "Pieces" vs. "Coherence" Controversy (from the "Pieces" Side of the Fence). In S. VOSNIADOU (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 35-60). New York, NY: Routledge.
- DISSA, A.A. & SHERIN, B.L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1191.
- DISSA, A.A., GILLESPIE, N. & ESTERLY, J. (2004). Coherence vs. Fragmentation in the Development of the Concept of Force. *Cognitive Science*, 28, 843-900.
- DOLE, J. A. & SINATRA, G.M. (1998). Reconceptualizing Change in the Cognitive Construction of Knowledge. *Educational Psychologist*, 33, 109-128.
- DOVE, J.E. (1998). Alternative Conceptions about the Weather. *School Science Review*, 79(289), 65-69.
- DOVE, J.E., EVERETT, L. A. & PREECE, P.F. (1999). Exploring a Hydrological Concept through Children's Drawings. *International Journal of Science Education*, 21(6), 485-498.
- DWECK, C.S. (1986). Motivational Processes Affecting Learning. *American Psychologist*, 41, 1040-1048.
- EDELMANN, W. (2000). *Lernpsychologie*. 6. Auflage. Weinheim: Beltz.
- FELZMANN, D. (2013). Didaktische Rekonstruktion des Themas „Gletscher und Eiszeiten“ für den Geographieunterricht. *Dissertation. Beiträge zur didaktischen Rekonstruktion*, 41. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- FLICK, U. (2009). *An Introduction to Qualitative Research*. Los Angeles, CA: Sage.
- FLICK, U., VON KARDORFF, E. & STEINKE, I. (Eds.). (2004). *A Companion to Qualitative Research*. (B. Jenner, Trans.). London: Sage.
- FRIDRICH, C. (2009a). Zur Nachhaltigkeit der Umstrukturierung von Alltagsvorstellungen - oder: Bilder von „Erdölseen“ bei Erwachsenen. *GW-Unterricht* 115, 19-25.
- FRIDRICH, C. (2009b). Alltagsvorstellungen von Schüler thematisiert und umstrukturiert - gezeigt am Beispiel natürlicher Erdölvorkommen. *GW-Unterricht* 114, 17-24.
- HAMMER, D. (1996). Misconceptions or P-Prims: How May Alternative Perspectives of Cognitive Structure Influence Instructional Perceptions and Intentions? *The Journal of the Learning Science*, 5(2), 97-127.
- HATTIE, J. (2013). *Lernen sichtbar machen. Hohengehren: Schneider*.
- HEWSON, P.W. (1981). A Conceptual Change Approach to Learning Science. *European Journal of Science Education*, 3(4), 383-396.
- HOLLAND, J.H., HOLYOAK, K.J., NISBETT, R.E. & THAGARD, P.R. (1986). *Induction: Processes of Inference, Learning, and Discovery*. Cambridge, MA: MIT Press.
- JACOBS, J.K., KAWANAKA, T. & STIGLER, J. W. (1999). Integrating Qualitative and Quantitative Approaches to the Analysis of Video Data on Classroom Teaching. *International Journal of Educational Research*, 31(8), 717-724.
- KRIPPENDORF, K. (2004). *Content Analysis: An Introduction to its Methodology*. Thousand Oak, CA: Sage.
- LINN, M.C., EYLON, B.-S. & DAVIS, E.A. (2004). The Knowledge Integration Perspective on Learning. In M.C. LINN, E.A. DAVIS & P. BELL (Eds.), *Internet Environments for Science Education* (pp. 29-46). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

- MARCHAND, H. (2012). Contributions of Piagetian and Post-Piagetian Theories to Education. *Educational Research Review* 7, 165-176.
- MAYER, R.E. (2009). Constructivism as a Theory of Learning Versus Constructivism as a Prescription for Instruction. In S. TOBIAS & T. M. DUFFY (Eds.), *Constructivist Instruction. Success or Failure?* (pp. 184-200). New York NY, London: Routledge.
- MAYRING, P. (2002). Qualitative Content Analysis. Research Instrument or Mode of Interpretation? In M. KIEGELMANN (Ed.), *The Role of the Researcher in Qualitative Psychology* (pp. 139-148). Tübingen: Huber.
- MAYRING, P. (2004). Qualitative Content Analysis. In U. FLICK, E. VON KARDORFF & I. STEINKE (Eds.), *A Companion to Qualitative Research*. London: Sage.
- MAYRING, P. (2007). On Generalization in Qualitatively Oriented Research. *Forum: Qualitative Sozialforschung/ Forum: Qualitative Social Research*, 8(3), Art. 26. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0114-fqs0703262>, aufgerufen am 20.1.2015.
- MCCLOSKEY, M., WASHBURN, A. & FELCH, L. (1983). Intuitive Physics: The Straight-Down Belief and its Origin. *Journal of Experimental Psychology*, 9(4), 636-649.
- MONTADA, L. (2003). Die geistige Entwicklung aus der Sicht Jean Piagets. In R. OERTER & L. MONTADA (Hg.), *Entwicklungspsychologie* (pp. 418-442). Weinheim: Beltz.
- NERSESSIAN, N.J. (2013). Mental Modeling in Conceptual Change. In S. VOSNIADOU (Ed.), (2013), *International Handbook of Research on Conceptual Change*, 2<sup>nd</sup> Edition (pp. 395-411). New York, NY: Routledge.
- OSER, F.K. & BAERISWYL, F.J. (2001). Choreographies of Teaching: Bridging Instruction to Learning. In V. RICHARDSON (Ed.), *Handbook of Research on Teaching*. 4<sup>th</sup> Edition. Washington, DC: American Educational Research Association.
- ÖSTERLIND, K. & HALLDÉN, O. (2007). Linking Theory to Practice: A Case Study of Pupils' Course Work on Freshwater Pollution. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 16(1), 73-89.
- PATTON, M.Q. (2002). *Qualitative Research & Evaluation Methods*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- PIAGET, J. (1975). *L'Équilibration des structures cognitives*. Paris: Presses Universitaires de France. Engl. 1985: *The Equilibration of Cognitive Structures: The Central Problem of Intellectual Development*. Chicago: University Press.
- PINTRICH, P.R. (2000). The Role of Goal Orientation in Self-Regulation Learning. In M. BOEKAERTS, P.R. PINTRICH & M. ZEIDNER (Eds.), *Handbook of Self-Regulation: Theory, Research and Application* (pp. 451-502). San Diego, CA: Academic Press.
- PINTRICH, R.E., MARX, R.W. & BOYLE, T.C. (1993). Beyond Cold Conceptual Change: The Role of Motivational Beliefs and Classroom Contextual Factors in the Process of Conceptual Change. *Review of Educational Research*, 63, 167-199.
- PINTRICH, P.R. & SCHAUBEN, B. (1992). Students' Motivational Beliefs and Their Cognitive Engagement in Classroom Academic Tasks. In D. SCHUNK & J. MEESE (Eds.), *Student Perceptions in the Classroom* (pp. 149-183). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- POSNER, G.J., STRIKE, K.A., HEWSON, P.W. & GERTZOG, W.A. (1982). Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. *Science Education*, 66(2), 211-227.

- PRESS, F., & SIEVER, R. (1995). *Allgemeine Geologie. Eine Einführung*. Heidelberg: Spektrum.
- REINFRIED, S. (2006). Conceptual Change in Physical Geography and Environmental Sciences through Mental Model Building – The Example of Groundwater. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 15(1), 41-61.
- REINFRIED, S. (2013). Conceptual Change. In BÖHN, D. & OBERMAIER, G. (Hg.), *Wörterbuch der Geographiedidaktik. Begriffe von A-Z*. S. 40-42, Westermann, Braunschweig.
- REINFRIED, S. (2015). Quellwasser und Trinkwasserqualität. Wie die Entstehung von Quellen, ihr Schüttungsverhalten und die Quellwasserqualität zusammenhängen. *geographie heute*, 322, 16-20.
- REINFRIED, S. & AESCHBACHER, U. (2013). Wo das Quellwasser herkommt: „Tiefenstrukturen“ im Berginneren. Beiträge zur Lehrerbildung. *Fachdidaktik - Überlegungen und Standpunkte*. H. 1, 2013, 93-99. <http://www.bzl-online.ch/archiv/autor/549>, aufgerufen am 20.1.2015.
- REINFRIED, S., AESCHBACHER, U., KIENZLER, P.M. & TEMPELMANN, S. (2013). Mit einer didaktisch rekonstruierten Lernumgebung Lernerfolge erzielen – das Beispiel Wasserquellen und Gebirgshydrologie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 19, 261-288. <http://www.ipn.uni-kiel.de/zfdn/>, aufgerufen am 20.1.2015.
- REINFRIED, S., TEMPELMANN, S. & AESCHBACHER, U. (2012). Addressing Secondary School Students' Everyday Ideas about Freshwater Springs in Order to Develop an Instructional Tool to Promote Conceptual Reconstruction. *Hydrology and Earth System Science*, 16(5), 1365-1377. <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/1365/2012/hess-16-1365-2012.html>, aufgerufen am 20.1.2015.
- REINFRIED, S., ROTTERMANN, B., AESCHBACHER, U. & HUBER, E. (2010). Alltagsvorstellungen über den Treibhauseffekt und die globale Erwärmung verändern – eine Voraussetzung für Bildung für nachhaltige Entwicklung. *Schweizerische Zeitschrift für Bildungswissenschaften*, 32(2), 251-271. [http://rsse.elearninglab.org/?page\\_id=2490](http://rsse.elearninglab.org/?page_id=2490), aufgerufen am 1. Mai 2015.
- ROTH, G. (2011). *Bildung braucht Persönlichkeit. Wie Lernen gelingt*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- RUSANEN, A.-M. & LAPPI, O. (2013). What, When and How do the Models of Conceptual Change Explain? In M. KNAUFF, M. PAUEN, N. SEBANZ, & I. WACHSMUTH (Eds.), *Cooperative Minds: Social Interaction and Group Dynamics*. Proceedings of the 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society in Berlin, Germany (pp. 3331-3336). Austin, TX: Cognitive Science Society. <http://mindmodeling.org/cogsci2013/papers/0593/index.html>, aufgerufen am 20.1.2015.
- SHECKER, H. & NIEDERER, H. (1996). Contrastive Teaching: A Strategy to Promote Qualitative Conceptual Understanding of Science. In D. F. TREGUST, R. DUIT & B. J. FRASER (Eds.), *Improving Teaching and Learning in Science and Mathematics* (pp.141-151). New York, NY: Teachers College Press.
- SEEL, N.M. (2003). *Psychologie des Lernens*. München, Basel: E. Reinhard Verlag.
- SCHWEIZERISCHER VEREIN DER GAS- UND WASSERVERSORGER (SVGW) (2010). *Qualität des Schweizer Trinkwassers*. <http://www.wasserqualitaet.ch>, aufgerufen am 20.1.2015.
- SHAVELSON, R.J. (2009). Reflections on Learning Progressions. Paper presented at the Learning Progressions in Science

- (LeaPS) Conference, June 2009, Iowa City, IA.
- SHEPARDSON, D.P. WEE, B., PRIDDY, M., SCHELLENBERG, L. & HARBOR, J. (2009). Water Transformation and Storage in the Mountains and at the Coast: Midwest Students' Disconnected Conceptions of the Hydrologic Cycle. *International Journal of Science Education*, 31, 1147-1471.
- SINATRA, G.M. & MASON, L. (2013). Beyond Knowledge: Learner Characteristics Influencing Conceptual Change. In S. VOSNIADOU (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*, 2<sup>nd</sup> Edition (pp. 377-394). New York, NY: Routledge.
- STEFFE, L.P. (1983). The Teaching Experiment Methodology in a Constructivist Research Program. In M. ZWENG, T. GREEN, J. KILPATRICK, H. POLLAK & M. SUYDAM (Eds.), *Proceedings of the fourth International Congress on Mathematical Education* (pp. 469-471). Boston: Birkhäuser.
- STEFFE, L.P., THOMPSON, P.W. & VON GLASERSFELD, E. (2000). Teaching Experiment Methodology: Underlying Principles and Essential Elements. In A.E. KELLY & R.A. LESH (Eds.), *Handbook of Research Design in Mathematics and Science Education* (pp. 267-306). Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- STRIKE, K.A. & POSNER, G.J. (1992). A Revisionist Theory of Conceptual Change. In R.A. DUSCHL (Ed.), *Philosophy of Science, Cognitive Psychology and Educational Theory and Practise* (pp. 147-176). New York, NY: State University NY Press.
- VOSNIADOU, S. (1994). Capturing and Modelling the Process of Conceptual Change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69.
- VOSNIADOU, S. (2002). On the Nature of Naïve Physics. In M. LIMÓN & L. MASON (Eds.), *Reconsidering Conceptual Change* (S. 61-76). Dordrecht: Kluwer.
- VOSNIADOU, S. & BREWER, W.F. (1994). Mental Models of the Day/Night Cycle. *Cognitive Science* 18, 123-183.
- WANDERSEE, J.H., MINTZES, J. J. & NOVAK, J.D. (1994). Research on Alternative Conceptions in Science. In D.L. GABEL (Ed.), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* (pp. 177-210). New York, NY: Macmillan.
- WITZEL, A. (2000). Das problemzentrierte Interview. In *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum Qualitative Social Research* 1(1). <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0114-fqs0001228>, aufgerufen am 3. Januar 2014.

## Anhang A:

### Fragen zur Ermittlung der Stärke des Hohlraum-Präkonzepts

(mit ja/nein zu beantworten)

1. Quellwasser ist Wasser, welches aus dem Boden herausfließt.
2. Damit Wasser im Untergrund fließen kann, müssen Kanäle und/oder Höhlen vorhanden sein.
3. Das Wasser, das aus einer Quelle ausfließt, ist versickertes Wasser, z.B. versickertes Regenwasser.
4. Unterirdisches Wasser liegt immer in großen unterirdischen Hohlräumen vor.
5. Je nachdem, welches Gestein im Untergrund vorkommt, wird darin unterschiedlich viel Wasser gespeichert.
6. Wasser versickert immer gleich schnell, unabhängig von der Gesteinsart im Untergrund.
7. In winzigen Hohlräumen (Poren) zwischen Kies- oder Sandkörnern kann Wasser gespeichert werden.
8. Auch in einer wasserdurchlässigen Gesteinsschicht fließt das Wasser nur sehr langsam.
9. Unterhalb eines Quellhorizonts / einer Quelllinie befindet sich niemals eine wasserundurchlässige („wasserdichte“) Schicht.
10. Quellwasser ist Grundwasser, das an der Erdoberfläche austritt.
11. Wasser fließt im Untergrund durch mikroskopisch kleine Poren im Gestein, die miteinander verbunden sind.

## Anhang B:

### Sondierungsfragen

(gegliedert in Anlehnung an die Kategorien in Tab. 2)

#### *Struktur der Erdkruste*

1. Stimmt es, dass die Erdkruste, also der Untergrund, aus vielen Schichten besteht? Sind das alles dieselben Schichten?
2. Wieso treten Quellen oft am Hang aus?

#### *Gesteinseigenschaften*

1. Kann Wasser durch hartes Gestein fließen?
2. Wenn ja: Wie fließt Wasser durch hartes Gestein? Was sind das für Wege, die das Wasser benutzt?

#### *Unterirdische Wasservorkommen*

1. Wie ist Wasser im Untergrund gespeichert?
2. Bewegt sich das Wasser unterirdisch? Wenn ja, in welche Richtung?

***Input/Output***

1. Wo kommt das Wasser, das aus Quellen herausquillt, her?
2. Wie kommt es, dass es Quellen gibt, die auch in langen Trockenzeiten noch Wasser schütten?

***Qualität von Quellwasser***

1. Ist Quellwasser besonders sauber? Wieso / Wieso nicht?
2. Wie wirkt es sich auf Quellwasser aus, wenn versickerndes Wasser verschmutzt ist?

***Ursachen für Wasseraustritt***

1. Wie kommt es dazu, dass Grundwasser (= unterirdisches Wasser) an die Erdoberfläche, konkret an einem Berghang, austritt?
2. Ist es möglich, dass Quellwasser aus der Tiefe nach oben zum Austrittsort aufsteigt?  
Wenn ja: Wieso? Woher kommt das Wasser?

**Anhang C:****Fragen zur Arbeit mit der Lernumgebung**

1. Wie hat dir die Arbeit, die du heute mit uns gemacht hast, insgesamt gefallen? Hat sie dich interessiert? (Interesse)
2. Waren der Lehrtext / die Experimente und die physischen Modelle für dich verständlich, was war unverständlich? (Verständlichkeit).
3. Du hast gelernt, wie eine Porenquelle funktioniert. Ist das Prinzip, wie eine Porenquelle funktioniert für dich nachvollziehbar und überzeugend? Falls nicht, welche Dinge, die eine Porenquelle betreffen, sind nicht überzeugend? (Glaubwürdigkeit)
4. Hat dich überrascht, wie eine Porenquelle funktioniert? (Kognitiver Konflikt empfunden?)
5. Empfindest du es als einen Widerspruch, dass Wasser durch ein hartes Gestein hindurch fließen kann? (Kognitiver Konflikt empfunden?)
6. Warum ist es wichtig, das Funktionieren von Quellen zu verstehen? (Fruchtbarkeit)
7. Wozu soll man wissen, wie eine Quelle funktioniert? Was bringt es dir, wenn du es verstehst? (individuelle Leistungsziele)